

เทคนิคในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของ
มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย

TECHNIQUE TO EVALUATE TORQUE-SPEED CHARACTERISTICS OF
INDUCTION MOTOR BY INCREASING MOMENT OF INERTIA



วราชาติ แซ่ก๊ก
WARACHART SAE-KOK



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 44029
วัน, เดือน, ปี 22 ต.ค. 2545

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-648-922-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TECHNIQUE TO EVALUATE TORQUE-SPEED CHARACTERISTICS OF
INDUCTION MOTOR BY INCREASING MOMENT OF INERTIA**



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

2002

ISBN 974-648-922-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เทคนิคในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย

นักศึกษา

นาย วรชาติ แซ่ก๊ก

รหัสประจำตัว

42061085

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2545

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ.พิชิต ถ้ายอง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอเทคนิคในการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็วซึ่งอ้างอิงตาม IEEE standard 112-1996 [1] ซึ่งวิธีการทดสอบกระทำโดยการสตาร์ทมอเตอร์ที่อยู่ในสถานะไร้ภาระ (no-load) ด้วยวิธีสตาร์ทตรง (direct on-line starting) และทำการบันทึกค่าแรงดัน, กระแส, ความเร็วรอบ, และเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากความเร็วรอบศูนย์ถึงความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัสในสถานะคงตัว (steady state) และนำข้อมูลความเร็วรอบมาทำการคำนวณหาค่าแรงบิดต่อไป ในการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของสถานะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าหมดไป ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์โดยการนำล้อช่วยแรงมาทำการคับปิ้งกับเพลลาของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการเร่งความเร็วนานขึ้น ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ต่างๆ ได้แก่ กระแส-เวลา, อัตราเร็วเชิงมุม-เวลา, แรงบิด-เวลา, กระแส-ความเร็วรอบ, และแรงบิด-ความเร็วรอบ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เพื่อหาแนวโน้มของข้อมูลของค่ายังผล(rms) ของกระแสและแนวโน้มของอัตราเร็วเชิงมุม ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบจะถูกนำมาพิจารณาร่วมกับกราฟที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์, ค่าแรงบิดที่ได้จากการทดสอบภาระและการทดสอบล๊อคโรเตอร์เพื่อเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือได้ของผลการทดลอง ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง

Thesis Title	Technique to Evaluate Torque-Speed Characteristics of Induction Motor by Increasing Moment of Inertia
Student	Mr. Warachart Sae-kok
Student ID.	42061085
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Asst.Prof. Pichit Lumyong

ABSTRACT

This thesis presents a technique to evaluate torque-speed characteristics of an induction motor using an acceleration method. This method is specified in IEEE standard 112-1996 [1]. Test is performed on starting an induction motor by the direct-on-line starting at a no-load state. Voltage, current, speed, and time during the acceleration from the standstill until the speed near a synchronous speed are recorded. The value of torque is calculated from the speed data. For this method, a long accelerating time is required to avoid effects of electrical transients. In addition, this thesis presents a technique to increase the accelerating time using 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. The mathematical method to find a trend of an rms current and angular speed data in detailed. To confirm the test results, torque-speed curves from an acceleration test are compared with the torque-speed curves from an equivalent circuit, torque from load tests, and torque from locked rotor tests. It is found that this test method is convenient and reasonable.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาของ ผศ.พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา และ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย ที่ให้ความรู้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งต่อความอนุเคราะห์จากท่านทั้งสองเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา ที่ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการแก่ผู้วิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้องสำหรับวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ณทนต์ ราตรี อาจารย์ประจำคณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับวิชาสถิติแก่ผู้วิจัยซึ่งส่งผลให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ คุณมณฑา เทียมเมือง ที่คอยให้ความช่วยเหลือ, ให้ความสะดวก, และให้ความรู้และความเข้าใจในภาคปฏิบัติเกี่ยวกับวิศวกรรมเครื่องกลแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างมากซึ่งหากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากคุณมณฑาแล้ววิทยานิพนธ์นี้คงไม่สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณหนึ่งฤทัย สุพฤกษ์ทวีชัย ที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยตลอดเวลา

