

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง
เทคนิคในการหาวงจรมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
โดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยภายนอก
TECHNIQUE TO EVALUATE EQUIVALENT CIRCUIT OF INDUCTION
MOTOR BY INCREASING EXTERNAL MOMENT OF INERTIA METHOD

โดย

นาย ภัทรุฒิ โอมพรนุวัฒน์
นาย อธิพัทธ์ สัตยธรรม
นาย นวิวัฒน์ จงประสาธน์สุข
นาย พฤทธิไกร คุณเศรษฐ์

z/vv

๑๑๓๖๒๗

๕๕๑

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 72642

วัน,เดือน,ปี 21 ส.ย. 2550

b. 11๖๙0๖๐3
i.

ปฏิญานินพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคในการหาวงจรมูลยของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
โดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยภายนอก

TECHNIQUE TO EVALUATE EQUIVALENT CIRCUIT OF INDUCTION
MOTOR BY INCREASING EXTERAL MOMENT OF INERTIA METHOD



รศ. พิเชิต ล้ายอง
อ.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

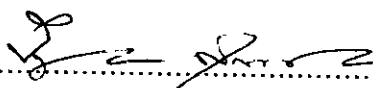
เรื่อง เทคนิคในการหาจอร์สมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการเพิ่ม
โมเมนต์ความเฉื่อยภายนอก

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย ณัฐวุฒิ โอมพรนุวัฒน์
 2. นาย ถิรพุทธิ สัตยธรรม
 3. นาย นิวัฒน์ จงประสาธน์สุข
 4. นาย พฤทธิไกร คุณเศรษฐ์



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ พิชิต สายอง)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคในการหาจรรยาสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการเพิ่ม โมเมนต์ความเฉื่อยภายนอก

นาย ภูริวัฒน์ เอมพรนุช ๑

นาย อธิพัทธ์ สัตยธรรม

นาย นิวัฒน์ จงประสาธน์สุข

นาย พฤทธิกร คุณเศรษฐ์

รศ. พิชิต ล้ายอง

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. เปี่ยมภูมิ สฤกษ์พฤกษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอเทคนิคในการทดสอบเพื่อหาจรรยาสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยภายนอก ซึ่งการทดสอบจะกระทำโดยการสตาร์ทมอเตอร์ที่อยู่ในสภาวะไร้ภาระ (no-load) ด้วยวิธีการสตาร์ทตรง (direct on-line starting) และทำการบันทึกค่าแรงดัน, กระแส, ความเร็วรอบ, และเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากความเร็วรอบศูนย์ถึงความเร็วเข้าใกล้ความเร็วเชิงโครนัสในสภาวะคงตัว (steady state) โดยในปริญญานิพนธ์นี้มีการนำล้อช่วยแรงมาทำการคัปปลิงกับเพลลาของมอเตอร์ ซึ่งทำให้ระยะเวลาในการเร่งความเร็วยาวนานขึ้น ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ต่างๆ ได้แก่ กระแส-เวลา, อัตราเร็วเชิงมุม-เวลา, แรงบิด-เวลา, กระแส-ความเร็วรอบ และแรงบิด-ความเร็วรอบ ในการหากราฟแรงบิด-ความเร็วรอบ จะหาได้จากการวัดความเร็วร่วมกันจากไมโครคอนโทรลเลอร์และโฟโตเซ็นเซอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟแรงบิดความเร็วรอบโดยวิธีการวัดความเร็วรอบโดย DC-Tachogenerator ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบ จะถูกพิจารณาพร้อมกับกราฟที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ เพื่อนำมาหาจรรยาสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำใช้ตลอดช่วงสภาวะสุดท้ายมีการทดสอบบล็อกโรเตอร์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการทดสอบนี้

**TECHNIQUE TO EVALUATE EQUIVALENT CIRCUIT OF INDUCTION MOTOR BY
INCREASING EXTERNAL MOMENT OF INERTIA METHOD**

Nattawut Ohmpornnuwat

Thiraput Sattayatham

Niwat Jongprasartsuk

Pruedthikrai Koonsed

Assoc. Prof. Pichit Lumyong Advisor

Piampoom Sarikprueck Advisor

2006

ABSTRACT

This thesis presents a technique to evaluate equivalent circuit of induction motor using and acceleration method. Test is performed on starting and induction motor by the direct-on-line starting at on-load state. Voltage, current and time during the acceleration from the standstill until the speed near a synchronous speed are recorded. This thesis a flywheel coupled to the shaft of the induction motor. Using such a method, the moment of inertia of motor can be increased. Test results are presented in many relationship forms such as current-time, angular speed-time, torque-time, current-speed and torque-speed. Torque-speed graph can be found from measurement of speed by micro-controller and photo electric sensor curves from and equivalent circuit. To evaluate equivalent circuit of induction motor . To confirm the test results, torque-speed curves from and acceleration test are compare with load test and block rotor test.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยคำแนะนำและปรึกษาของ รศ. พิเชิด ล้ายอง และ อ.เปี่ยมภูมิ สฤตพฤษ์อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำปรึกษาคำแนะนำ และคอยช่วยเหลือเมื่อผู้วิจัยเกิดปัญหา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของท่านทั้งสองนี้จากใจจริง

ขอขอบพระคุณพี่ๆปริญญาโทในห้องวิจัยที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษา การทดสอบหาข้อมูลในการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณพี่ วรชาติ แซ่ก๊ก ที่ช่วยให้ข้อมูลต่างๆ

ขอขอบคุณนายสถาพร สายใจ ผู้ที่ให้คำปรึกษาทางด้านโปรแกรมตลอดการทำวิจัย

ขอขอบคุณนายปากร ศิลธรรม และนายภาณุพันธ์ พงษ์งาม ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเอกสารของวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆที่ให้ความช่วยเหลือการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณคุณวิษุภรณ์ ทองมัน ที่คอยเป็นกำลังใจต่อนาย ณัฐภูมิผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณพี่ๆ บัณฑิตศึกษาห้องวิจัยเครื่องจักรกล ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาการทดสอบหาข้อมูลในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือการทำวิจัย

ขอขอบคุณ นายปากร ศิลธรรม และนาย ภาณุพันธ์ พงษ์งาม ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเอกสารของวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายขอกราบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ของผู้วิจัยทุกๆ ท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจ และช่วยเหลือทางด้านเงินทุนในการวิจัยตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
กิตติกรรมประกาศ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2.1 สเตเตอร์.....	3
2.2.2 โรเตอร์.....	3
2.2 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	4
2.3 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	5
2.3.1 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ชนิดไม่มีขั้วอื่น.....	5
2.3.2 การเกิดแรงบิดในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	9
2.4 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	9
2.5 การวิเคราะห์วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	13
บทที่ 3 วิธีการหาคุนลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	16
3.1 บทนำ.....	16
3.2 กราฟคุนลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	16
3.3 การหาคุนลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	18

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	
ด้วยวิธีเร่งความเร็ว.....	18
3.4.1 สมการแรงบิดมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะdynamic.....	19
3.4.2 เทคนิคในการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์	
ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	19
3.4.3 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย	
ของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ.....	20
3.5 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์	
และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด.....	21
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	22
4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	22
4.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ3เฟส.....	22
4.1.2 DC-Technogenerator.....	23
4.1.3 ล้อช่วยแรง(Fly wheel).....	24
4.1.4 Analyzing Recorder.....	25
4.1.5 แท่นสำหรับทดสอบมอเตอร์.....	26
4.1.6 Photo Sensor.....	26
4.1.7 DC Power Supply.....	27

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุป.....	47
เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ทฤษฎีของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย.....	49
ภาคผนวก ข คู่มือการใช้ไฟโต้เซ็นเซอร์.....	51
ภาคผนวก ค วิธีการเขียนไมโครคอนโทรเลอร์ โดยใช้ภาษา C.....	54
ประวัติผู้แต่ง.....	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสองขั้วอย่างง่าย (a) แบบจำลองพื้นฐาน (b) ไดอะแกรมของ เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก.....	6
2.2 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์.....	11
2.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	12
2.4 วงจรสมมูลย์ในอีกรูปแบบหนึ่ง.....	14
3.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะนำมาตัดสินใจเลือกใช้มอเตอร์ ได้.....	16
3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการออกแบบที่แตกต่างกัน ตาม มาตรฐานของ NEMA.....	17
3.3 รูปทรงของล้อช่วยแรงที่ใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย.....	20
4.1 มอเตอร์ขนาด 1,3 และ 5 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ.....	22
4.2 DC-Tachogenerator ที่ใช้ในการทดสอบ.....	23
4.3 ล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ.....	24
4.4 Analyzing Recorder.....	25
4.5 แท่นสำหรับทดสอบมอเตอร์.....	26
4.6 โฟโต้เซ็นเซอร์.....	26
4.7 DC Power Supply.....	27
4.8 Micro Controller.....	27
4.9 กราฟความสัมพันธ์กับกระแสระหว่างกระแสกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบ.....	31
4.10 กราฟความสัมพันธ์กับกระแสระหว่างกระแสกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบ.....	32
4.11 กราฟความสัมพันธ์กับกระแสระหว่างกระแสกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบ.....	32
4.12 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วงแรงขนาดต่างๆ.....	33
4.13 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วงแรงขนาดต่างๆ.....	33
4.14 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วงแรงขนาดต่างๆ.....	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อยंत्रแรงขนาดต่างๆ.....	34
4.16 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อยंत्रแรงขนาดต่างๆ.....	35
4.17 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อยंत्रแรงขนาดต่างๆ.....	35
4.18 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ต่อกับล้อยंत्रช่วยแรงขนาดต่างๆ.....	36
4.19 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อยंत्रช่วยแรงขนาดต่างๆ.....	36
4.20 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อยंत्रช่วยแรงขนาดต่างๆ.....	37
4.21 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อยंत्रแรงขนาดต่างๆ.....	38
4.22 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อยंत्रแรงขนาดต่างๆ.....	38
4.23 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อยंत्रแรงขนาดต่างๆ.....	39
4.24 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมุติ.....	40
4.25 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมุติ.....	40
4.26 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมุติ.....	41
4.27 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าจากการทดสอบภาระ.....	41
4.28 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าจากการทดสอบภาระ.....	42
4.29 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมุติ.....	42

VIII

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 กราฟระหว่างแรงบิด-เรีวรอบที่แรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (1 แรงม้า).....	43
4.31 กราฟระหว่างแรงบิด-เรีวรอบที่แรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (3 แรงม้า).....	44
4.32 กราฟระหว่างแรงบิด-เรีวรอบที่แรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (5 แรงม้า).....	44
4.33 กราฟระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบที่แตกต่างกันของแรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิด จากวงจรสมมูลย์เปรียบเทียบกับกราฟแรงบิดจากการสุ่มค่า R ของมอเตอร์ ขนาด 1 Hp ที่ค่า $K=310$	45
4.34 กราฟระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบที่แตกต่างกันของแรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิด จากวงจรสมมูลย์เปรียบเทียบกับกราฟแรงบิดจากการสุ่มค่า R ของมอเตอร์ ขนาด 3 Hp ที่ค่า $K=140$	45
4.35 กราฟระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบที่แตกต่างกันของแรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิด จากวงจรสมมูลย์เปรียบเทียบกับกราฟแรงบิดจากการสุ่มค่า R ของมอเตอร์ ขนาด 5 Hp ที่ค่า $R=100$	46
4.36 วงจรสมมูลย์ขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในงานด้านอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องต้นกำลังซึ่งในทางอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ก็จะมีภาระที่แตกต่างกันออกไปซึ่งวิศวกร หรือผู้ที่ใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำเป็นต้องทราบคุณลักษณะต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างชัดเจน จึงจะสามารถเลือกใช้ มอเตอร์ได้ถูกต้องกับขนาดและประเภทของงาน คุณสมบัติที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำคือ คุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบและในการใช้งานจริงนั้นกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่คำนวณได้จากวงจรสมมูลย์นั้น ไม่เหมือนกับกราฟคุณลักษณะที่ใช้งานจริง โดยเฉพาะช่วงการสตาร์ท จึงทำให้หากเรานำกราฟจากวงจรสมมูลย์มาใช้ จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. หาคุณลักษณะแรงบิดและความเร็วรอบ (torque-speed characteristics) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยวิธีเร่งความเร็วซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่สามารถหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ ได้ตลอดย่านความเร็วของมอเตอร์ ตั้งแต่หยุดนิ่งจนเข้าสู่สภาวะคงตัว

2. วัดความเร็วรอบโดยวัดจากเทคโนโลยีโคเจนเนอเรเตอร์และโฟโต้เซนเซอร์

3. นำค่าคุณลักษณะแรงบิดและความเร็วรอบ (torque-speed characteristics) ที่ได้จากการทดสอบมาใช้ในการคำนวณหา วงจรสมมูลย์ตลอดย่านการใช้งาน

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

คือการนำเสนอเทคนิคและกระบวนการในการหาคุณสมบัติ-แรงบิดความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทำการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการทดสอบโดยวิธีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการวิเคราะห์หาแรงบิด-ความเร็วรอบ โดยใช้วิธีการวัด 2 วิธี คือ เทคโนโลยีโคเจนเนอเรเตอร์และโฟโต้เซนเซอร์ และนำกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบจากวงจรสมมูลย์ นำกราฟที่ได้มาหาวงจรสมมูลย์ตลอดย่านการใช้งาน

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเริ่มจากการเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากนั้นจะเป็นการอธิบายปรากฏการณ์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ และนำเสนอวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อใช้ในการหาคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.ทดสอบการเร่งความเร็วมอเตอร์โดยเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยวัดแรงดัน, ความเร็วของโรเตอร์และกระแสที่ออกมาจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ Analyzing Recorder ในการบันทึกข้อมูลที่เวลาต่างๆ

3.นำค่าที่ได้มาเข้ากระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณหากราฟ คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ เพื่อหาวงจรมูลย์ตลอดย่านการใช้งาน

4.นำเสนอการทดลองและผลการทดลอง

5.สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.หลังจากทำโครงการนี้แล้ว เราจะสามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการทดสอบหาวงจรมูลย์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ เนื่องจากเราต้องเลือกใช้กราฟแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เหมาะกับโหลด

2.เราสามารถนำ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบ ไปใช้ในการหาวงจรมูลย์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.สามารถกล่าวได้ว่าวงจรมูลย์ที่ใช้กันทั่วไปนั้น ไม่สามารถใช้ได้ตลอดย่านการใช้งาน โดยใช้ได้เฉพาะช่วงเวลาที่ใกล้ความเร็วซิงโครนัส

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1 บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ (induction motor) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating current machine) โดยอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันแบบไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ

1. สเตเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และ
2. โรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีการหมุน โดยแต่ละส่วนจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่ซึ่งมีแกนเป็นแผ่นลามีเนตประกอบกันซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าซิลิคอน (silicon steel) และมีขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature) ฝังตัวอยู่ในร่องสลิตของแกนเหล็ก โดยขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีการพันขดลวดแบบกระจายเพื่อทำให้เกิดการกระจายสนามแม่เหล็กแบบไซน์ซุซอยด์ (sinusoidal)

2.1.2 โรเตอร์ (Rotor)

โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นโรเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น (non-salient-pole) หรือทรงกระบอก (cylindrical rotor) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

2.1.2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้จะมีความแข็งแรงทางกลสูงและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบขดลวดพันรอบ (wound rotor) ส่วนประกอบของโรเตอร์จะมีแท่งตัวนำซึ่งมีการต่อลัดวงจรทางด้านหัวและท้ายของแท่งตัวนำ แท่งตัวนำดังกล่าวจะฝังตัวอยู่ในเหล็กกล้าซิลิคอน (silicon steel) โดยชนิดของแท่งตัวนำจะเป็นอลูมิเนียมหรือทองแดงขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังของมอเตอร์ ในกรณีมอเตอร์ขนาดเล็กกว่า 250 kW จะใช้อลูมิเนียมเป็นแท่งตัวนำ ถ้าขนาดพิกัดสูงกว่า 250 kW จะใช้ทองแดงเป็นแท่งตัวนำลักษณะของสลิตของโรเตอร์มีผลต่อกราฟคุณลักษณะแรงบิดความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1.2.2 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor)

โรเตอร์ประเภทประเภทนี้มีขดลวดพันอยู่ในร่องสลิตเช่นเดียวกับสเตเตอร์ โดยส่วนปลายของขดลวดจะต่ออยู่กับแหวนสั้น (slip ring) และมีแปรงถ่านสัมผัสอยู่โดยแปรงถ่านจะต่ออยู่กับวงจรภายนอกเพื่อทำการต่อวงจรแบบสตาร์ทหรือเคลด้า มอเตอร์ที่มีโรเตอร์ประเภทนี้มีข้อจำกัดคือจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์และไม่สามารถหมุนเร็วมากได้เนื่องจากความแข็งแรงทางกลต่ำนอกจากนี้ยังมีราคาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก แต่ข้อดีของโรเตอร์ประเภทนี้คือสามารถกำหนดแรงบิดขณะสตาร์ทได้โดยอาศัยการต่อความต้านทานภายนอก

2.2 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทกระตุ้นเดี่ยว (single excited) ซึ่งอาศัยการป้อนพลังงานเข้าทางสเตเตอร์ พลังงานดังกล่าวจะถูกส่งไปยังโรเตอร์โดยอาศัยการเหนี่ยวนำ เช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ผ่านช่องว่างอากาศ (air gap) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์

เมื่อมีการป้อนแรงดันให้แก่สเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ช่องว่างอากาศซึ่งสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ดังสมการ

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

โดยที่ N_s = ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)

f = ความถี่แหล่งจ่าย (Hz)

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์

ในกรณีที่มีการป้อนแรงดันให้แก่สเตเตอร์และทำการลอคโรเตอร์ให้อยู่กับที่จะเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในโรเตอร์ตามหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งความถี่ของแรงดันและกระแสทางด้านโรเตอร์ที่มีค่าเท่ากับทางด้านสเตเตอร์ ระดับของแรงดันและกระแสของโรเตอร์จะแปรตามอัตราส่วนรอบ (turn ratio) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ในสภาวะนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีสภาพเหมือนหม้อแปลงที่มีการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ (secondary) แต่ถ้าหากว่ามีการขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ให้หมุนในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุนจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้นจึงไม่เกิดกระแสไหลในมอเตอร์ทำให้ไม่เกิดแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic torque) แต่ถ้าโรเตอร์หมุนที่ความเร็วใด ๆ ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนและมีค่าน้อยกว่าความเร็วซิงโครนัส จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ซึ่งความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสและความเร็วรอบของโรเตอร์เรียกว่าสลิป (slip) ในการอธิบายค่าสลิปจะแสดงอยู่ในรูปสมการของเปอร์เซ็นต์สลิป (per-unit slip) ดังสมการ

$$s = \frac{N - N_r}{N_s} \quad (2.2)$$

โดยที่ ω_s = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (rad/s)