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือต่างๆ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรมที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ความสะดวกทุกอย่างแก่ผู้วิจัยตลอดเวลาในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอขอบคุณญาติพี่น้องทุกคนที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการวิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์ต่างๆ อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วรชาติ แซ่ก๊ก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.1.1 สเตเตอร์ (Stator).....	4
2.1.2 โรเตอร์ (Rotor).....	5
2.1.2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor).....	5
2.1.2.2 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบ โรเตอร์ (Wound Rotor).....	5
2.2 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	6
2.3 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	7
2.3.1 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น.....	7
2.3.2 การเกิดแรงบิดในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	12
2.4 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	12
2.5 การวิเคราะห์วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	19
3.1 บทนำ.....	19
3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	19
3.3 การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	21
3.4 การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว ...	22
3.4.1 สมการแรงบิดมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะdynamic	23
3.4.2 เทคนิคในการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	23
3.4.3 จำนวนหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ	24
3.5 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	25
ชนิด	25
บทที่ 4 กระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการคำนวณกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ	27
ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	27
4.1 บทนำ.....	27
4.2 การคำนวณหาค่า rms ของสัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์	27
4.3 Curve Fitting	27
4.4 การถดถอย(Regression)	29
4.4.1 การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (Simple Linear Regression)	30
4.4.2 การถดถอยแบบเส้นโค้งพหุนาม (Polynomial Regression)	33
4.4.3 การพิจารณาความเหมาะสมของสมการถดถอย.....	36
4.4.4 การถดถอยแบบเส้นโค้งที่สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้นได้	39
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	41
5.1 บทนำ.....	41
5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	41
5.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (3 Phase Induction Motor).....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.2 DC Tachogenerator	42
5.2.3 ล้อช่วยแรง (Flywheel).....	43
5.2.4 Analyzing Recorder.....	44
5.2.5 แท่นสำหรับทดสอบมอเตอร์	45
5.3 วิธีการทดสอบ	45
5.3.1 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation Test).....	46
5.3.2 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration Test).....	46
5.3.3 การทดสอบภาระของมอเตอร์ (Load Test).....	47
5.3.4 การทดสอบล๊อคโรเตอร์ (Locked Rotor Test).....	48
5.4 ผลการทดสอบ.....	49
5.4.1 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation Test).....	49
5.4.2 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration Test).....	56
5.4.2.1 รูปคลื่นกระแสของมอเตอร์ขนาดต่างๆ ในช่วงที่มอเตอร์เร่ง ความเร็ว	56
5.4.2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า rms ของกระแสและเวลาในช่วงที่ มอเตอร์เร่งความเร็ว.....	57
5.4.2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาในช่วงที่ มอเตอร์เร่งความเร็ว.....	62
5.4.2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-เวลาเปรียบเทียบกับกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-เวลา	68
5.4.2.5 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะ * กระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	73
5.4.2.6 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ เหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณจากวงจรสมมูลย์และจากการ ทดลอง.....	75
5.4.2.7 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ เหนี่ยวนำที่ได้จากการสตาร์ทในสภาวะเริ่มต้นที่แตกต่างกัน	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.2.8 กราฟแรงดันและกระแสของมอเตอร์ในสถานะคงตัวเมื่อทำการทดสอบโดยไม่คับปลิงล้อยช่วยแรงและกรณีที่ทำการคับปลิงล้อยช่วยแรง.....	78
5.4.2.9 กราฟกระแสและอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วโดยไม่มีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ ..	80
5.4.3 การทดสอบภาระ (Load Test).....	83
5.4.4 การทดสอบบล็อกโรเตอร์ (Locked Rotor Test).....	86
บทที่ 6 บทสรุป	89
เอกสารอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก สถิติเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูล.....	95
ภาคผนวก ข ทฤษฎีของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย.....	108
ภาคผนวก ค ดิกรีซของสมการโพลีโนเมียลและผลการทดลอง.....	112
ภาคผนวก ง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์	116
ประวัติผู้เขียน	132

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 พิกัดต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ	42
5.2 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, และมวลของล้อช่วยแรงที่ใช้ทำการทดสอบ	43
5.3 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนีคของระบบทดสอบที่ได้จากการทดสอบห้วงความเร็ว	49
5:4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	75
5.5 ค่ากระแสและแรงบิดของมอเตอร์ขณะล๊อค โรเตอร์ที่พิกัดแรงดัน	86
ก1 นำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นของสัตว์ทดลองภายหลังจากให้ยาเป็นเวลา 2 สัปดาห์	105
ก2 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยสำหรับการพิต curve ด้วยแบบจำลองที่มีสมการเป็นเส้นตรง	106
ก3 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยสำหรับการพิต curve ด้วยแบบจำลองที่มีสมการเป็นพาราโบลา	106
ก4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยสำหรับการพิต curve ด้วยแบบจำลองที่มีสมการเป็นโพลิโนเมียลดีกรี 3	107
ค1 การทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า	113
ค2 การทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า	113
ค3 การทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า	113

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	4
2.2 โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (squirrel cage rotor).....	5
2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสองขั้วอย่างง่าย (a) แบบจำลองพื้นฐาน (b) ไดอะแกรมของเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก.....	8
2.4 วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	13
2.5 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป.....	14
2.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	16
2.7 วงจรสมมูลในอีกรูปแบบหนึ่ง.....	17
3.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	19
3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำของมอเตอร์ในการออกแบบต่างๆตามมาตรฐาน NEMA.....	20
3.3 รูปทรงของล้อช่วยแรงที่ใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์.....	24
4.1 การปรับแต่ง curve ด้วยวิธีต่างๆ (a) linear regression, (b) linear interpolation (c) curvilinear interpolation.....	28
4.2 ตัวอย่างการปรับแต่ง curve ในลักษณะต่างๆ (a) minimizes ผลรวมของค่าคลาดเคลื่อน (b) minimizes ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (c) minimizes ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าสูงที่สุด.....	32
4.3 เปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการถดถอย (a) linear regression, (b) polynomial regression.....	34
4.4 การแปลงรูปสมการจากสมการเอกซ์โปเนนเชียล (a) เป็นสมการเส้นตรง (b).....	40
5.1 มอเตอร์ขนาด 1, 3, และ 5 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ.....	41
5.2 DC Tachogenerator ที่ใช้ในการทดสอบ.....	43
5.3 ล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ.....	44
5.4 Analyzing Recorder ที่ใช้ในการทดสอบ.....	44
5.5 แท่นสำหรับทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	45
5.6 ไดอะแกรมการต่อวงจรสำหรับทดสอบมอเตอร์.....	46
5.7 การทดสอบภาระของมอเตอร์.....	47
5.8 การทดสอบล๊อคโรเตอร์.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรง ขนาด 1.009 kg-m ²	49
5.10 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรง ขนาด 0.5054 kg-m ²	50
5.11 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรง ขนาด 0.0994 kg-m ²	50
5.12 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบโดยไม่เพิ่มค่า โมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์	51
5.13 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรง ขนาด 1.0093 kg-m ²	51
5.14 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรง ขนาด 0.5054 kg-m ²	52
5.15 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรง ขนาด 0.0994 kg-m ²	52
5.16 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบโดยไม่เพิ่มค่า โมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์	53
5.17 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรง ขนาด 1.0093 kg-m ²	53
5.18 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรง ขนาด 0.5054 kg-m ²	54
5.19 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรง ขนาด 0.0994 kg-m ²	54
5.20 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบโดยไม่เพิ่มค่า โมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์	55
5.21 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรง ขนาดต่างกัน	55
5.22 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรง ขนาดต่างกัน	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.23 รูปคลื่นกระแสนะแรงความเร็วของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาดต่างกัน.....	57
5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0994 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	57
5.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	58
5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	58
5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	59
5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	59
5.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	60
5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	60
5.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	61
5.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	61
5.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0994 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	62
5.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	63
5.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	63
5.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m ² (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง).....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m^2 (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง)	64