ω_r = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rad/s)

เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบใด ๆ ที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ซึ่งได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับ $s f$ แรงบิดที่เกิดขึ้นในกรณีมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบใด ๆ เรียกว่าแรงบิดอะซิงโครนัส (asynchronous torque)

2.3 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนที่มีโรเตอร์เป็นประเภทไม่มีขั้วยื่น ดังนั้น ช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์จึงมีขนาดเท่ากันตลอด (uniform air-gap) การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงมีหลักการเดียวกับการเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดที่โรเตอร์ไม่มีขั้วยื่น

2.3.1 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในสเตเตอร์และโรเตอร์จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวจะเกี่ยวค้ำกันผ่านช่องว่างอากาศระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวค้ำระหว่างขดลวดทั้งสองนี้เรียกว่าฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (mutual flux) ซึ่งเป็นฟลักซ์แม่เหล็กส่วนมากในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในส่วนของฟลักซ์แม่เหล็กส่วนน้อยที่ไม่ได้ผ่านช่องว่างอากาศแต่จะเกี่ยวค้ำเฉพาะตัวขดลวดที่กำเนิดฟลักซ์นั้นเรียกว่าฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล (leakage flux) ในส่วนฟลักซ์แม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นจะพิจารณาเฉพาะฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (mutual flux) เท่านั้น ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลจะมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องจักร โดยผลของฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลจะมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปของค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance)

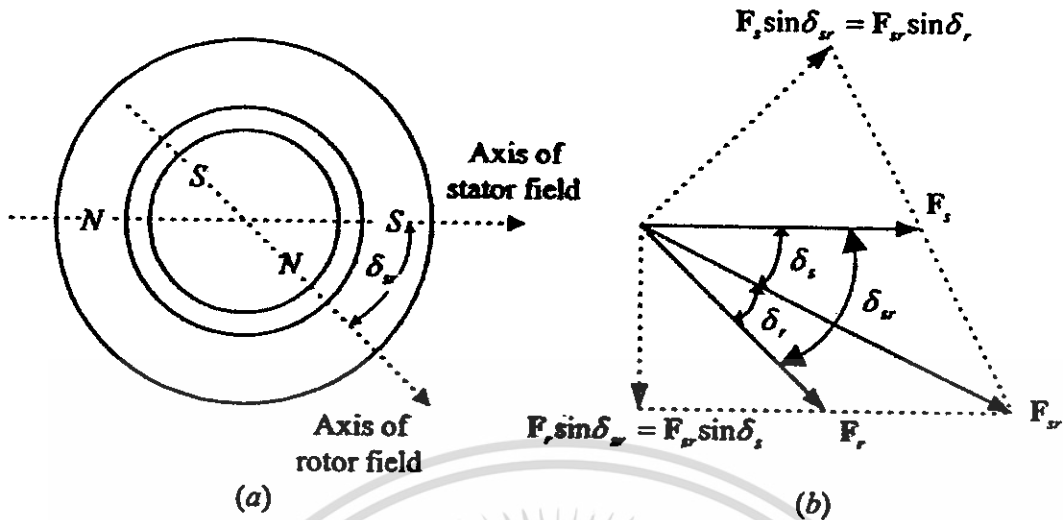
ในการพิจารณาการเกิดแรงบิดจะพิจารณาฟลักซ์ร่วมลัพธ์ (resultant mutual flux) โดยพิจารณาในเทอมของ magnetic coenergy ที่สะสมในช่องว่างอากาศรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์, โรเตอร์และมุม δ_{sr} ระหว่างแกนแม่เหล็กทั้งสอง ซึ่งแรงบิดสามารถคำนวณได้จากการหาอนุพันธ์เชิงซ้อน (partial derivative) ของ coenergy กับมุม δ_{sr}

ในการพิจารณากำหนดให้สนามแม่เหล็กในแนวเส้นสัมผัสมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะสนามแม่เหล็ก H ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่านั้น เมื่อทำการอินทิเกรตเชิงเส้นความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านช่องว่างอากาศจะได้เท่ากับ Hg ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ \mathcal{F}_{sr}

$$Hg = \mathcal{F}_{sr} \quad (2.3)$$

สัญลักษณ์ \mathcal{F}_{sr} แสดงให้เห็นว่าค่า mmf wave เป็นฟังก์ชันของมุมรอบ ๆ เส้นรอบวงของสเตเตอร์ เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ F_{sr} เกิดจากผลรวมทางเวกเตอร์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ F_s และโรเตอร์ F_r ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการการรวมกันทางเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{sr} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสองขั้วอย่างง่าย (a) แบบจำลองพื้นฐาน (b) โคอะแกรมของเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

ค่า F แทนค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ดังนั้นสนามแม่เหล็กลัพธ์ H มีการกระจายตัวแบบไซนูซอยด์ ซึ่งค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กลัพธ์หาได้จากสมการ

$$H_{peak} = \frac{F_r}{g} \quad (2.5)$$

ค่าของ coenergy density ในช่องว่างอากาศ ณ จุดใด ๆ ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากับ H มีค่าเท่ากับ $\frac{\mu_0}{2} H^2$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ค่าเฉลี่ยของ coenergy density} &= \frac{\mu_0}{2} \frac{H_{peak}^2}{2} \\ &= \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{F_r}{g} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

โดยที่ μ_0 = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ
 F_r = ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ (ampere-turn)
 g = ระยะช่องว่างอากาศ (m)
 H_{peak} = ค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ค่า coenergy ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

$W'_{fd} = (\text{ค่าเฉลี่ยของ coenergy density})(\text{ปริมาตรของช่องว่างอากาศ})$

$$\begin{aligned} &= \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{F_r}{g} \right)^2 \pi D l g \\ &= \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} F_r^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดยที่ $D =$ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างอากาศ (m)

$l =$ ความยาวในแนวแกนของช่องว่างอากาศ (m)

$g =$ ระยะช่องว่างอากาศ (m)

จากสมการที่ 2.4 จะได้ค่า coenergy ที่สะสมอยู่ในช่องว่างอากาศในรูปของค่าสูงสุดของขนาดแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการ

$$W'_{fd} = \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} (F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_r) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 สามารถสมการของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยทำการหาอนุพันธ์เชิงซ้อนระหว่าง coenergy และมุมระหว่างแกนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าของสเตเตอร์และโรเตอร์ซึ่งจะได้สมการแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีสองขั้วดังนี้

$$T = + \frac{\partial W'_{fd}}{\partial \delta_r} = - \frac{\mu_0 D l}{g} F_s F_r \sin \delta_r \quad (2.9)$$

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีจำนวน P ขั้วจะได้สมการแรงบิดอยู่ในรูปแบบ

$$T = - \frac{P \pi \mu_0 D l}{2 \cdot 2 \cdot g} F_s F_r \sin \delta_r \quad (2.10)$$

จากรูปที่ 2.1 จะพบว่า $F_r \sin \delta_r$ เป็นส่วนประกอบของ F_r ในแนวตั้งฉากกับ F_s และ $F_s \sin \delta_r$ เป็นส่วนประกอบของ F_s ในแนวตั้งฉากกับ F_r ซึ่งจากสมการที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดแปรผันกับผลคูณเชิงเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.1 จะได้ความสัมพันธ์

$$F_s \sin \delta_r = F_r \sin \delta_s \quad (2.11)$$

$$F_r \sin \delta_r = F_s \sin \delta_s \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12 เมื่อทำการแปลงรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์จะได้

$$T = -\frac{P \pi \mu_0 D l}{2 \cdot 2 \cdot g} F_r F_\sigma \sin \delta, \quad (2.13)$$

$$T = -\frac{P \pi \mu_0 D l}{2 \cdot 2 \cdot g} F_r F_\sigma \sin \delta, \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.10, 2.13 และ 2.14 เป็นการนำเสนอรูปแบบของสมการแรงบิดใน 2 รูปแบบคือ

1. แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของแต่ละส่วนโดยแยกเป็นส่วนของสเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการที่ 2.10

2. แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์และส่วนของสเตเตอร์หรือโรเตอร์ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14

จากสมการที่ 2.10, 2.13 และ 2.14 พบว่าค่าสนามแม่เหล็กจะถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าสูงสุดของรูปคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ถ้ากำหนดให้แกนเหล็กไม่มีการอิ่มตัว จะพบว่าค่าสนามแม่เหล็กสามารถนำเสนอในรูปของค่าสูงสุดของรูปคลื่นของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กหรือฟลักซ์ต่อขั้ว ดังนั้นค่าสูงสุดของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B จะได้จากสมการ $\mu_0 F/g$ เมื่อ F แทนค่าสูงสุดของรูปคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กดังนั้นจากสมการที่ 2.14 เมื่อต้องการนำเสนอแรงบิดในรูปของฟลักซ์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กลัพธ์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์จะได้ดังสมการ

$$T = -\frac{P \pi D l}{2 \cdot 2} B_r F_r \sin \delta, \quad (2.15)$$

ในการออกแบบอุปกรณ์ทางด้าน electromagnetic จะมีข้อจำกัดอยู่ที่การอิ่มตัวของสารแม่เหล็กซึ่งคือสูงสุดของรูปคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กลัพธ์ B_r มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.0 T เพื่อให้เกิดความสะดวกในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าดังนั้นจึงสามารถแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของฟลักซ์แม่เหล็กลัพธ์โดย

$$\Phi = (\text{ค่าเฉลี่ยของค่า } B \text{ ในแต่ละขั้ว})(\text{พื้นที่ของขั้วแม่เหล็ก}) \quad (2.16)$$

ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นสัญญาณแบบไซน์ซวยดในครึ่งลูกคลื่นมีค่าที่เท่ากับ $\frac{2}{\pi}$ คูณค่าสูงสุดของรูปคลื่นดังสมการ

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B \frac{\pi D l}{P} = \frac{2 D l}{P} B \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า B แทนค่าสูงสุดของรูปคลื่นของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังนั้นผลลัพธ์ของสมการที่ 2.15 คือ

$$T = -\frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \Phi_{sr} F_r \sin \delta, \quad (2.18)$$

โดยที่ Φ_{sr} = ฟลักซ์แม่เหล็กลัพธ์ซึ่งสร้างโดยสเตเตอร์และโรเตอร์
 δ_r = มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์

2.3.2 การเกิดแรงบิดในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 ซึ่งค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีลักษณะเดียวกับการเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดไม่มีขั้วยื่นซึ่งสมการแรงบิดแสดงดังสมการที่ 2.18 จากสมการที่ 2.18 พิจารณาเทอม Φ_{sr} โดยกำหนดให้ Φ_{sr} มีค่าคงที่เมื่อมีการป้อนแรงดันและความถี่ที่คงที่ให้แก่สเตเตอร์ทำให้เทอม $-\frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \Phi_{sr}$ ของสมการที่ 2.18 มีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์ F_r ซึ่งค่าดังกล่าวจะมีแปรผันตามขนาดของกระแสที่โรเตอร์ I_r ดังนั้นเมื่อจัดรูปแบบสมการแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายจะได้สมการดังแสดงในสมการที่ 2.19

$$T = KI_r \sin \delta_r, \quad (2.19)$$

โดยที่ K = ค่าคงที่

2.4 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปแบบหนึ่งในการพิจารณารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กคือการพิจารณาจากวงจรสมมูลย์ โดยพิจารณาวงจรสมมูลย์โดยพิจารณาให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้รับการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟสสมดุล ในการพิจารณาวงจรสมมูลย์นั้นจะทำการพิจารณาแยกเป็นเฟสไปโดยกำหนดให้มีการต่อวงจรของมอเตอร์เป็นแบบ Y และแรงดันที่ปรากฏที่ขั้วของวงจรสมมูลย์เป็นแรงดันเฟส ส่วนกระแสเป็นกระแสไลน์ ลักษณะของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเหมือนกับหม้อแปลงโดยเริ่มพิจารณาจากทางด้านสเตเตอร์ก่อนซึ่งสมการซึ่งอธิบายวงจรสมมูลย์ทางด้านสเตเตอร์เป็นดังนี้

$$V_1 = E_1 + I_1(R_1 + jX_1) \quad (2.20)$$

โดยที่ V_1 = แรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (V)
 E_1 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ (V)
 I_1 = กระแสสเตเตอร์ (A)
 R_1 = ความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ (Ω)
 X_1 = ค่า reactance ที่สเตเตอร์ (Ω)

ฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศถูกสร้างจากผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์ และโรเตอร์ ซึ่งจากรูปที่ 2.4 กระแสสเตเตอร์ I_1 สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน โดยส่วนแรกคือ ส่วนประกอบทางด้านภาระ (load component) I_2 ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ และส่วนที่สองคือ ส่วนประกอบทางด้านกระตุ้นหรือกระแสกระตุ้น (exciting component) I_m ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศและเป็นฟังก์ชันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_1 กระแสกระตุ้นจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกอยู่ในรูปการสูญเสียที่แกนเหล็ก (core loss component) I_c ซึ่งจะล่าหลัง E_1 อยู่ 90 องศา ซึ่งในวงจรสมมูลย์จะแสดงการสูญเสียในแกนเหล็กในรูปของ R_c ต่อขนานอยู่กับส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กในรูปของ X_m ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะต่ออยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1

เมื่อพิจารณาโรเตอร์ที่ความเร็วรอบและฟลักซ์เดียวกันโดยใช้หลักการเดียวกับของหม้อแปลงซึ่งไฟฟ้าโดยการ transfer ส่วนประกอบทางด้าน secondary มาด้าน primary โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ primary และ secondary ในรูปของ turn ratio

$$E_{2s} = aE_{rotor} \quad (2.21)$$

โดยที่ E_{2s} = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลย์ของโรเตอร์
 E_{rotor} = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจริงที่โรเตอร์
 a = turn ratio

ในส่วนของความสัมพันธ์ทางด้านกระแสเช่นเดียวกันแรงดันไฟฟ้าโดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจริงที่โรเตอร์ I_{rotor} และกระแสในวงจรสมมูลย์ของโรเตอร์ I_{2s} เป็นดังสมการที่ 2.22

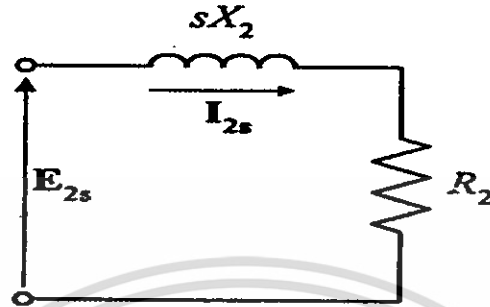
$$I_{2s} = \frac{I_{rotor}}{a} \quad (2.22)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.21 มาหารด้วยสมการที่ 2.22 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า impedance ของวงจรสมมูลย์ของโรเตอร์ Z_{2s} และค่า impedance ของวงจรโรเตอร์จริง Z_{rotor}

$$Z_{2s} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{a^2 E_{rotor}}{I_{rotor}} = a^2 Z_{rotor} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.21, 2.22 และ 2.23 ค่า E_{2s} , I_{2s} และ Z_{2s} เป็นค่าที่ได้จากการ transfer ตัวแปรและพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์มาทางสเตเตอร์โดยอาศัยหลักการของหม้อแปลงโดยมองจากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ (rotor reference frame) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.24



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์

$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = Z_{2s} = R_2 + jsX_2 \quad (2.24)$$

โดยที่ Z_{2s} = ค่า impedance ของโรเตอร์ที่ความถี่สลิปอ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์
 R_2 = ค่าความต้านทานของโรเตอร์อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์
 sX_2 = ค่า reactance ของโรเตอร์อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ที่ความถี่สลิป

จากสมการที่ 2.24 จะได้ค่า reactance มีค่าแปรผันกับค่าสลิปของมอเตอร์โดยที่ X_2 เป็นค่า reactance ที่ความถี่เดียวกับสเตเตอร์ เมื่อมองโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ (Rotor reference frame) จะได้วงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.5

เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรต่างๆ ของโรเตอร์โดยมองจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์ (stator reference frame) พบว่าเมื่อมองจากด้านสเตเตอร์จะพบว่ารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส โดยฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ E_1 และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ E_2 ซึ่งหากว่าไม่มีผลจากความเร็วของโรเตอร์ (โรเตอร์หยุดนิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสเตเตอร์) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์จะเท่ากับที่สเตเตอร์ แต่เนื่องจากโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วใด ๆ ทำให้มีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์เท่ากับ s ซึ่งส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์มีความสัมพันธ์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ดังสมการที่ 2.25

$$E_{2s} = sE_1 \quad (2.25)$$

ในส่วนประกอบทางด้านภาระ (load component) I_2 ของกระแสทางด้านสเตเตอร์ใช้สำหรับสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อต่อต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์เพื่อรักษาระดับฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศไว้ และเนื่องจากสมมติให้จำนวนรอบของขดลวดทางด้านโรเตอร์และสเตเตอร์มีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง I_2 และ I_{2s} เป็นดังสมการที่ 2.26

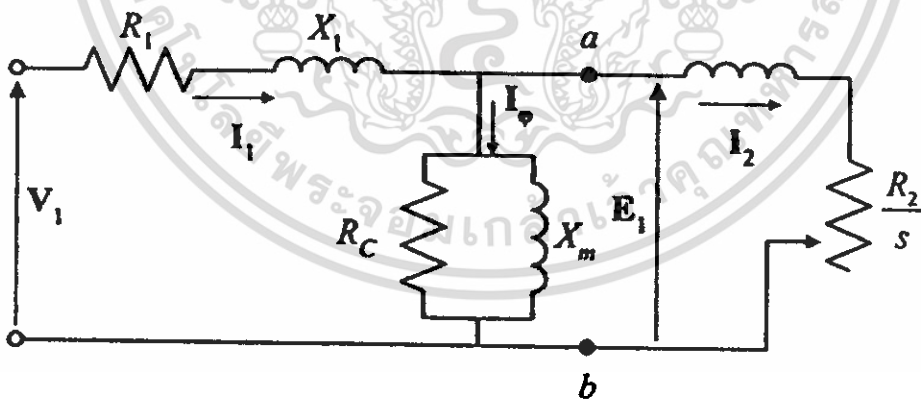
$$I_{2s} = I_2 \quad (2.26)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.25 หาคด้วยสมการที่ 2.26 จะได้