5.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m^2 (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง)	65
5.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m^2 (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง)	65
5.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m^2 (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง)	66
5.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m^2 (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง)	66
5.42 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า	67
5.43 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า	67
5.44 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า	68
5.45 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0994 kg-m^2	69
5.46 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m^2	69
5.47 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m^2	70
5.48 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m^2	70
5.49 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m^2	71
5.50 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m^2	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.51 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m ²	72
5.52 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m ²	72
5.53 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m ²	73
5.54 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับ โมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ	73
5.55 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับ โมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ.....	74
5.56 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับ โมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ	74
5.57 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมุติ	75
5.58 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมุติ.....	76
5.59 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมุติ.....	76
5.60 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าที่ได้จากการสตาร์ทในสถานะเริ่มต้นต่างกันคือ โรเตอร์หมุนกลับทิศ(เส้นทึบ) และ โรเตอร์หยุดนิ่ง(เส้นประ).....	77
5.61 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าที่ได้จากการสตาร์ทในสถานะเริ่มต้นต่างกันคือ โรเตอร์หมุนกลับทิศ(เส้นทึบ) และ โรเตอร์หยุดนิ่ง(เส้นประ).....	77
5.62 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าที่ได้จากการสตาร์ทในสถานะเริ่มต้นต่างกันคือ โรเตอร์หมุนกลับทิศ(เส้นทึบ) และ โรเตอร์หยุดนิ่ง(เส้นประ).....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.63 กราฟแรงดัน(สีดํา) และกระแสของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าในกรณีที่ไมํทำการคํปลิงกับลํอช่วยแรง (A) และกรณีที่ทำการคํปลิงกับลํอช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m ² (B).....	78
5.64 กราฟแรงดัน(สีดํา) และกระแสของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าในกรณีที่ไมํทำการคํปลิงกับลํอช่วยแรง (A) และกรณีที่ทำการคํปลิงกับลํอช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m ² (B)	79
5.65 กราฟแรงดัน(สีดํา) และกระแสของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าในกรณีที่ไมํทำการคํปลิงกับลํอช่วยแรง (A) และกรณีที่ทำการคํปลิงกับลํอช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m ² (B).....	79
5.66 กระแสและอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ขณะเร่งความเร็วเมื่อไมํมีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์	80
5.67 กระแสและอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ขณะเร่งความเร็วเมื่อไมํมีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์	80
5.68 กระแสและอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ขณะเร่งความเร็วเมื่อไมํมีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์	81
5.69 กราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบ(บน) และกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ(ล่าง) ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบภาระ	83
5.70 กราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบ(บน) และกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ(ล่าง) ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบภาระ	83
5.71 กราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบ(บน) และกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ(ล่าง) ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบภาระ	84
5.72 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนืยวนำขนาด 1 แรงม้า....	84
5.73 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนืยวนำขนาด 3 แรงม้า....	85
5.74 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนืยวนำขนาด 5 แรงม้า....	85
5.75 คํแรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า.....	86
5.76 คํแรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า.....	87
5.77 คํแรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า.....	87
ก2 เส้นโค้งปกติ	98
ก2 เส้นโค้งการแจกแจง T ที่ระดับความเป็นอิสระต่าง ๆ.....	99
ก3 เส้นโค้งการแจกแจง chi square	100
ก4 เส้นโค้งการแจกแจง F	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมํอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก5 Scatter Diagram ของข้อมูลความสัมพันธ์ของการเพิ่มน้ำหนักของสัตว์ทดลองกับปริมาณยาที่ให้	105
ข1 การย้ายแกนของโมเมนต์ความเฉื่อย	109
ข2 แผ่นวัตถุแข็งเกร็งบนระนาบ xy	110
ค1 การทดสอบเร่งความเร็ว (acceleration test) และการทดสอบหน่วงความเร็ว (retardation test)	114
ค2 การทดสอบล๊อคโรเตอร์ (locked rotor test)	114
ค3 การทดสอบภาระของมอเตอร์เหนี่ยวนำ(load test)	115



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในงานทางด้านอุตสาหกรรม โดยปกติแล้วจะมีการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องต้นกำลัง ซึ่งในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆก็จะมีภาระที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งวิศวกรหรือผู้ที่ใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำเป็นต้องทราบคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างชัดเจนจึงจะสามารถเลือกใช้มอเตอร์ได้ถูกต้องกับขนาดและประเภทของงาน คุณลักษณะที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำคือ คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ (torque-speed characteristics)

วิธีการในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีหลายวิธีเช่น การคำนวณจากวงจรสมมูลย์ (equivalent circuit) หรือทำการวัดค่าแรงบิดโดยตรงแล้วนำค่าแรงบิดที่ได้ทำการวัดได้นำมาพล็อตกับข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆเป็นต้น วิธีการแต่ละอย่างต่างก็มีข้อดีและข้อเสียในตัวมันเองดังนั้นวิศวกรหรือผู้ที่ใช้งานมอเตอร์จึงต้องใช้วิจารณญาณในการเลือกใช้วิธีการทดสอบเพื่อความสะดวกและความเหมาะสมกับประเภทของงาน

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิธีการที่ใช้ในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้มีการระบุไว้ใน IEEE standard 112-1996 [1] มีด้วยกัน 4 วิธีคือ 1. วิธีการวัดค่าเอาต์พุต (output measurement) 2. วิธีการเร่งความเร็ว (acceleration) 3. วิธีการวัดค่าอินพุต (input measurement) และ 4. วิธีวัดค่าโดยตรง (direct measurement)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ (torque-speed characteristics) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการเร่งความเร็ว (acceleration) ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่สามารถหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ตลอดย่านความเร็วของมอเตอร์ตั้งแต่หยุดนิ่งจนกระทั่งความเร็วเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยใช้เวลาในการบันทึกข้อมูลที่สั้นมาก แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวิธีดังกล่าวคือผลกระทบจากสภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient), สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าและทางกล (noise) ที่ส่งผลกระทบต่อข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการนำเทคนิคทางด้านวิศวกรรมและวิธีการทางสถิติมาช่วยในการกำจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าวเพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำเชื่อถือและสามารถนำไปประกอบการใช้งานจริงได้ เทคนิคที่จะทำให้บรรลุจุดประสงค์ของงานวิจัยคือ อาศัยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นวิธีการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ (torque-speed characteristics) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็วนั้นจำเป็นต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของสถานะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าไม่กระทบต่อข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงเวลาที่เร่งความเร็ว ดังนั้นวิธีการที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบจากสถานะทรานเซียนต์ดังกล่าวจึงต้องทำให้ช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ยาวนานพอที่จะทำให้สถานะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าหมดไป ซึ่งการที่จะเพิ่มเวลาในการเร่งความเร็วนั้นจำเป็นต้องทำให้ค่าคงตัวเวลาทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ (torque-speed characteristics) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) เป็นการทดสอบโดยการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีสตาร์ทตรง (direct on-line starting) แล้วทำการบันทึกข้อมูลแรงดัน, กระแส, ความเร็วรอบ, และเวลาของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว ในการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของสถานะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) จากมอเตอร์หรือเครื่องมือวัดซึ่งจะส่งผลกระทบต่อข้อมูลต่างๆ ที่ทำการบันทึกนั้นหมดไป ดังนั้นแนวคิดที่ใช้ในการวิจัยคือการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์โดยการนำล้อช่วยแรง (flywheel) มาทำการคัปปลิง (coupling) เข้ากับเพลลาของมอเตอร์เพื่อทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์สูงขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นด้วย

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยก็นำเสนอเทคนิคและกระบวนการในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทำการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1, 3 และ 5 แรงม้า ในการทดสอบได้ทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีขนาดต่างกัน แล้วใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการทำให้ข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์หาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ เพื่อเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ จากนั้นนำผลกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็วและผลที่ได้จากการทดสอบภาระ, การทดสอบล๊อคโรเตอร์และผลที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากวงจรสมมูลย์

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการวิจัยโดยมีการกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่างๆเป็นลำดับดังต่อไปนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเริ่มการเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มีโรเตอร์ประเภท ไม่มีขั้วยื่น (non-salient pole) และเชื่อมโยงไปถึงการเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จากนั้นจะเป็นการอธิบายปรากฏการณ์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำและนำเสนอวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการคำนวณหาคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงการใช้ในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ (torque-speed characteristics) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยนำเสนอการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบด้วยวิธีเร่งความเร็วโดยอาศัยเทคนิคการเพิ่ม โมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ซึ่งวิธีอ้างอิงตาม IEEE standard 112-1996 [1] จากนั้นเป็นการออกแบบล้อช่วยแรงเพื่อใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และนำเสนอการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนีคของระบบทดสอบโดยอาศัย IEC standard 34-2 [2]