$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{sE_1}{I_2} \quad (2.27)$$

เมื่อนำผลของความเร็วยุทธของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ามาพิจารณาพร้อมกับสมการที่ 2.24 และสมการที่ 2.27 จะได้ความสัมพันธ์

$$\frac{sE_2}{I_2} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = R_2 + jsX_2 \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อนำค่าสลิปหารทั้งสองข้างของสมการที่ 2.28 จะได้

$$\frac{E_1}{I_2} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการพิจารณาองค์ประกอบของโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์

เมื่อพิจารณาทางกายภาพพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์ซึ่งมีความถี่ sf โดยมีทิศทางไปทางเดียวกับโรเตอร์ซึ่งมีความถี่เท่ากับคั้งนี้ $(1-s) f$ แต่เมื่อมองจากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ พบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่โรเตอร์ที่มีความเร็วเท่ากับ sf แต่เมื่อพิจารณาจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์จะพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์จะมีความเท่ากับ ความถี่ซิงโครนัสนั่นเอง (synchronous frequency) เมื่อพิจารณาในรูปของวงจรมุมลย์จะได้รูปที่ 2.6

2.5 การวิเคราะห์ห้วงจรมุมลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ภายหลังจากได้วงจรมุมลย์แล้วสามารถนำวงจรมุมลย์มาคำนวณหาสมรรถนะและคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำอันได้แก่ กำลังไฟฟ้า, แรงบิด เป็นต้น

เมื่อพิจารณาวงจรมุมลย์ดังรูปที่ 2.6 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ transfer ผ่านช่องอากาศ (power transfer across the air gap) P_{g1} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.30 โดยอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์

$$P_{g1} = q_1 I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.30)$$

ค่า q_1 แทนจำนวนเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากสมการที่ 2.30 กำลังไฟฟ้าที่ได้เป็นกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศโดยกำลังไฟฟ้างี้สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นการสูญเสียที่สเตเตอร์ในรูปของความร้อนดังสมการที่ 2.30

$$\text{rotor } I^2 R_{\text{loss}} = q_1 I_2^2 R_2 \quad (2.31)$$

อีกส่วนคือส่วนที่แปลงรูปพลังงานมาเป็นพลังงานกลดังสมการ

$$P = P_{g1} - \text{rotor } I^2 R_{\text{loss}} = q_1 I_2^2 \frac{R_2}{S} - q_1 I_2^2 R_2 \quad (2.32)$$

จากสมการที่ 2.32 สามารถเขียนให้อยู่ที่กระทัดรัดขึ้นได้

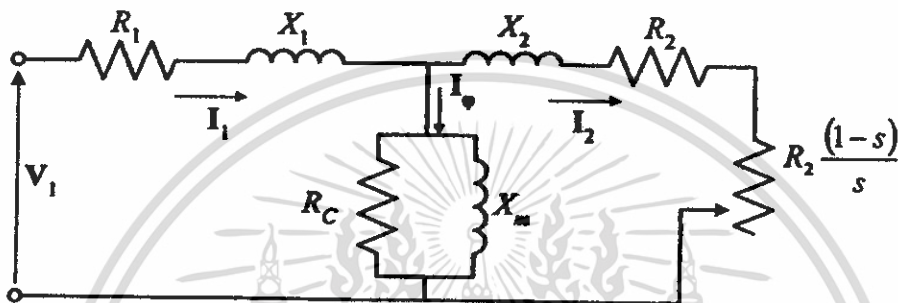
$$P = q_1 I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของ P_{g1} ดังสมการที่ 2.34

$$P = (1-s)P_{g1} \quad (2.34)$$

จากสมการที่ 2.23, 2.33 และ 2.34 เมื่อนำมาเขียนในรูปของวงจรมูลยซึ่งแยกองค์ประกอบที่เป็นการสูญเสียในรูปความร้อนและในรูปของกำลังทางกลออกได้ดังรูปที่ 2.7 โดยค่า R_2 เป็นแทนส่วนของความสูญเสียในรูปความร้อน และ $R_2 \frac{(1-s)}{s}$ แทนส่วนที่เป็นกำลังงานทางกล



รูปที่ 2.4 วงจรมูลยในอีกรูปแบบหนึ่ง

ค่า electromagnetic torque T_e เป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ ซึ่งผลคูณระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ความเร็วซิงโครนัส ω_s จะได้กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงอยู่ในสมการที่ 2.35

$$P = (1-s)\omega_s T_e \quad (2.35)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.33 มาพิจารณาพร้อมกับสมการที่ 2.35 จะได้สมการแรงบิดดังสมการ

$$T_e = \frac{1}{\omega_s} I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.36)$$

ในกรณีที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ 3 เฟส ค่า q_1 จะมีค่าเท่ากับ 3 ดังนั้นสมการที่ 2.36 จะกลายเป็น

$$T_e = 3I_2^2 \frac{R_2}{s\omega_s} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของค่าความเร็วเชิงโคโรนัส ω_s , สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{p} \quad (2.38)$$

โดยที่ p = จำนวนขั้วของมอเตอร์

f = ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า

ค่าแรงบิดที่ได้สมการ 2.37 เป็นค่าแรงบิดภายในมอเตอร์เท่านั้นซึ่งยังไม่เป็นค่าแรงบิดที่ใช้รับภาระต่างๆ ซึ่งต้องนำค่าความสูญเสียทางกลเนื่องจากความเสียดทานและแรงต้านของลมและค่า stray load losses ออกเสียก่อนจึงจะได้ค่าแรงบิดที่เพลลาที่ใช้รับภาระจริง ๆ



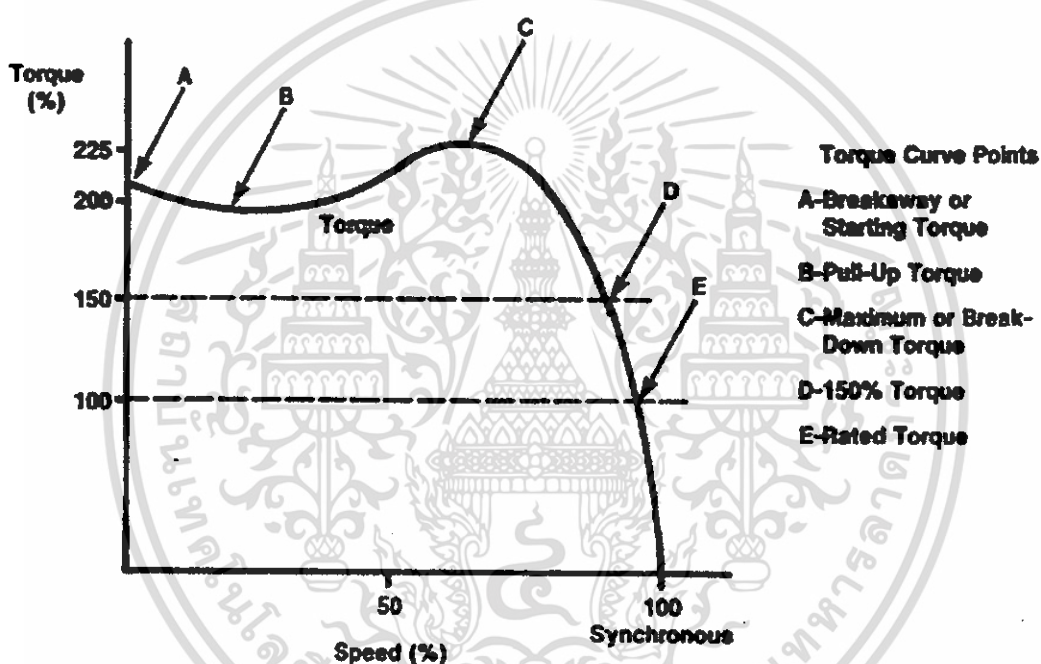
บทที่ 3

วิธีการหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 บทนำ

กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ ณ ความเร็วใดๆ จากศูนย์ถึงความเร็วซิงโครนัส วิธีการหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีหลายวิธี แต่ในการทดสอบหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำกำหนดมาตรฐานไว้หลายมาตรฐาน ในส่วนการนำเสนอเป็นวิธี IEEE standard 112-1996 [1]

3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

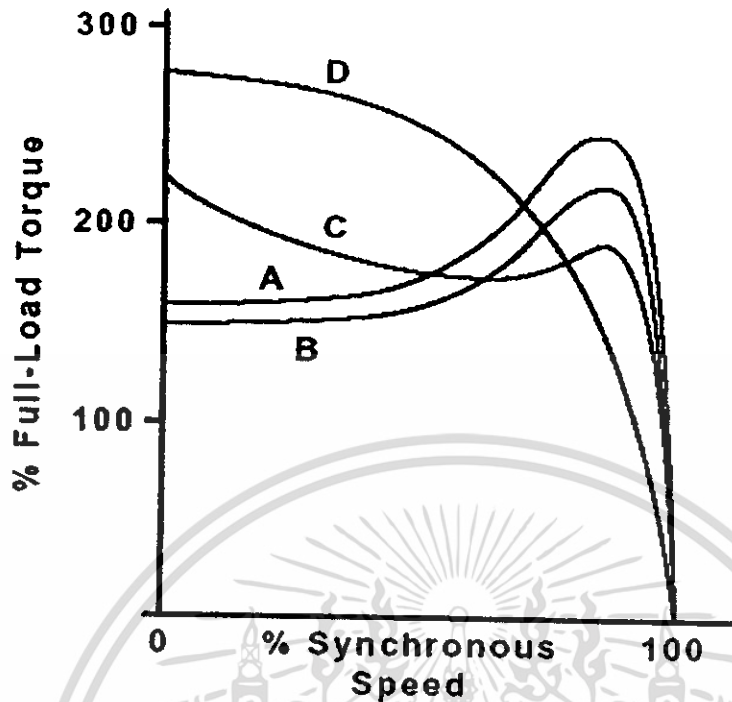


รูปที่ 3.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะนำมาตัดสินเลือกใช้มอเตอร์ได้

จากรูป

- จุด A เป็นค่าแรงบิดขณะที่ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับศูนย์หรือขณะสตาร์ทมอเตอร์
- จุด B เป็นแรงบิดขณะที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากสภาวะหยุดนิ่งถึงความเร็วที่ให้แรงบิดสูงสุด
- จุด C เป็นค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์
- จุด E เป็นค่าแรงบิดปกติของมอเตอร์

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการออกแบบที่แตกต่างกันตามมาตรฐานของ NEMA

จากรูปแสดงให้เห็นถึงกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการออกแบบที่แตกต่างกันตามมาตรฐานของ NEMA ดังมีรายละเอียดดังนี้

- Design A เป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดขณะสตาร์ทเท่ากับ 125%-175% ของแรงบิดที่พิกัดค่ากระแสขณะสตาร์ทเท่ากับ 5-7 เท่าของกระแสที่มี speed regulation เท่ากับ 2%-4%
- Design B เป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดขณะสตาร์ทเท่ากับ 125%-175% ของแรงบิดที่พิกัดค่ากระแสขณะสตาร์ทเท่ากับ 4-5.5 เท่าของกระแสที่มี speed regulation เท่ากับ 3%-5%
- Design C เป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดขณะสตาร์ทเท่ากับ 200%-275% ของแรงบิดที่พิกัดค่ากระแสขณะสตาร์ทเท่ากับ 3.5-5 เท่าของกระแสที่มี speed regulation เท่ากับ 4%-5%
- Design D เป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดขณะสตาร์ทเท่ากับ 250%-300% ของแรงบิดที่พิกัดค่ากระแสขณะสตาร์ทเท่ากับ 3.5-5 เท่าของกระแสที่มี speed regulation เท่ากับ 4%-5%

72642

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีมาตรฐานในการทดสอบไว้ 4 วิธีได้แก่

1. วิธีการวัดค่าเอาท์พุท
2. วิธีเร่งความเร็ว
3. วิธีการวัดค่าอินพุท
4. วิธีวัดค่าโดยตรง

วิธีที่ 1,4 นั้นต้องรักษาระดับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ก่อนที่จะบันทึกข้อมูล ในวิธีที่ 3 นั้นเป็นการทดสอบในกรณีที่ไม่สามารถปลดภาระออกจากเพลลาของมอเตอร์ได้ซึ่งทำให้ค่าแรงบิดที่คำนวณได้นั้นไม่ครบตลอดย่านความเร็วรอบของมอเตอร์เพราะความเร็วสูงสุดจะหยุดที่ความเร็วพิคก์เท่านั้น ดังนั้นรายงานนี้จึงนำเสนอวิธีที่ 2 เพราะใช้เวลาทดสอบสั้นและให้ข้อมูลได้ตลอดย่านความเร็ว

3.4 การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็วกระทำโดยการสตาร์ทมอเตอร์ด้วยวิธีสตาร์ทตรง โดยมอเตอร์อยู่ในสภาวะไร้ภาระ จากนั้นบันทึกข้อมูล แรงดัน, กระแส, ความเร็วรอบ และเวลาที่มอเตอร์เร่งความเร็ว การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็วนี้ต้องอาศัยเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลกระทบของทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าจากเครื่องมือวัดและจากตัวมอเตอร์เองเพราะจะส่งผลกระทบต่อข้อมูลได้ ดังนั้นต้องกำจัดผลกระทบโดยการคัปปลิงล้อยช่วยแรงเข้ากับเพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือลดแรงดันป้อนเข้า

การหาแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์หาจาก

$$T = \frac{J}{k} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (3.1)$$

โดยที่	T	=	แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (N-m)
	J	=	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของส่วนที่มีการหมุน ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
	$\frac{dn}{dt}$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ (rpm/s)
	k	=	9.549

จากสมการที่ 3.1 จัดสมการที่ใช้กันทั่วไปเป็น

$$T = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.2)$$

โดยที่ $\frac{d\omega}{dt}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s^2)

3.4.1 สมการแรงบิดมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะdynamic

เมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะdynamic สมการแรงบิดจะเป็นดังนี้

$$T_m = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r + F\omega_r^2 + T_c + T_L \quad (3.3)$$

$$T_1 = D\omega_r + F\omega_r^2 + T_c + T_L \quad (3.4)$$

$$T_m = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + T_1 \quad (3.5)$$

โดยที่ T_m = แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)
 T_L = แรงบิดของภาระ (N-m)
 T_c = แรงบิดเนื่องจาก coulomb friction (N-m)
 $D\omega_r$ = แรงบิดเนื่องจากความหนืด (N-m)
 $F\omega_r^2$ = แรงบิดเนื่องจากแรงต้านของลม (N-m)
 J_m = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (kg/m^2)
 ω_r = ขนาดของความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (rad/s)

3.4.2 เทคนิคในการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังที่กล่าวไว้ ต้องมีการเพิ่มเวลาในการเร่งความเร็วโดยมีสมการดังนี้

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{1}{T_m + T_1} d\omega \quad (3.6)$$

โดยที่ t = เวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์จาก

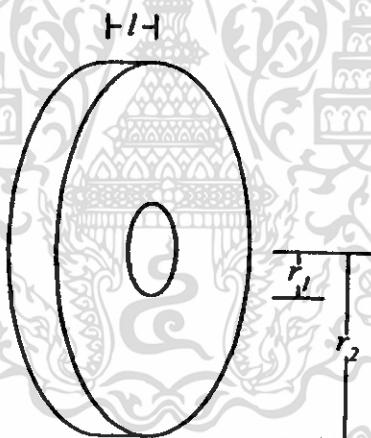
เนื่องจากการทดสอบการหาค่าลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยวิธีเร่งความเร็วทดสอบในภาวะ no-load และค่า T_c และ $F\omega_r^2$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงบิดอื่น ๆ ดังนั้นสมการที่ 3.3 จะกลายเป็น

$$T_m = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad (3.7)$$

จากสมการที่ 3.6 เมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นทำให้เวลาการเร่งความเร็วของมอเตอร์สูงขึ้นซึ่งเมื่อทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาด J_1 ให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้วสมการแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นดังนี้

$$T_m = (J_m + J_1) \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad (3.8)$$

3.4.3 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.3 รูปทรงของล้อช่วยแรงที่ใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

จากรูป สมการที่ใช้คำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงแสดงดังสมการ

$$J_1 = \frac{\pi}{2} \rho (r_2^4 - r_1^4) l \quad (3.9)$$

โดยที่ ρ = ความหนาแน่นของเนื้อสารที่ใช้ทำล้อช่วยแรง (kg/m^3)

r_1, r_2 = รัศมีภายในและภายนอกของล้อช่วยแรง (m)

l = ความหนาแน่นของล้อช่วยแรง (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด

วิธีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำได้โดยการให้ลัดช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่าหนึ่งมาทำการค้ำไว้ถึงเข้ากับเพลลาของมอเตอร์และวิธีการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดสามารถคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว ซึ่งสามารถหาสมการแรงบิดในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลงดังนี้

$$J_m \frac{d\omega_{r1}}{dt} + D\omega_{r1} = 0 \quad (3.10)$$

$$(J_m + J_1) \frac{d\omega_{r2}}{dt} + D\omega_{r2} = 0 \quad (3.11)$$

จากสมการที่ 3.10 และ 3.11 เมื่อทำการแก้สมการอนุพันธ์จะได้ผลเฉลยของสมการในรูปแบบ

$$\omega_{r1}(t) = \omega_0 e^{-\frac{D}{J_m} t} \quad (3.12)$$

$$\omega_{r2}(t) = \omega_0 e^{-\frac{D}{J_m + J_1} t} \quad (3.13)$$

โดยที่ ω_0 = ค่าความเร็วในการหน่วงความเร็ว (rad/s)

จากสมการที่ 3.10 และ 3.11 นำสมการทั้งสองมาทำการหาผลลัพท์ของสมการสองตัวแปรคือค่า J_m และค่า D โดยจัดรูปให้อยู่ในรูปเมตริกดังนี้

$$\begin{bmatrix} J_m \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d\omega_{r1}}{dt} & \omega_{r1} \\ \frac{d\omega_{r2}}{dt} & \omega_{r2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ -J_1 \frac{d\omega_{r2}}{dt} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

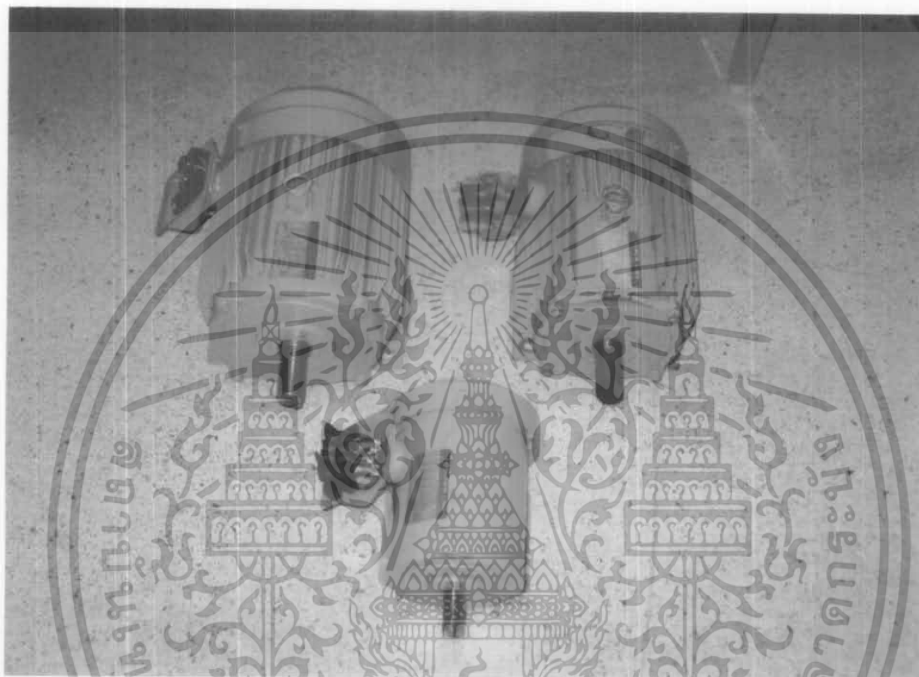
ในการคำนวณสมการที่ 3.14 ให้คำนวณที่ความเร็วพิกัด

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการทดสอบจะใช้ motor ทั้งหมด 3 ขนาดคือ 1,3,5 แรงม้าดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.1 มอเตอร์ขนาด 1,3 และ 5 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 พิกัดต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ

พิกัดกำลัง (HP)	พิกัดแรงดัน (V)	พิกัดกระแส (A)	พิกัดความเร็วรอบ (rpm)	พิกัดแรงบิด (N-m)
1	220/380	3.4/2.0	1420	5.0884
3	220/380	8.7/5.0	1420	15.0502
5	220/380	13.7/7.9	1420	25.0837

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 DC-Generator เป็นเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงประเภทหนึ่งโดย DC-Generator ที่นำมาใช้ทดสอบเป็นประเภทที่มีแปรงถ่านโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความเร็วรอบของมันแสดงดังสมการที่

$$V = K\omega \quad (4.1)$$

โดยที่ V = แรงดันเอาต์พุตของ DC-Generator
 K = ค่าคงที่การแปรผันระหว่างแรงดันและอัตราเร็วเชิงมุม
 ω = อัตราเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

จากการทดสอบ DC-Generator ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าคงที่การแปรผันประมาณ 0.0297 (v/(rad/s))



รูปที่ 4.2 DC-Generator ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ล้อช่วยแรง(Fly wheel)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยต่างกัน มีขนาดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและมวลของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ

ค่าโมเมนต์ความ เฉื่อย ของล้อช่วยแรง (Kg-m ²)	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง cm	มวล kg
0.0994	0.2687	10.7
0.5054	0.4018	24.7
1.0093	0.4778	35.1
1.5352	0.5288	43.5

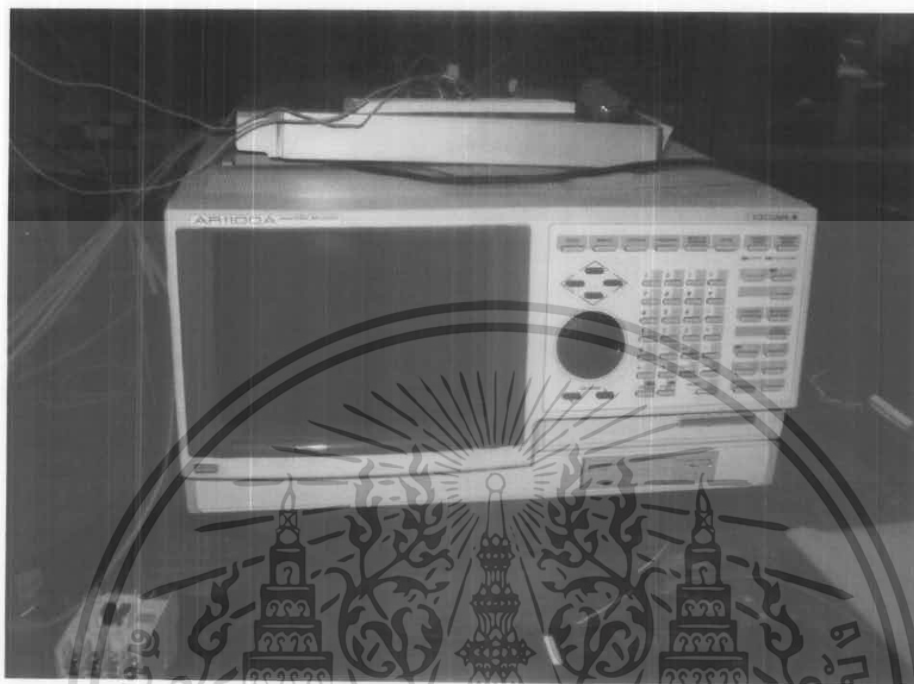


รูปที่ 4.3 ล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 Analyzing Recorder

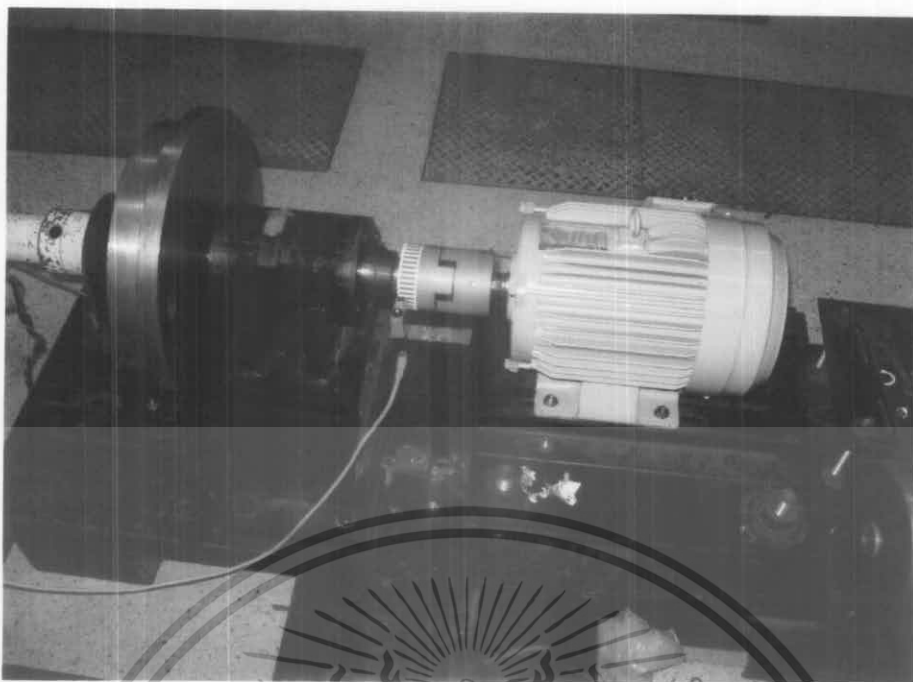
เป็นอุปกรณ์ ที่ใช้บันทึกข้อมูลแรงดัน กระแส ความเร็วรอบ และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ แต่ละครั้งรูปแบบของ analysis recorder แสดงดังรูป



รูปที่ 4.4 Analyzing Recorder

4.1.5 แทนสำหรับทดสอบมอเตอร์

เนื่องจากการทดสอบมอเตอร์ด้วยวิธีเร่งความเร็วรอบโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย มีโอกาสเกิดอันตรายสูง และการใช้ล้อช่วยแรงมาคัปปลิ่งกับเพลลาของ มอเตอร์โดยตรงเป็นไปได้ยาก ดังนั้นต้องมีแทนทดสอบเพื่อใช้เป็นจุดติดตั้งมอเตอร์ และชุดเพลลาที่ใช้สำหรับติดตั้งล้อช่วยแรง โดยปลายของชุดเพลลานี้จะคัปปลิ่งอยู่กับมอเตอร์เหนี่ยวนำและ DC-Generator ดังรูป



รูปที่ 4.5 แทนสำหรับทดสอบมอเตอร์

4.1.6 Photo Sensor

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร็วมอเตอร์ โดยข้อมูลที่ได้นั้นจะออกมาในรูปของพัลส์

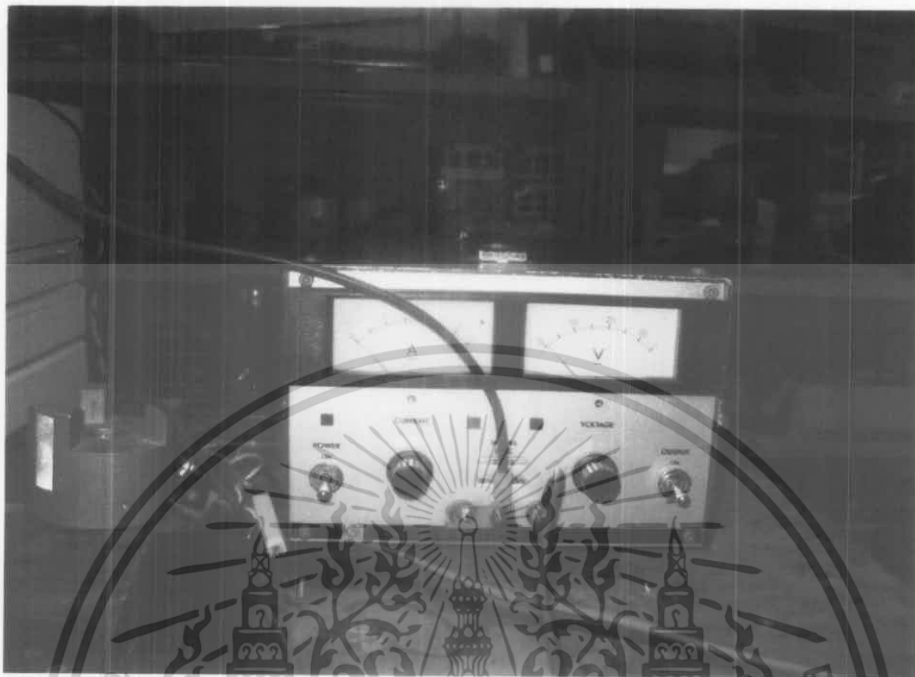


รูปที่ 4.6 โฟโตเซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 DC Power Supply

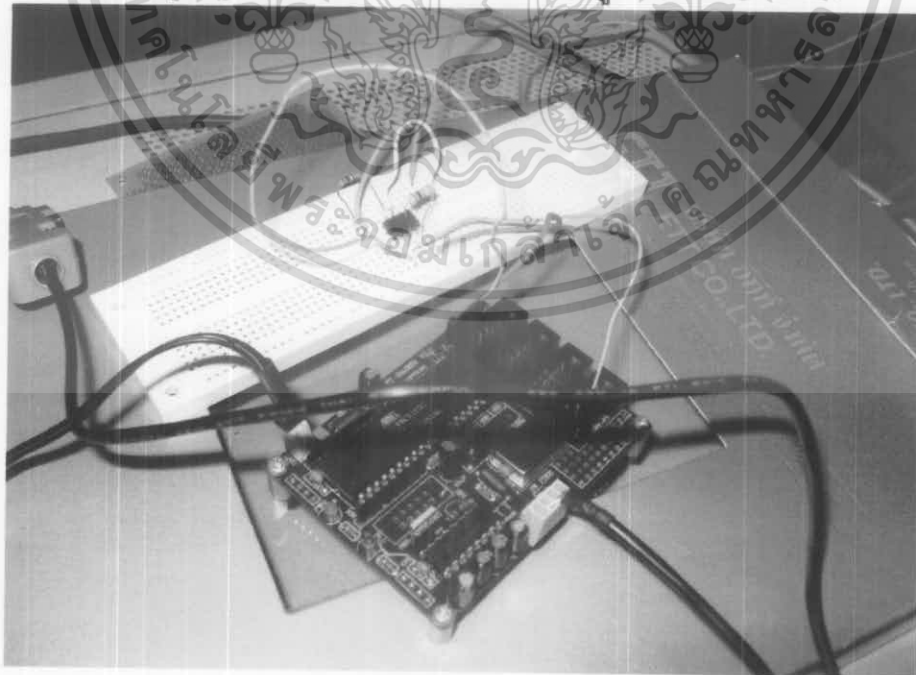
เป็นอุปกรณ์ที่มีไว้รับไฟฟ้ากระแสสลับ แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายไฟให้กับโฟโตเซ็นเซอร์ โดยความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับโฟโตเซ็นเซอร์นั้น จะมีขนาด 15 โวลต์



รูปที่ 4.7 DC Power Supply

4.1.8 Micro Controller

เป็นตัวส่งผ่านข้อมูลจากโฟโตเซ็นเซอร์ เพื่อส่งผ่านข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.8 Micro Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

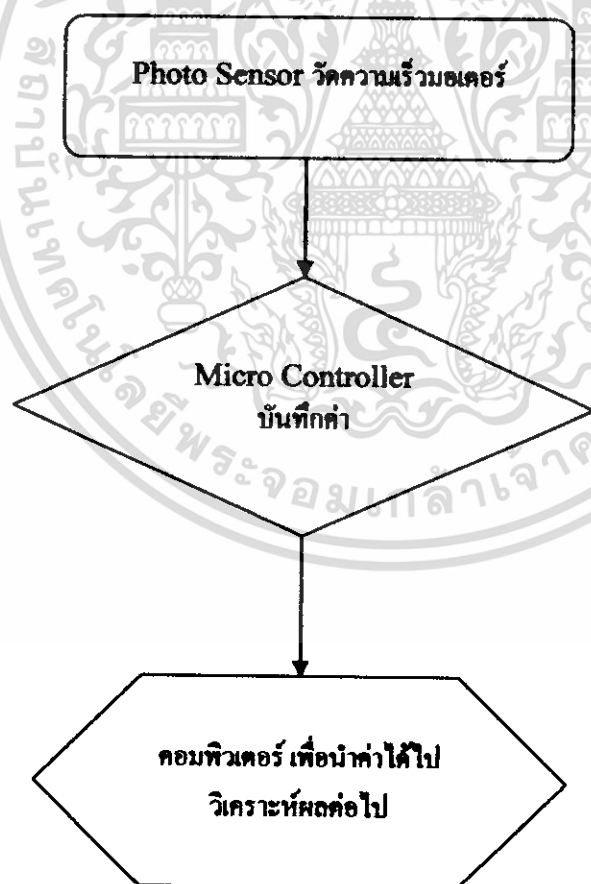
4.2 วิธีการทดสอบ

4.2.1 การทดสอบการวัดความเร็ว โดยใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์ (DC-Techogenerator)

ในการทดสอบเราทำการต่อมอเตอร์แบบ star โดยที่โรเตอร์ของมอเตอร์จะมีการใส่ล้อช่วยแรงขนาดต่าง ๆ ที่ โรเตอร์ของมอเตอร์ โดยผ่านชุดเพลา และต่อเข้ากับ DC-Techogenerator เพื่อวัดความเร็วรอบของโรเตอร์ โดยที่ DC-Techogenerator จัดวัดความเร็วรอบออกมาเป็นค่าแรงดัน โดยจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งคูณเข้าไปจะได้เป็น speed ของโรเตอร์ แล้วทำการบันทึกค่าแรงดัน ที่เวลาต่าง ๆ กันที่ได้จาก DC-Techogenerator เก็บไว้ใน Analyzing Recorder นำค่าที่ได้จาก Analyzing Recorder มาใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ จากโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่ากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้า

4.2.2 การทดสอบการเร่งความเร็วโดยการใช้โฟโต้เซ็นเซอร์

เนื่องจากการใช้ DC-Techogenerator ต้องมีการคลี่ปลีกับตัวเพลา จะมีข้อเสียทางกลส่งผลให้ประสิทธิภาพของการวัดน้อยกว่าอุปกรณ์ที่ไม่ต้องมีการคลี่ปลี และหากกับมอเตอร์ที่มีกำลังและความเร็วสูง อาจจะทำให้ DC-Techogenerator เสียหายได้



เทคนิคการวัดความเร็วจากโฟโต้เซ็นเซอร์

1. เราสามารถใช้เทคนิคในการวัดความเร็วรอบจาก โฟโต้เซ็นเซอร์ โดยเมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบก็จะมีแรงดันออกมา แต่ถ้าโรเตอร์ยังไม่หมุนครบ 1 รอบ แรงดันที่ออกจากโฟโต้เซ็นเซอร์จะมีค่าเป็น 0 โวลต์ เราทำการติดตั้ง เซ็นเซอร์ให้อยู่ในโหมด dark-on โดยเราจะนำแถบสีดำไปติดไว้ที่โรเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนครบ เจอแถบสีก็จะบันทึกผ่าน Micro controller

2. ใช้ Micro ET-BASE S1 V2 ในการส่งผ่านมายัง computer โดยใช้หลักการบันทึกทุก ๆ 0.5 ms หากเจอก็จะกำหนดให้เป็น 1 ไม่เจอเป็นในการคำนวณ เราจะนับทุก ๆ 500 จุด (จะใช้เวลา 0.25 วินาที)

ถ้าหาก micro นับ 1 ได้ 15 ครั้งภายใน 500 จุดแรก ในเวลา 0.25 sec จะหา ω จาก

$$\omega = \frac{2\pi \times n}{t} = \frac{\omega}{t} \quad (4.2)$$

$$\omega = \frac{2\pi \times (15)}{0.25} = 376.99 \text{ rad / sec}$$

โดยที่ $n =$ จำนวนครั้งที่เจอ (ครั้ง)
 $\omega =$ ความเร็วเชิงมุม (rad / sec)

4.2.3 การทดสอบหาจรรยาสมมุทธ์ของมอเตอร์

4.2.3.1. การทดสอบภาระของมอเตอร์ (Load Test)

ในการทดสอบภาระของมอเตอร์ทำการทดสอบโดยการใส่ภาระให้แก่มอเตอร์ โดยใช้ตาชั่งสปริง ต่อเชือกไปพันที่มอเตอร์แล้วถ่วงน้ำหนัก ขณะมอเตอร์หมุนก็จะทำให้น้ำหนักเบาขึ้น ในการคำนวณหาแรงบิด

$$T = (w_1 - w_2) \times g \times r \quad (4.3)$$

โดยที่ $T =$ แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)

$w_1 =$ มวลของภาระที่ทดสอบ (kg)

$w_2 =$ ค่าแรงที่อ่านได้จากตาชั่ง (Kg)

$r =$ รัศมีของมู่เล่ (m)