บทที่ 4 เป็นการนำเสนอกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการคำนวณกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยแยกเป็นสองหัวข้อคือการคำนวณหาค่า rms และการหาแนวโน้มของข้อมูลต่างๆเพื่อใช้ในการคำนวณหากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอการทดลองและผลการทดลองโดยการทดลองจะแบ่งออกเป็นสี่หัวข้อคือการทดสอบหน่วงความเร็ว (retardation test), การทดสอบเร่งความเร็ว (acceleration test), การทดสอบภาระ (load test), และการทดสอบล็อกโรเตอร์ (locked rotor test)

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลงานวิจัยที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้โดยใช้เทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยร่วมกับวิธีการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration test) พร้อมข้อเสนอแนะและวิจารณ์ผลการทดลองเพื่อการวิจัยต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

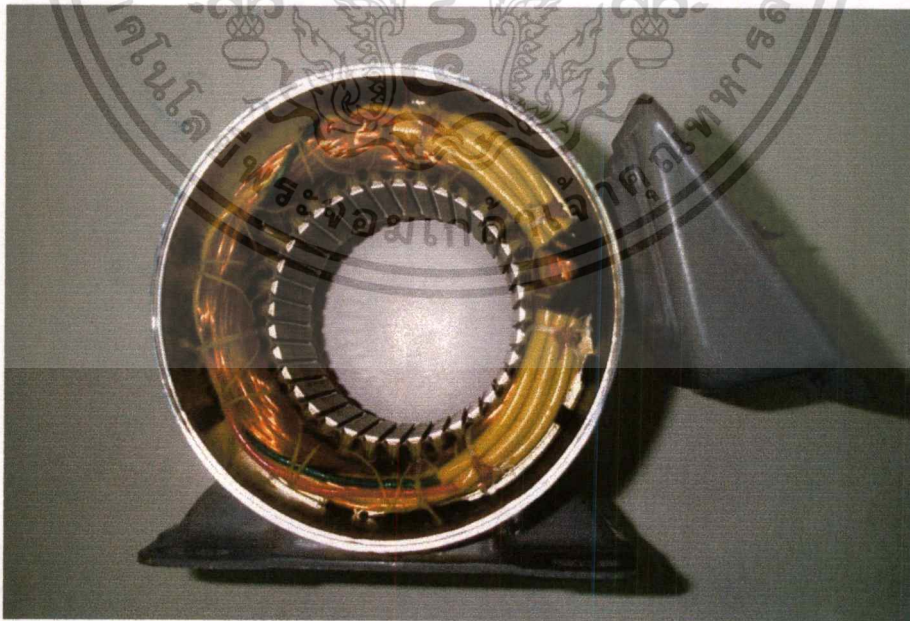
ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1 บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (3 phase induction motor) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating current machine) โดยอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันแบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ 1. สเตเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และ 2. โรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีการหมุน โดยแต่ละส่วนจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 สเตเตอร์(Stator)

สเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่หนึ่งมีแกนเป็นแผ่นลามิเนตประกบกันซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าซิลิคอน (silicon steel) และมีขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature) ฝังตัวอยู่ในร่องสลิตของแกนเหล็ก โดยขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีการพันขดลวดแบบกระจายเพื่อทำให้เกิดการกระจายสนามแม่เหล็กแบบไซน์ซอซด์ (sinusoidal) ซึ่งรูปร่างของสเตเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

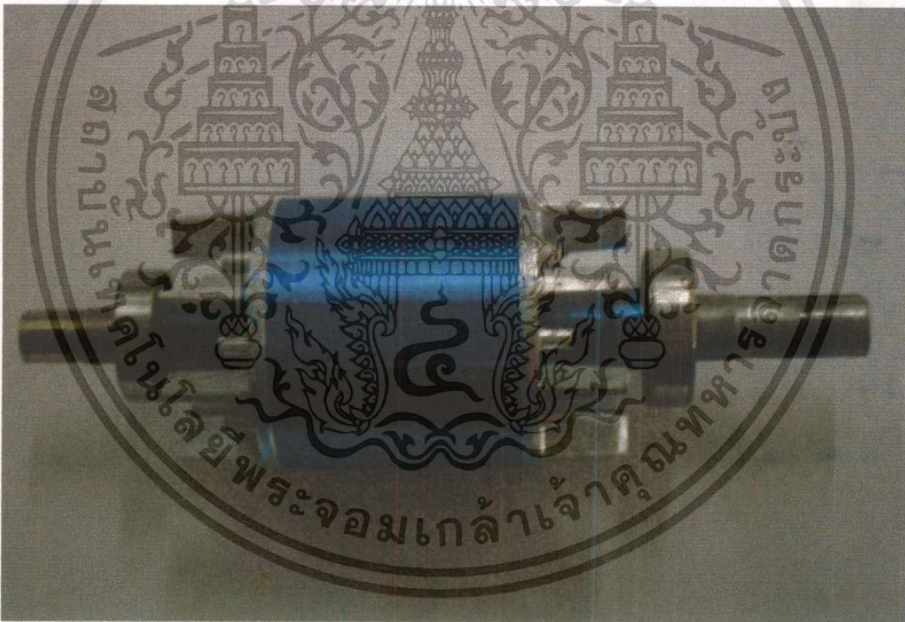
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 โรเตอร์ (Rotor)