$g =$ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกมีค่าเท่ากับ $9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

4.2.3.2 บล็อกโรเตอร์(Locked rotor test)

ในการทดสอบบล็อกโรเตอร์สำหรับงานวิจัยนี้ต้องทำการล็อกโรเตอร์ที่แรงดันพิกัดโดยสมการที่ใช้เป็นดังนี้

$$T_m = F_m \times L = (T_1 \times L) - (w \times L_2)$$

โดยที่ T_m = ค่าแรงบิดที่สภาวะล็อกโรเตอร์(N-m)

F_m = แรงเนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์(N)

T_1 = ค่าแรงดึงเชือกที่ย่านได้จากตาชั่งสปริง(N)

w = น้ำหนักของแขนของแรง(N)

L = ระยะจากศูนย์กลางของมอเตอร์ถึงตำแหน่งของตาชั่งสปริง(m)

L_2 = ระยะจากศูนย์กลางของมอเตอร์ถึงจุดศูนย์ถ่วงของแขนของแรง(m)

4.2.4 การทดสอบเพื่อยืนยันการทดสอบ

นำค่าแรงบิดที่สภาวะล็อกโรเตอร์และค่าแรงบิดที่ความเร็วพิกัดกับความเร็วใกล้เคียงมาเปรียบเทียบกับกราฟแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลอง

4.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบด้วยวิธีห้วงความเร็วจะได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของระบบทดสอบดังนี้

ขนาดของมอเตอร์	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ (Kg-m ²)	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด (Nm/(rad/s))
(Hp)	J_m	D
1	0.0028	0.0042
3	0.0056	0.0042
5	0.0101	0.0053

ตารางที่ 4.3 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของระบบทดสอบที่ได้จากการทดสอบห้วงความเร็ว (อ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ของพิวราชาติ แซ่กกักหน้า 49) เมื่อแทนด้วยสมการ

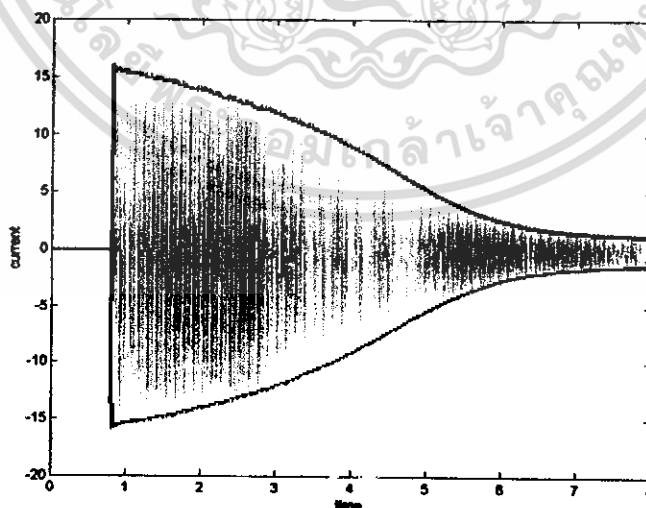
$$\text{Torque} = (J_m + J_{ext}) \frac{dw}{dt} + Dw \quad (4.4)$$

J_{ext} = ค่า J จากโมเมนต์ความเฉื่อยภายนอกคิดจากล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ

4.3.1 ทดสอบเร่งความเร็วโดยการวัดความเร็วรอบจากเทคโนโลยีเครื่องกำเนิด (DC-Generator)

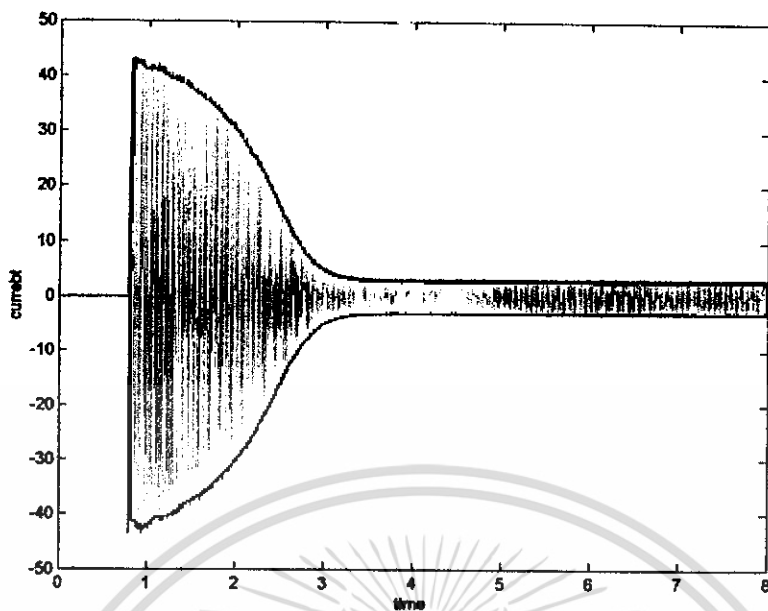
4.3.1.1 กราฟคลื่นกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดต่าง ๆ ในช่วงนี้มอเตอร์

สตาร์ท

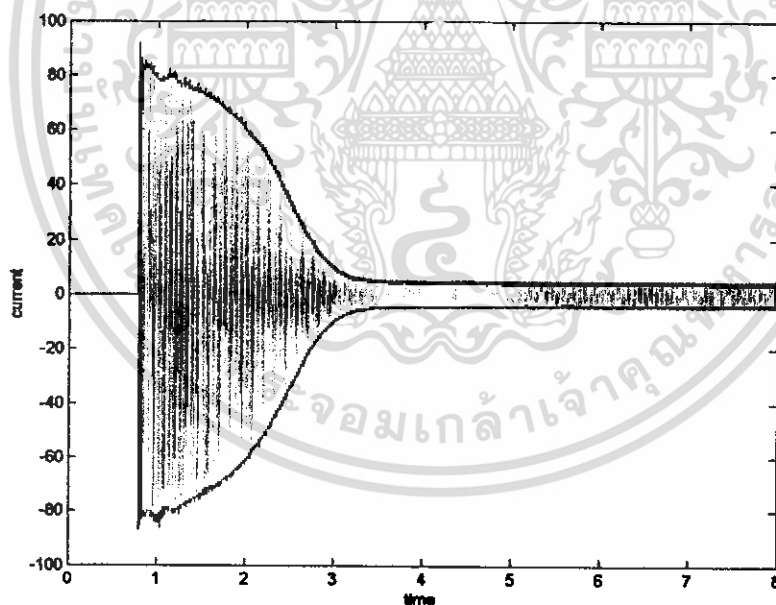


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์กับกระแสระหว่างกระแสกับเวลา ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า
ที่ได้จากการทดสอบ

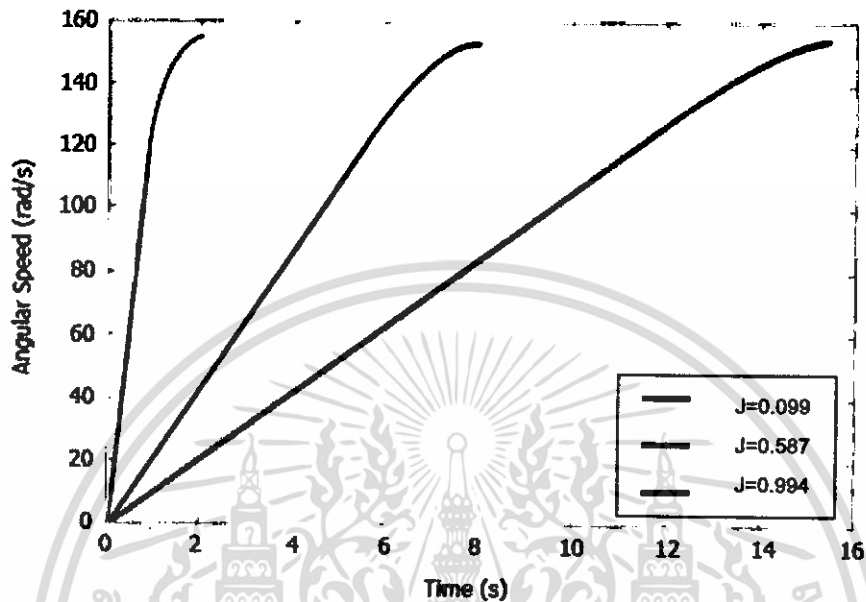


รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า
ที่ได้จากการทดสอบ

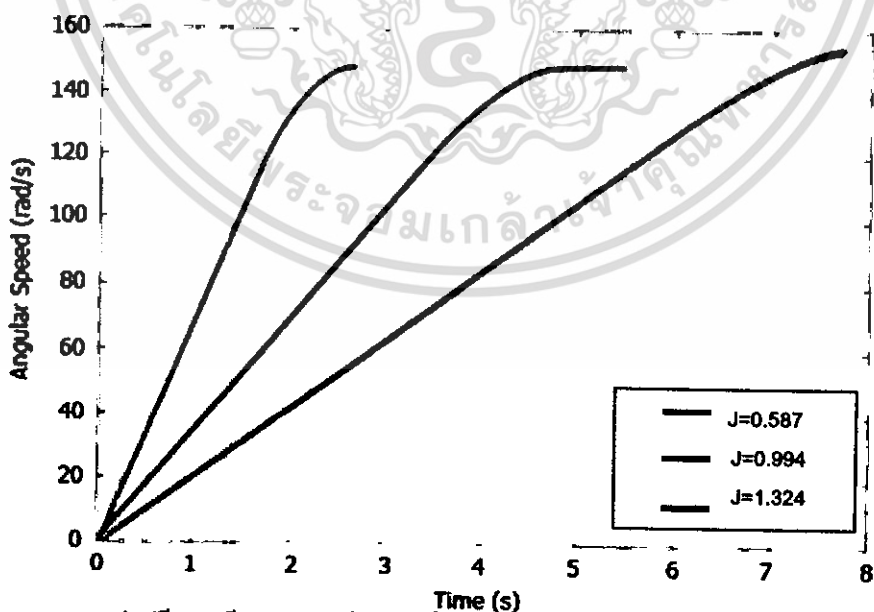
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า กราฟนี้จะมี 2 ช่วง โดยช่วงแรกกระแสจะสูงสุดและลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่ง
กระแสคงที่ในสภาวะคงตัว (Steady state)

4.3.1.2 กราฟผลของความเร็วยกกับเวลา เมื่อมีการเพิ่มล้อย่างแรง มีขนาดต่างกัน

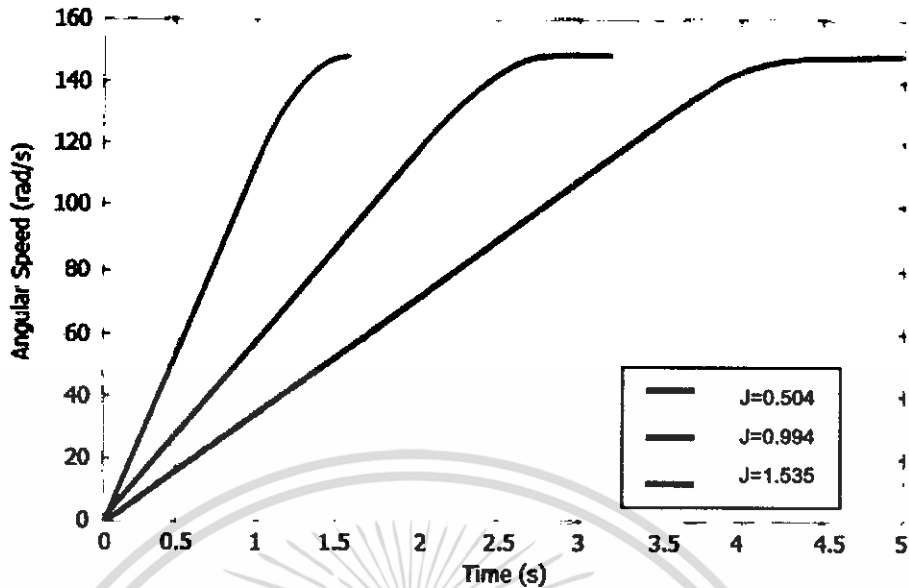


รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา ของมอเตอร์
เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อย่างแรงขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา ของมอเตอร์
เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อย่างแรงขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

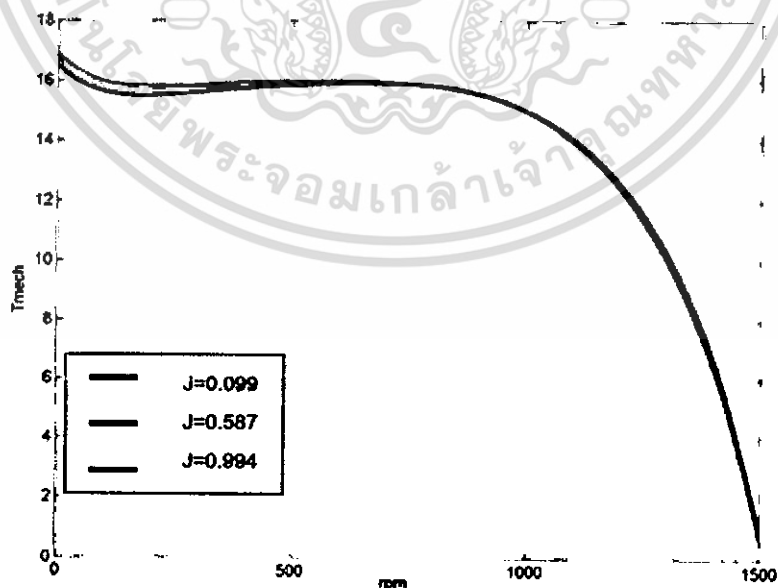


รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วงแรงขนาดต่างๆ

จากการทำให้ไฟโต้เซ็นเซอร์วัดความเร็ว กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา พบว่าเมื่อความเร็วเข้าใกล้ 1500 rpm จะเป็นเวลาเดียวกับที่กระแสเข้าสู่สภาวะคงที่ และเมื่อนำล้อช่วงแรงต่อกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะพบว่าระยะเวลาในการสตาร์ทจะมากออกไปด้วย

4.3.1.3 กราฟผลของแรงบิดเทียบกับความเร็วรอบเมื่อมีล้อช่วยแรงขนาด

ต่างกัน

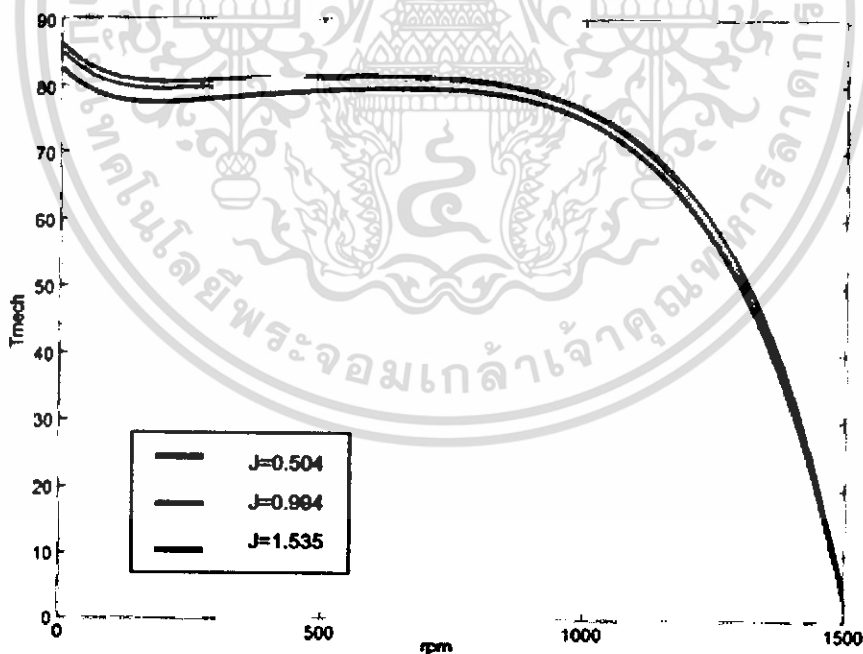


รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วงแรงขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์
เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วงแรงขนาดต่างๆ



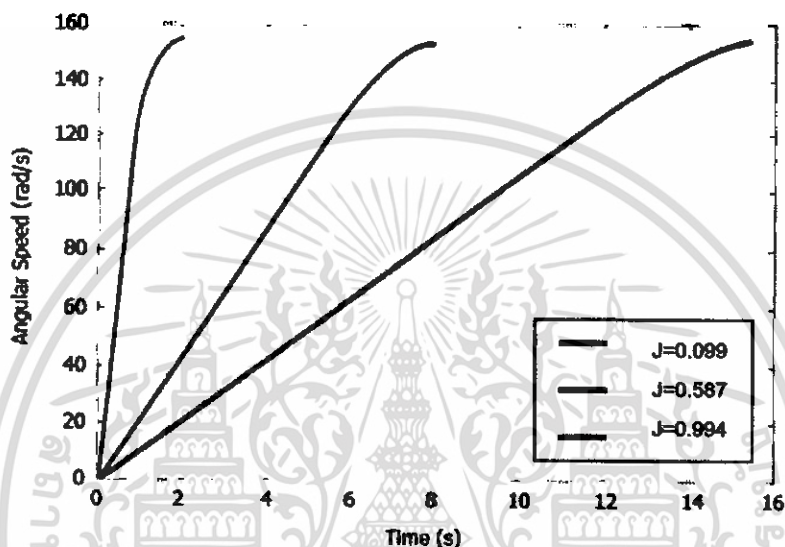
รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์
เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วงแรงขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

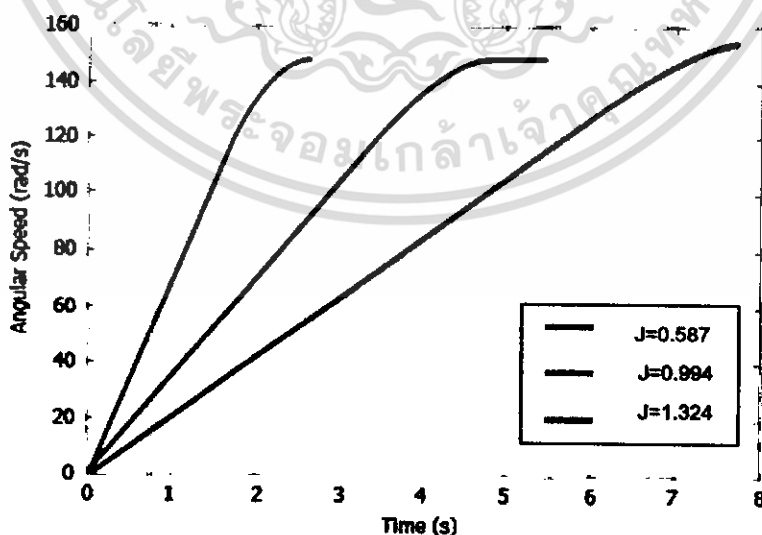
จากการทดสอบโดยใช้เทคโคเจนเนอเรเตอร์ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์ขนาดต่างๆแล้ว พบว่าล้อยช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ต่างกัน กราฟแรงบิด-ความเร็วรอบจะไม่ค่าความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยไม่มีผลต่อแรงบิด

4.3.2 ทดสอบเร่งความเร็วโดยการวัดความเร็วรอบจากโฟโต้เซ็นเซอร์

4.3.2.1 กราฟผลของความเร็วเทียบกับเวลา เมื่อมีโมเมนต์ภายนอกมีขนาดต่างกัน

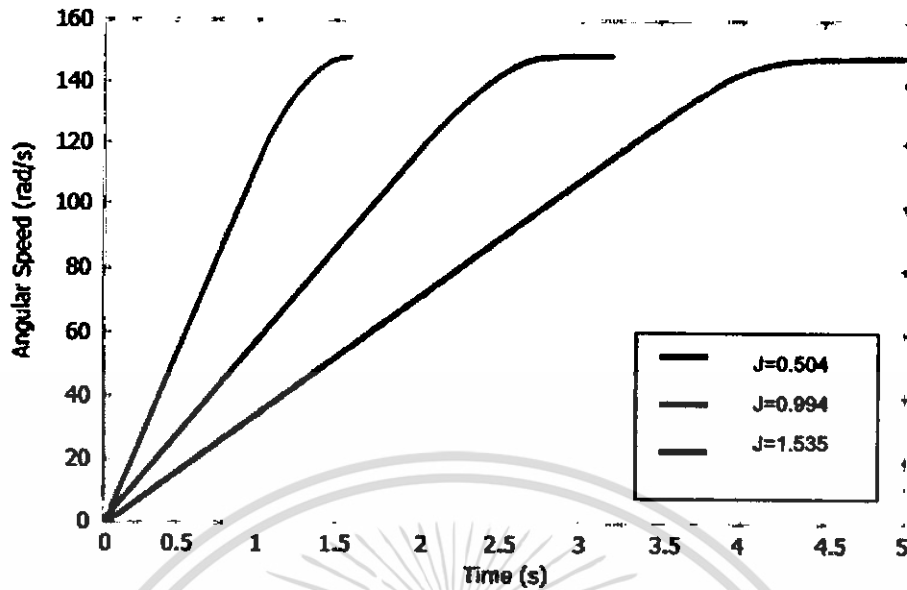


รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ต่อกับล้อยช่วยแรงขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาดต่างๆ

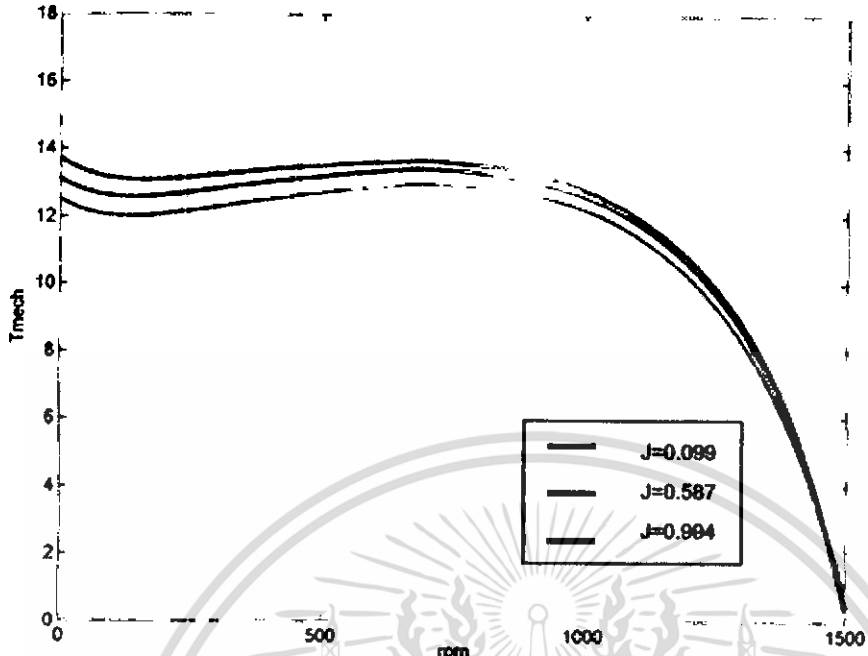
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



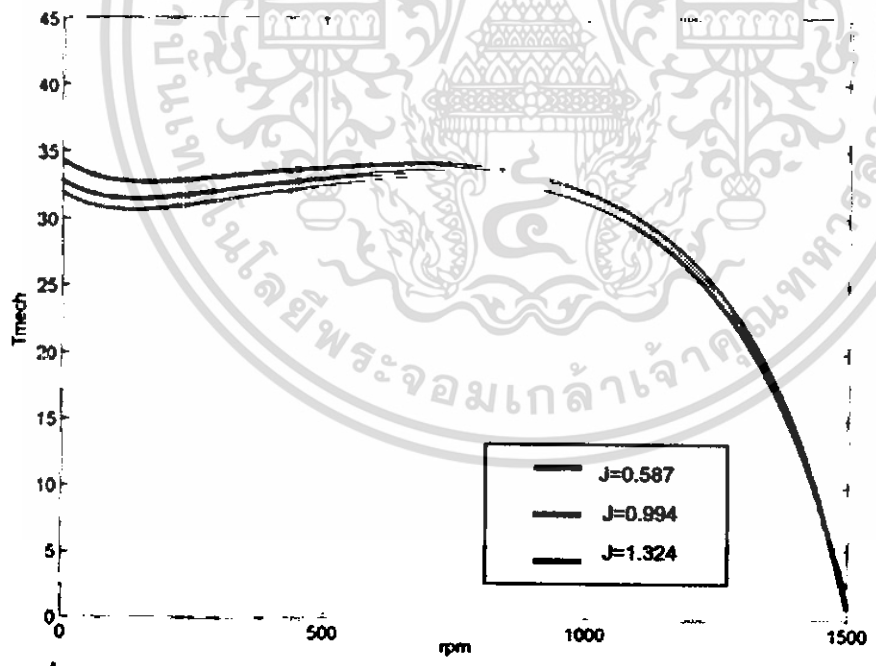
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาดต่างๆ

จากการใช้โฟโตเซ็นเซอร์วัดความเร็ว กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา พบว่าเมื่อความเร็วเข้าใกล้ 1500 rpm จะเป็นเวลาเดียวกับที่กระแสเข้าสู่สภาวะคงที่ และเมื่อนำล้อช่วยแรงต่อกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะพบว่าระยะเวลาในการสตาร์ทจะมากออกไปด้วย เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการวัดความเร็วโดยเทคโนโลยีเซนเซอร์

4.3.2.2 กราฟผลของแรงบิดเทียบกับความเร็วรอบเมื่อมีโมเมนต์ภายนอกมีขนาดต่างกัน

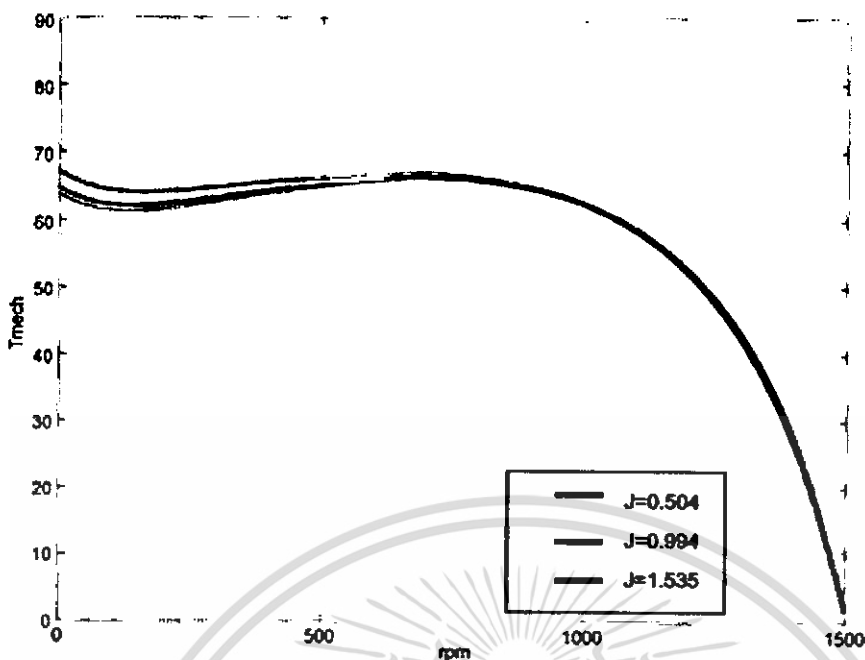


รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วงแรงขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วงแรงขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วยรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อย่างแรงขนาดต่างๆ

จากการทดสอบโดยใช้ไฟโต้เซ็นเซอร์ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์ขนาดต่างๆแล้ว พบว่าล้อย่างแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ต่างกัน กราฟแรงบิดความเร็วรอบจะไม่ค่าความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยไม่มีผลต่อแรงบิดเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการทดสอบโดยใช้เทคโคเจนเนอเรเตอร์

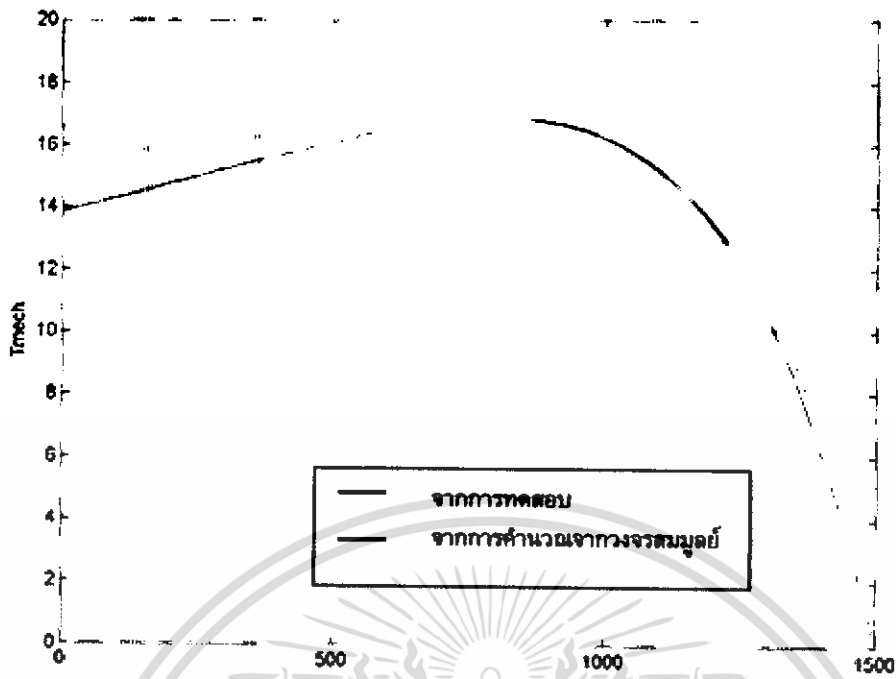
4.3.3 การทดสอบของวงจรสมมูลย์

พารามิเตอร์(ohm)	1HP	3HP	5HP
R1	10.5	3.78	2.054
X1	9.8056	3.8575	2.0896
R2	10.1322	3.2899	1.9645
X2	9.8056	3.8575	2.0896
Rc	2366.2	625	400
Xm	216.6351	81.1024	55.2515

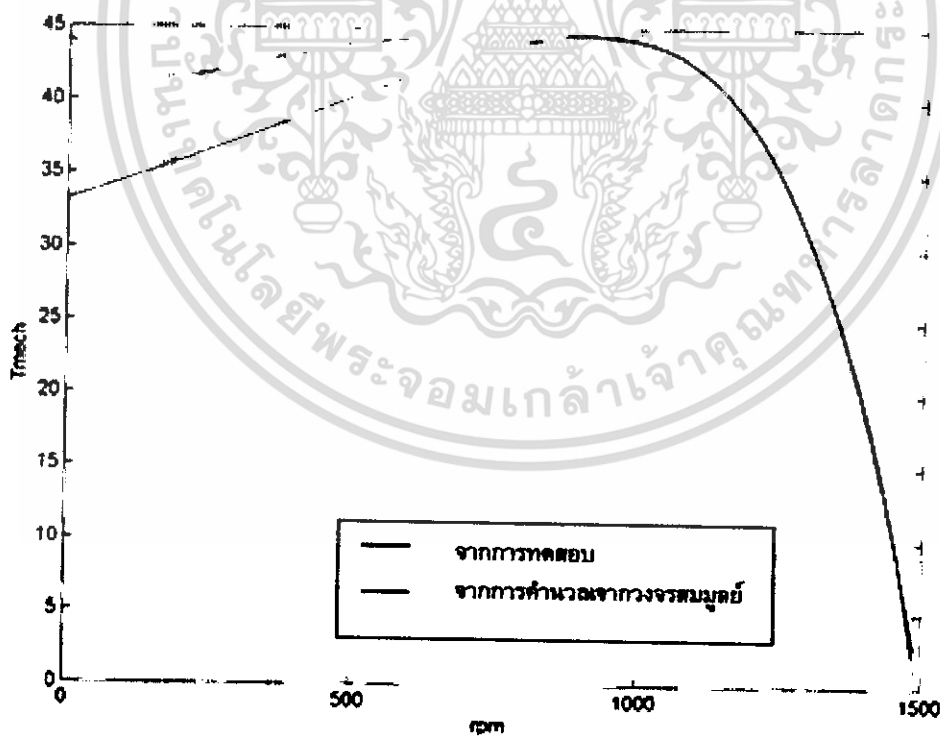
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ ของมอเตอร์แต่ละขนาด

จากผลการทดสอบจะได้กราฟแรงบิด-ความเร็วรอบเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการทดสอบแล้วจะเห็นว่าในช่วงแรกจะมีความแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

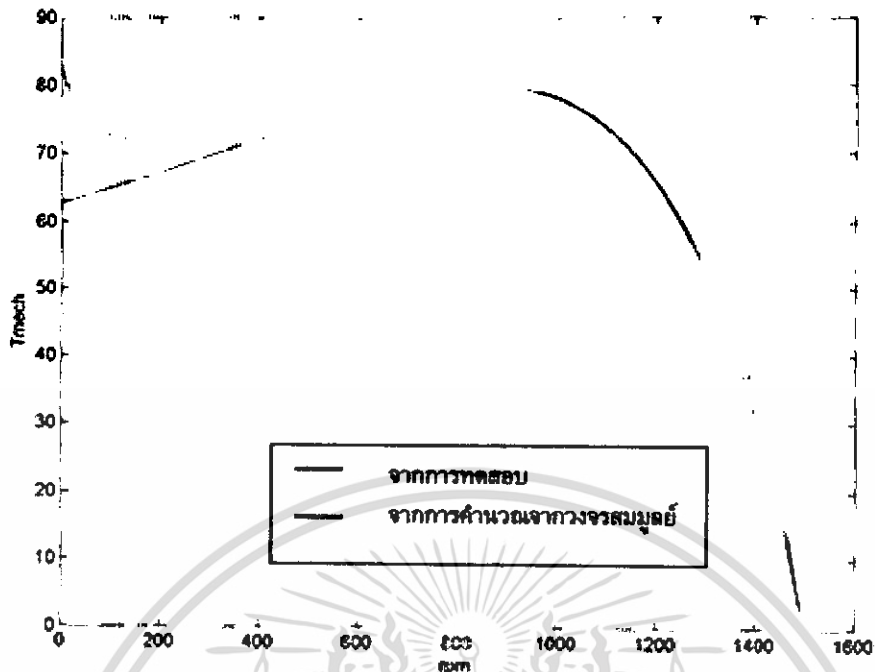


รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์
เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมูลย์



รูปที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์
เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมูลย์

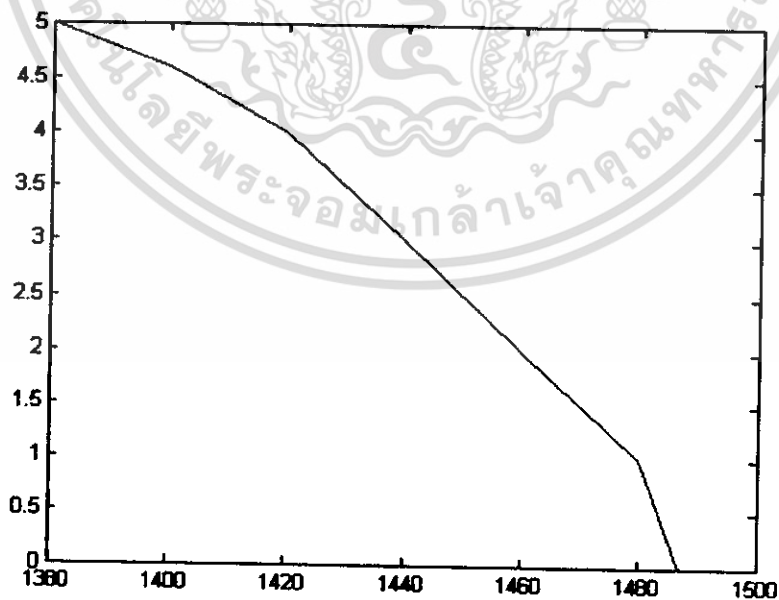
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์
เหนียวนาขนาด 5 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรมูลย

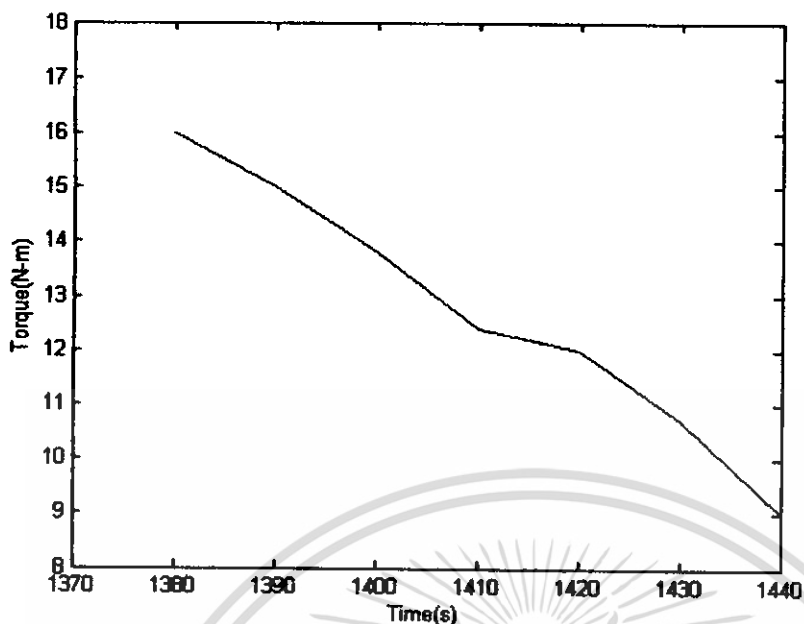
4.3.4 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

จากการทดสอบภาระ(Load test)จะได้ค่าออกมาดังนี้



รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์
เหนียวนาขนาด 1 แรงม้าจากการทดสอบภาระ

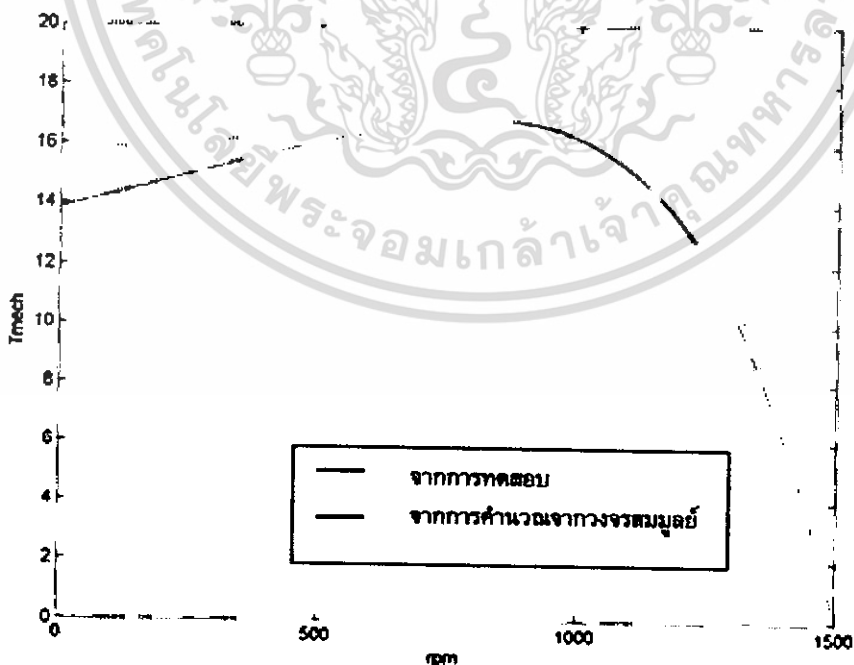
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าจากการทดสอบภาระ

หากนำค่าที่ได้จากการทดสอบภาระไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง คาสที่ได้จากไฟโต้ เซ็นเซอร์มีความใกล้เคียงกว่าค่าที่ได้จาก ดีซี เทคโคเจเนเรเตอร์

การทดสอบหาจรรยาสมมุทธ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า

ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากจรรยาสมมุทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่ากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบจากการทดสอบมีค่ามากกว่าจากวงจรสมมุติ ในช่วงขณะสตาร์ท เมื่อความเร็วรอบ (Nr) ต่ำๆ และจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อความเร็วของโรเตอร์เข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส ซึ่งเป็นผลมาจากมอเตอร์ ขณะสตาร์ทที่ความถี่ต่ำ (2-3 Hz) จะทำให้กระแสที่ไหลใน deep bar ของโรเตอร์ไม่เท่ากัน เกิดผลของ leakage inductance ใน deep bar ของโรเตอร์ เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คล้ายๆ ผลของ skin effect ถ้าให้ความต้านทานของโรเตอร์มีค่าสูงมาก ($R \gg X$) ขณะสตาร์ทมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงสูงขึ้นจากความสัมพันธ์

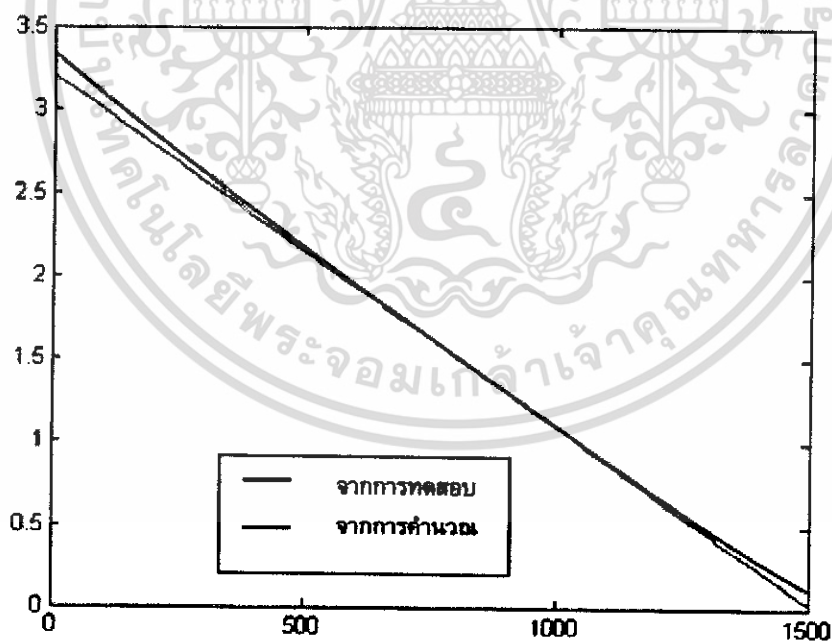
$$P \propto R$$

$$P = T\omega$$

เมื่อกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น ค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสูงขึ้นด้วย

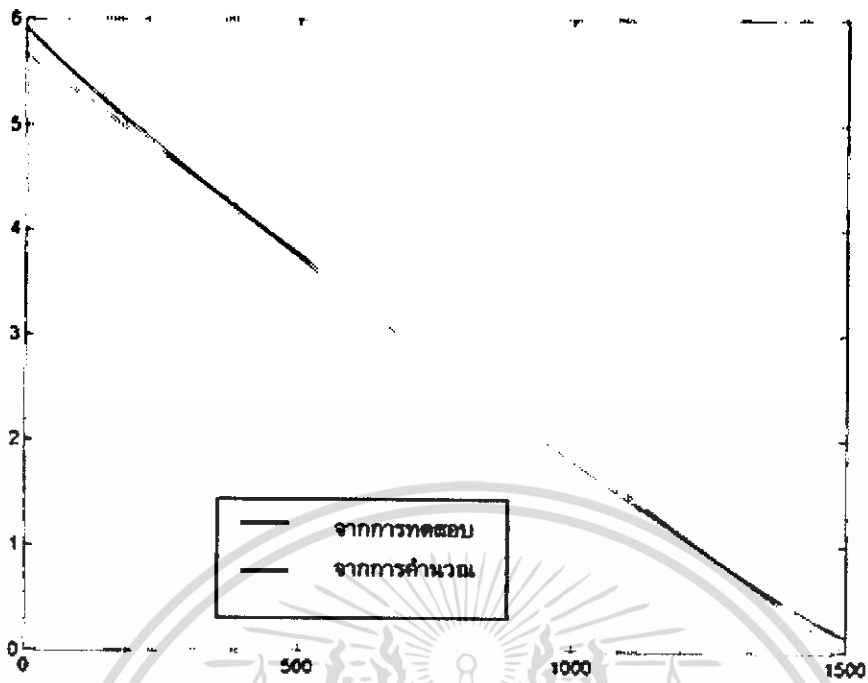
ผลของกระแสที่ไหลไม่เท่ากันใน deep bar ของโรเตอร์ทำให้กราฟแรงบิด-ความเร็วรอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะความเร็วรอบต่ำๆ จากการทดสอบ สูงกว่ากราฟแรงบิด-ความเร็วรอบ ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากวงจรสมมุติ ซึ่งความแตกต่างกันของกราฟคุณลักษณะที่สามารถนำมาเขียนได้เป็นดังนี้

กราฟความแตกต่างกันของแรงบิดของการทดสอบกับแรงบิดจากวงจรสมมุติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

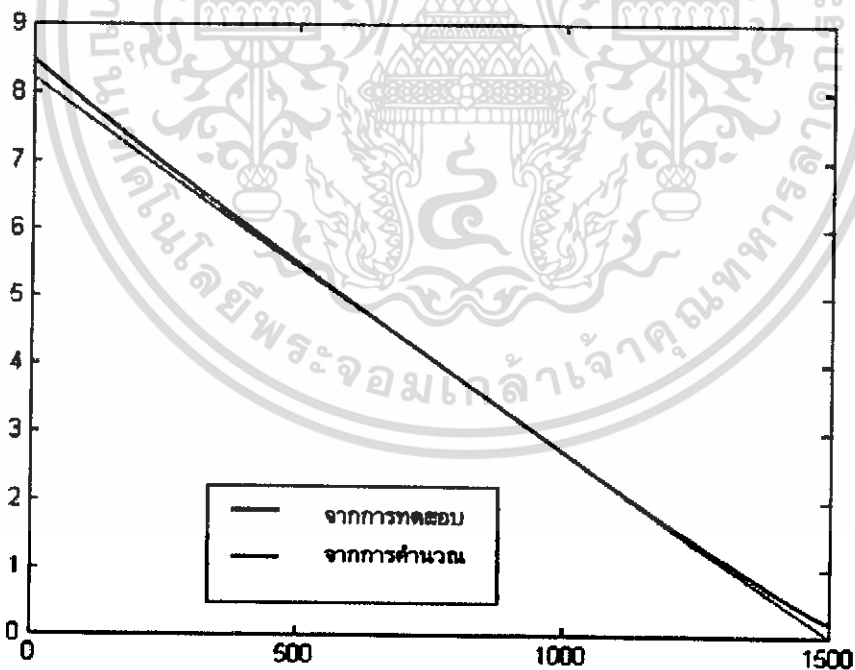


รูปที่ 4.30 กราฟระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบที่แรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (1 แรงม้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 กราฟระหว่างแรงบิด-เร็วรอบที่แรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (3 แรงม้า)



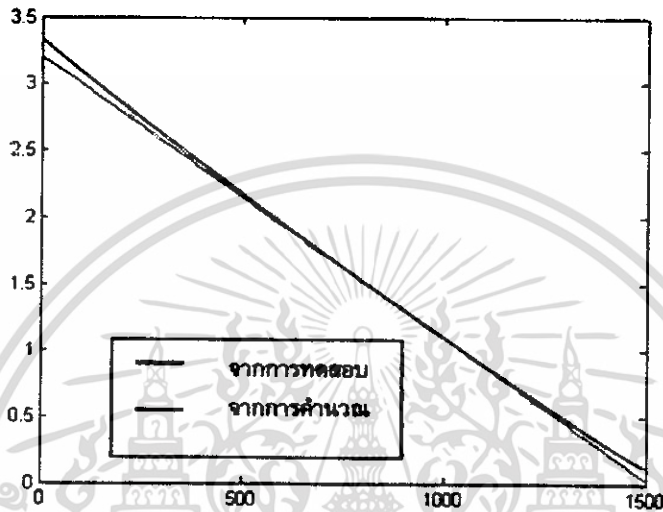
รูปที่ 4.32 กราฟระหว่างแรงบิด-เร็วรอบที่แรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (5 แรงม้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

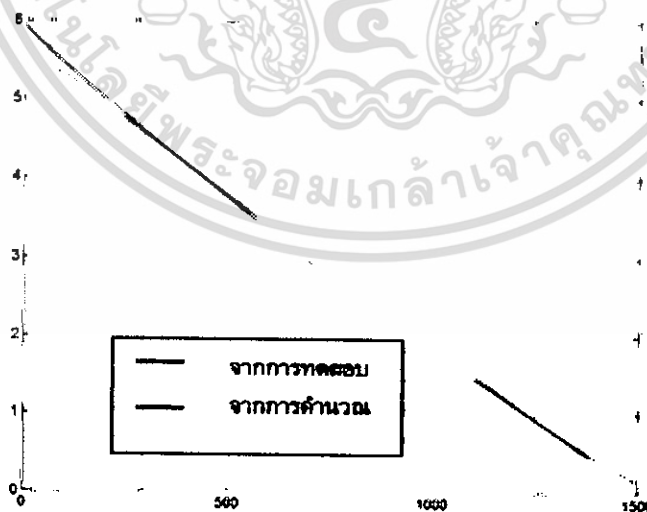
จาก

$$T = \frac{3I^2 R}{S\omega}$$

ทำการทดลองในโปรแกรม MATLAB สุ่มค่า R ที่มีความแตกต่างกัน โดยใช้ค่า R ที่มีค่า มากๆ นำมาพล็อตกราฟระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สำหรับ มอเตอร์ขนาด 1 Hp ค่ากราฟแรงบิดและความเร็วรอบจากการทดลองสุ่มค่า R จะมีค่าใกล้เคียงกับ กราฟความแตกต่างระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบจากการทดสอบกับวงจรสมมูลที่ค่า $R=310$

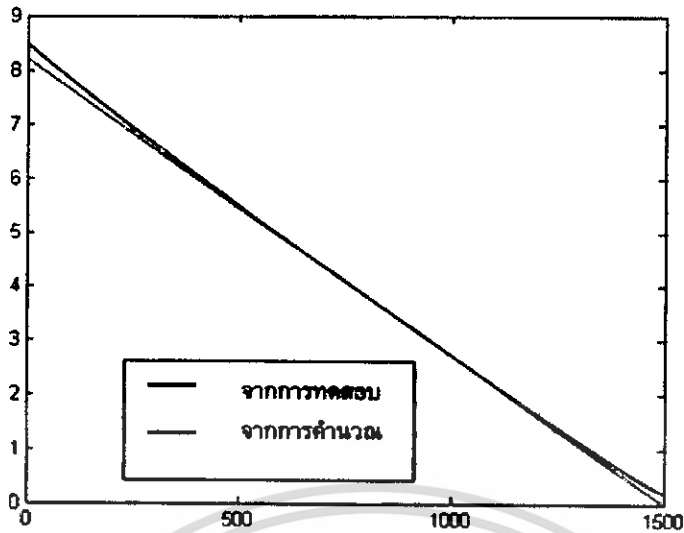


รูปที่ 4.33 กราฟระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบที่แตกต่างกันของแรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิด จากวงจรสมมูลย์เปรียบเทียบกับกราฟแรงบิดจากการสุ่มค่า R ของมอเตอร์ขนาด 1 Hp ที่ค่า $R=310$



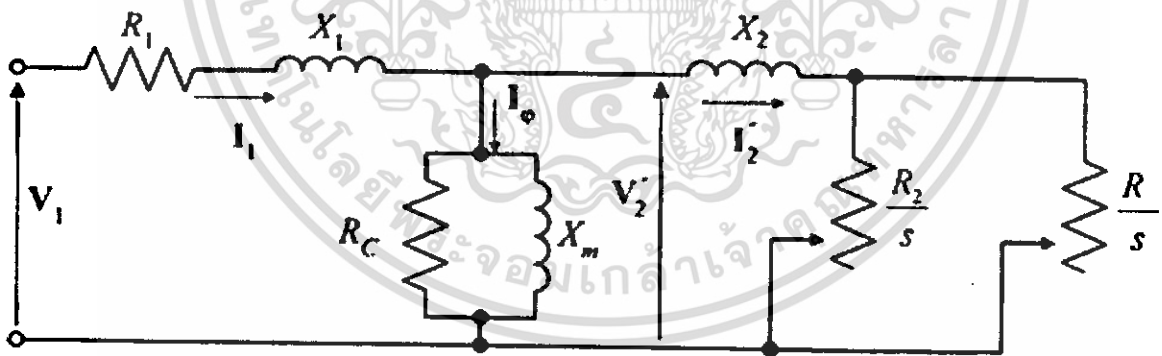
รูปที่ 4.34 กราฟระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบที่แตกต่างกันของแรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิด จากวงจรสมมูลย์เปรียบเทียบกับกราฟแรงบิดจากการสุ่มค่า R ของมอเตอร์ขนาด 3 Hp ที่ค่า $R=140$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กราฟระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบที่แตกต่างกันของแรงบิดจากการทดสอบกับแรงบิดจากวงจรสมมูลย์เปรียบเทียบกับกราฟแรงบิดจากการสุ่มค่า R ของมอเตอร์ขนาด 5 HP ที่ค่า $R = 100$

ดังนั้นวงจรสมมูลย์ขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ



รูปที่ 4.36 วงจรสมมูลย์ขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

ในการทดสอบทางจรรยาบรรณนั้น เราจะใช้วิธีการทดสอบสองวิธีคือ วิธีทดสอบในสภาวะไร้ภาระ (No-load test) ใช้หาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการสตาร์ทมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่ไม่ต่อภาระ เพื่อหาค่า R_2 และ X_2 จากวงจรรวมมูลย์ และวิธีทดสอบบล็อกโรเตอร์ (Block Rotor test) ใช้ทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ค่า R_c และ X_m

การทดสอบหากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้วิธีเพิ่มล้อยช่วยแรง หรือ วิธีเร่งความเร็วรอบ การทดสอบนี้จะได้กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบขณะสตาร์ทมอเตอร์ โดยจะวัดความเร็วได้สองวิธี คือใช้ โฟโต้เซ็นเซอร์ และเทคโคเจนเนอเรเตอร์ โดยการทดสอบด้วยเทคโคเจนเนอเรเตอร์ จะมีความซับซ้อนกว่าใช้ โฟโต้เซ็นเซอร์ เพราะต้องมีการคลี่ปลีกับมอเตอร์บนแท่นทดสอบ และต้องมีการต่อโรเตอร์เข้ากับแท่นวัดความเร็วซึ่งจะมีความยากกว่าโฟโต้เซ็นเซอร์ เพราะจะมีการคลี่ปลีกับมอเตอร์ โดยตรงทำให้ประสิทธิภาพในการวัดลดลง และเป็นผลเสียกับตัวคลี่ปลีได้

เพื่อทำการเปรียบเทียบกราฟแรงบิด-ความเร็วรอบ กับล้อยช่วยแรงขนาดต่างๆ โดยใช้วิธีวัดความเร็วจากเทคโคเจนเนอเรเตอร์และโฟโต้เซ็นเซอร์ จะมีความคล้ายคลึงกันตรงที่ล้อยช่วยแรงขนาดต่างๆ จะไม่มีผลกับแรงบิดของมอเตอร์ขนาดต่างๆ มากนัก กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบจึงยังมีคุณลักษณะเหมือนเดิม แต่อาจจะเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย แต่การเปลี่ยนล้อยช่วยแรง จะมีผลกับกราฟของ ความเร็วกับเวลามากกว่า ถ้าใช้ล้อยช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำๆ มอเตอร์จะใช้เวลาในการสตาร์ทจนถึงความเร็วพิกัดสั้น แต่ถ้าหากล้อยช่วยแรงมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสูง แล้วมอเตอร์จะใช้เวลาในการสตาร์ทนานกว่า

การทดลองเปรียบเทียบระหว่างการใช้โฟโต้เซ็นเซอร์ กับ เทคโคเจนเนอเรเตอร์ โดยใช้กราฟแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากล้อยช่วยแรงขนาดเดียวกัน พบว่า การใช้โฟโต้เซ็นเซอร์จะมีค่ากราฟแรงบิดความเร็วรอบที่มีค่าใกล้เคียงกับวงจรรวมมูลย์มากกว่าเทคโคเจนเนอเรเตอร์ เนื่องจากที่ไม่ต้องคลี่ปลีมอเตอร์กับแท่นจึงมีประสิทธิภาพในการวัดน้อยกว่า

การทดสอบเพื่อตรวจสอบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบว่าจะถูกต้องหรือไม่ ทำได้โดยวิธีการทดสอบในสภาวะมีภาระ (Load-test) เพื่อหาค่าความเร็ว ขณะแรงบิดที่พิกัดต่างๆ และการทดสอบโดยล้อยโรเตอร์ (Lock-Rotor test) เพื่อหาค่าแรงบิดสตาร์ท โดยนำค่าที่ได้ไปตรวจสอบกับผลทดสอบที่วัดได้จากวิธีการใช้เทคโคเจนเนอเรเตอร์ และโฟโต้เซ็นเซอร์ แล้วพบว่ากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้ถูกต้องตรงกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEE Standard 112-1996, IEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.
- [2] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, Stephen D. Umans. **Electric Machinery**. 5th Edition. London : McGraw Hill. 1992.
- [3] วรชาติ แซ่กกัก, พิษิต ล้ายอง. “เทคนิคในการหาคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2544. หน้า 122-127.
- [4] วรชาติ แซ่กกัก, พิษิต ล้ายอง. “การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยวิธีการเร่งความเร็ว” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24), สจล.22-23 พฤษภาคม 2544 หน้า 199-204
- [5] วรชาติ แซ่กกัก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต “เทคนิคในการหาคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. โมเมนต์ความเฉื่อย

นิยามของโมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia (J)) ของวัตถุแข็งเกร็งรอบแกนคือ ผลรวมของผลคูณของมวลอนุภาค (m_i) กับกำลังสองของระยะที่อนุภาคอยู่ห่างจากแกนหมุน (R_i^2) แสดงดังสมการที่ 1

$$J = \sum_{i=1}^n m_i R_i^2 \quad (1)$$

เนื่องจากวัตถุแข็งเกร็งประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมาก หากวัตถุแข็งเกร็งมีความหนาแน่น ρ เมื่อปริมาตรน้อยยิ่ง (infinitesimal volume (dV)) จะมีมวลน้อยยิ่ง (infinitesimal mass (dm)) จะได้ดังสมการที่ 2

$$dm = \rho dV \quad (2)$$

1.1 ทฤษฎีบทแกนขนาน

ทฤษฎีบทแกนขนานมีเนื้อหา ดังนี้ โมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นวัตถุรอบแกนที่ตั้งฉากกับแผ่นวัตถุและจุดตั้งบนแผ่นวัตถุ (J) เท่ากับผลบวกของโมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นวัตถุรอบแกนที่ตั้งฉากและเส้นผ่านศูนย์กลางมวลของแผ่นวัตถุ (J_{cm}) กับโมเมนต์ความเฉื่อยของศูนย์กลางมวลรอบแกนที่ตั้งฉากและผ่านจุดตั้ง (o) บนแผ่นวัตถุดังกล่าว (Md^2)

จากทฤษฎีบทนี้จะกล่าวได้ว่า โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนหนึ่ง (J_0) เท่ากับผลบวกของโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนที่ขนานกับแกนนั้นและเส้นผ่านศูนย์กลางมวล (I_{cm}) กับผลคูณของมวลวัตถุกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างแกนทั้งสองนั้น (Md^2) โดยสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ตามสมการที่ 3

$$J_x = J_{cm} + Md^2 \quad (3)$$

1.2 รัศมีไจเรชั่น

รัศมีไจเรชั่น (radius of gyration, k) เป็นค่าสมมติของระยะทางจากตำแหน่งที่คิดว่ามวลทั้งหมดรวมกันอยู่ที่ถึงแกนหมุน โดยรัศมีไจเรชั่นเป็นดังสมการที่ 4

$$k = \left(\frac{J}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \text{ หรือ } J = Mk^2 \quad (4)$$

1.3 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรูปทรงกระบอกกลวง

ค่ากำลังสองของรัศมีไจเรชั่นของวัตถุทรงกระบอกคือ $\frac{R_1^2 + R_2^2}{2}$ ดังนั้นโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกกลวงที่ผ่านจุดศูนย์กลาง (C) และตั้งฉากกับระนาบของวงแหวนเป็นไปตามสมการที่ 5

$$J = J_{CM} M \frac{R_1^2 + R_2^2}{2} \quad (5)$$

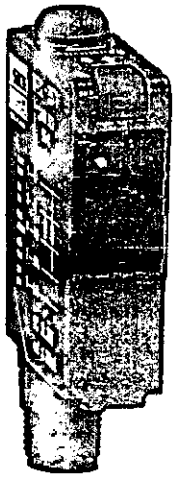
จากทฤษฎีบทแกนขนานจะได้โมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกกลวงรอบแกนที่ขอบและขนานกับแกน เป็นดังสมการที่ 6

$$J_0 = J_{CM} + MR^2 = M \frac{R_1^2 + R_2^2}{2} + MR^2 \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Scanning Distance

13.5 mm

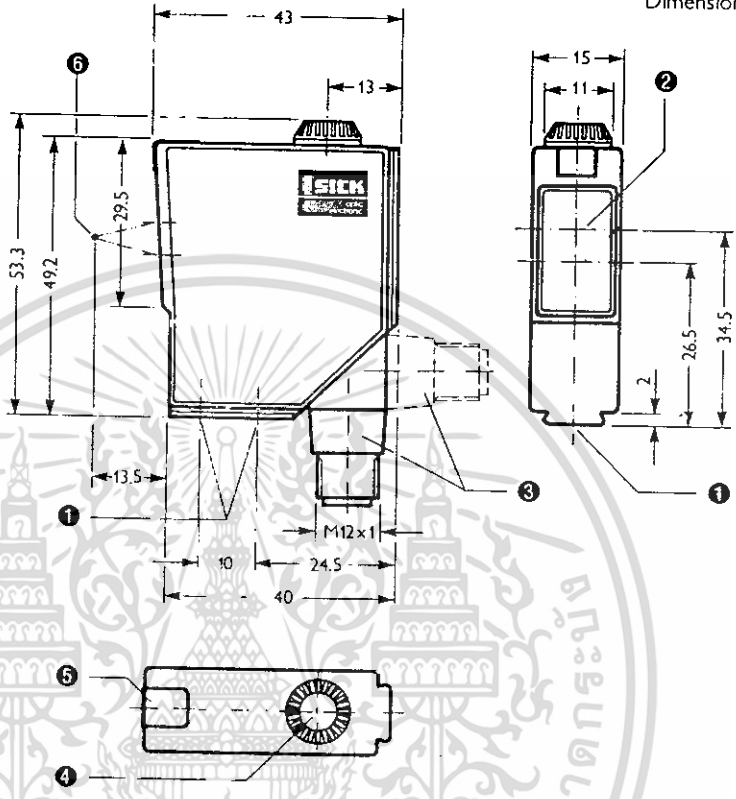


Features:

- LED light sender (green)
- Supply connections reverse-polarity protected
- Insensitive to ambient light
- Light- or dark-switching via control line
- Status indicator
- Switching frequency up to 1.3 kHz
- Solid metal housing, zinc diecasting
- Adjustable sensitivity
- NPN and PNP switching outputs
- CE

WT 12-B 5781

Dimensions in mm

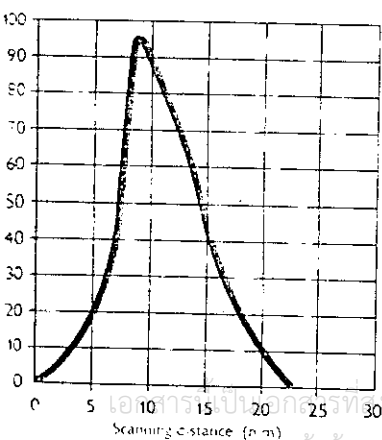
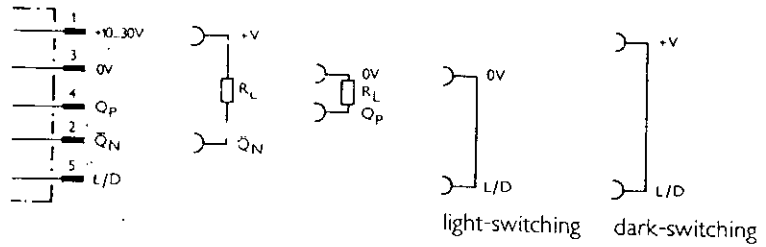


- ① M4 threaded mounting hole, 4 mm deep
- ② Centre of receiver optical axis
- ③ 5-pin plug
- ④ Sensitivity control
- ⑤ Signal strength indicator
- ⑥ Scanning plane

Mounting brackets and cable receptacles: see Accessories (page 238, 242)

Connection Diagram

WT 12-B 5781



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WT 12-B 5781 Contrast Sensor with low Switching Hysteresis

WT 12-B 5781

Scanning distance	13.5 mm	
Scanning-distance tolerance	± 1.5 mm	
Light spot diameter	2 mm	
Supply voltage V_S	10 to 30 VDC (limit values)	
Current consumpt. (no load) at 24 VDC	≲ 25 mA	
Ripple ¹⁾	≲ 5 V _{PP}	
Light sender	LED, modulated, average life 100,000 h ²⁾	
Light wavelength	565 nm (green)	
Switching outputs Q_P and Q_N	light- or dark-switching, reversible L/D via control line	
Operating mode	PNP	NPN
Signal voltage HIGH	$V_S - \leq 2 V$	V_S
Signal voltage LOW	0 V	≲ 2 V
Output current I_A max.	100 mA	100 mA
L/D control input	0 V or unswitched: light switching	
L/D control input	V_S : dark-switching	
Resp. time, max., Switching freq., max. ³⁾	360 μs; 1300/s	
VDE protection class ⁴⁾	II	
Enclosure rating	IP 67	
Protection circuits ⁵⁾	A, B, C	
Ambient operating temperature ⁵⁾	- 25 to + 55°C	
Storage temperature ⁶⁾	- 25 to + 75°C	
Weight	approx. 130 g	

- 1) Must remain within V_S tolerances
- 2) At room temperature ≲ + 25°C
- 3) With scanning ratio 1 : 1
- 4) Withstand voltage 50 V
- 5) A = V_S connections reverse-polarity protected
B = Q_P and Q_N outputs short-circuit protected
C = Interference suppression
- 6) Do not distort cable below 0°C;
do not operate controls below - 25°C

Selection Table

Housing	Plug, rear		Plug, below	
	Model	Part No.	Model	Part No.
Standard housing	B 5771	1011 061	B 5781	1010 823

Accessories: 2 m connecting cable with straight cable connector: part no. 6 008 899
2 m connecting cable with right angle cable connector: part no. 6 008 900



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่เขียนลงไมโครคอนโทรลเลอร์

```

#include"at89c51xd2.h" // run @ 58.9824MHz

#define RELOAD_TL0 0x70
#define RELOAD_TH0 0xF6

sbit outp = P1^0;
sbit xx = P1^7;

unsigned int cc_c;
unsigned char triged, num_pulse, num = 0;

void Init() {
    TMOD = 0x21; // timer mode
    SCON = 0x50; // serial mode
    PCON |= 0x80; // 2x mode

    TH1 = 248; // set baud rate (38400bps@58.9824MHz)
    TR1 = 1; // start timer1
    TI = 1; // ready to transmit

    TH0 = 0x00;
    TL0 = 0x00;
    TR0 = 1;

    EX0 = 1; // INTO
    IT0 = 1; // falling-edge
    ET0 = 1; // enable timer1 interrupt
    EA = 1; // enable interrupt
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void SendChar(unsigned char ch) {
    while (!TI) ;
    SBUF = ch;
    TI = 0;
}

```

```

void Start() {
    TH0 = RELOAD_TH0;
    TL0 = RELOAD_TL0;
    TR0 = 1;
}

```

```

void main() {
    Init();
    cc_c = 0;
    Start();
    while (cc_c < 16000) ;
    outp = 1;
    TR0 = 0;
    while (1) ;
}

```

```

void TimerInt() interrupt 1 {
    TR0 = 0;
    TF0 = 0;
    TH0 = RELOAD_TH0;
    TL0 = RELOAD_TL0;
    TR0 = 1;
    outp = 1;

    num_pulse = triged;
    triged = 0;
    if (num_pulse == triged) {
        P2 = num_pulse;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    SendChar(0x00);  
}  
else {  
    P2 = 0xF0;  
    SendChar(num_pulse);  
}  
cc_c++;  
  
outp = 0;  
}  
  
void TrigInt() interrupt 0 {  
    trigid++;  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ใช้ลงโปรแกรมในคอมเพื่อทำให้มองเห็นข้อมูล

```

#include <windows.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

////////////////////////////////////

// Serial Data Communication

DCB dcb;
HANDLE hCom;
DWORD dwError;
BOOL fSuccess;
COMMTIMEOUTS CommTimeouts;

BOOL CloseComPort() {
    if (hCom)
        CloseHandle(hCom);
    return 0;
}

BOOL OpenComPort(LPSTR ComPort) {

    if (hCom)
        CloseHandle(hCom);

    hCom = CreateFile(ComPort,
        GENERIC_READ | GENERIC_WRITE,
        0, /* comm devices must be opened w/exclusive-access */
        NULL, /* no security attrs */
        OPEN_EXISTING, /* comm devices must use OPEN_EXISTING */
        0, /* not overlapped I/O */
        NULL /* hTemplate must be NULL for comm devices */
    );

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (hCom == INVALID_HANDLE_VALUE) {
    dwError = GetLastError();
    MessageBox(GetActiveWindow(), "Cannot Open Selected I/O Port", "Error",
    MB_ICONERROR | MB_OK);
    return 0;
}

fSuccess = GetCommState(hCom, &dcb);

if (!fSuccess) {
    MessageBox(GetActiveWindow(), "Cannot Open Selected I/O Port", "Error",
    MB_ICONERROR | MB_OK);
    return 0;
}

dcb.BaudRate = CBR_38400;
dcb.ByteSize = 8;
dcb.Parity = NOPARITY;
dcb.StopBits = ONESTOPBIT;
dcb.fRtsControl = RTS_CONTROL_DISABLE;
dcb.fDtrControl = DTR_CONTROL_DISABLE;

fSuccess = SetCommState(hCom, &dcb);
if (!fSuccess) {
    MessageBox(GetActiveWindow(), "Cannot Open Selected I/O Port", "Error",
    MB_ICONERROR | MB_OK);
    /* Handle the error. */
    return 0;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CommTimeouts.ReadIntervalTimeout = MAXDWORD;
CommTimeouts.ReadTotalTimeoutConstant = 0;
CommTimeouts.ReadTotalTimeoutMultiplier = 0;
CommTimeouts.WriteTotalTimeoutConstant = 1000;
CommTimeouts.WriteTotalTimeoutMultiplier = 1000;

fSuccess = SetCommTimeouts(hCom, &CommTimeouts);
if (!fSuccess) {
    MessageBox(GetActiveWindow(), "Cannot Open Selected I/O Port", "Error",
MB_ICONERROR | MB_OK);
    /* Handle the error. */
    return 0;
}

return 1;
}

int PutSerial(char dat) {
    DWORD cc;
    char sdat[1];
    sdat[0]=dat;
    WriteFile(hCom, sdat, 1, &cc, NULL);
    return 0;
}

int GetSerial() {
    DWORD cc;
    char sdat[1];
    ReadFile(hCom, sdat, 1, &cc, NULL);
    if (cc>0)
        return sdat[0];
    else
        return -1;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

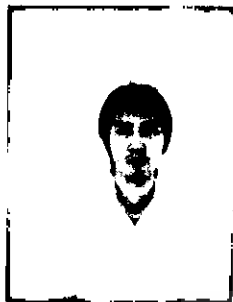
```

// Main Function
int main(int argc, char *argv[])
{
    FILE *f;
    int data, datacount = 0;
    OpenComPort("COM1");
    f = fopen("TUE_HANDSOME.txt", "w");
    printf("----- DATA FROM COM1 @ 38400bps ----- \n");
    printf(" Waiting for DATA, press RESET to begin... \n");
    while (datacount < 16000) {
        data = GetSerial();
        if (data >= 0) {
            fprintf(f, "%d \n", data);
            printf("0x%0.2X ", data);
            datacount++;
        }
    }
    fclose(f);
    printf("----- DATA GATHERING IS COMPLETE ----- \n");
    printf(" data in file TUE_HANDSOME.txt \n");
    MessageBox(NULL, "Data is ready in file TUE_HANDSOME.txt \n\n ionic ที่สุดหล่อจริง ๆ",
"Complete!", MB_OK);
    //system("pause");
    return 0;
}

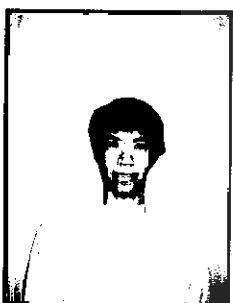
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

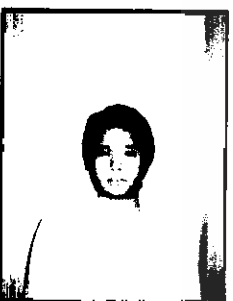
ประวัติผู้แต่ง



ชื่อ : นาย ชีรุธุฒิ โอมพรนุวัฒน์
 ที่อยู่ : 236/237 หมู่ 3 แขวงสีกัน เขตดอนเมือง กรุงเทพฯ 10210
 การศึกษา : ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ : นาย ชีรพทุธิ วัตถยธรรม
 ที่อยู่ : 175/1 แขวงลำป่าทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ ๕
 การศึกษา : ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ : นาย นิวัฒน์ จงประสาธน์ไสย
 ที่อยู่ : 349/3 ถ.สุภนทวารวดี ต.โนนวิมาย อ.เมือง จ.น่าน
 การศึกษา : ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ : นาย พงกณิกร คุณเศรษฐ์
 ที่อยู่ : 204 หมู่ 6 ต.โคกสะอาด อ.เมือง จ.อุตรธานี
 การศึกษา : ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้