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

2.1.2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้มีความแข็งแรงทางกลสูงและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบขดลวดพันรอบ (wound rotor) ส่วนประกอบของโรเตอร์จะมีแท่งตัวนำซึ่งมีการต่อลัดวงจรทางด้านหัวและท้ายของแท่งตัวนำ แท่งตัวนำดังกล่าวจะฝังตัวอยู่ในเหล็กกล้าซิลิคอน (silicon steel) โดยชนิดของแท่งตัวนำจะเป็นอลูมิเนียมหรือทองแดงขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังของมอเตอร์ ในกรณีมอเตอร์ขนาดเล็กกว่า 250 kW จะใช้อลูมิเนียมเป็นแท่งตัวนำ ถ้าขนาดพิกัดสูงกว่า 250 kW จะใช้ทองแดงเป็นแท่งตัวนำ [3] ลักษณะของสลีตของโรเตอร์มีผลต่อกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ รูปร่างของโรเตอร์แบบกรงกระรอกแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (squirrel cage rotor)

2.1.2.2 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้มีขดลวดพันอยู่ในร่องสลีตเช่นเดียวกับสเตเตอร์ โดยส่วนปลายของขดลวดจะต่ออยู่กับแหวนลื่น (slip ring) และมีแปรงถ่านสัมผัสอยู่โดยแปรงถ่านจะต่ออยู่กับวงจรภายนอกเพื่อทำการต่อวงจรแบบสตาร์หรือเดลต้า มอเตอร์ที่มีโรเตอร์ประเภทนี้มีข้อจำกัดคือจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์และไม่สามารถหมุนเร็วมากได้เนื่องจากความแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางกลด้านนอกจากนี้ยังมีราคาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก แต่ข้อดีของโรเตอร์ประเภทนี้คือสามารถกำหนดแรงบิดขณะสตาร์ทได้โดยอาศัยการต่อความต้านทานภายนอก

2.2 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทกระตุ้นเดี่ยว (singly excited) ซึ่งอาศัยการป้อนพลังงานเข้าทางสเตเตอร์ พลังงานดังกล่าวจะถูกส่งไปยังโรเตอร์โดยอาศัยการเหนี่ยวนำเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ผ่านช่องว่างอากาศ (air gap) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์

เมื่อมีการป้อนแรงดันให้แก่สเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ช่องว่างอากาศซึ่งสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ดังสมการ

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

โดยที่ N_s = ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)
 f = ความถี่ของแหล่งจ่าย (Hz)
 P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์

ในกรณีที่มีการป้อนแรงดันให้แก่สเตเตอร์และทำการล๊อคโรเตอร์ให้อยู่กับที่จะเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในโรเตอร์ตามหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งความถี่ของแรงดันและกระแสทางด้านโรเตอร์มีค่าเท่ากับทางด้านสเตเตอร์ ระดับของแรงดันและกระแสของโรเตอร์จะแปรตามอัตราส่วนรอบ (turn ratio) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ในสภาวะนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีสภาพเหมือนหม้อแปลงที่มีการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ (secondary) แต่ถ้าหากได้มีการจับโรเตอร์ของมอเตอร์ให้หมุนในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุนจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้นจึงไม่เกิดกระแสไหลในมอเตอร์ทำให้ไม่เกิดแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic torque) แต่ถ้าโรเตอร์หมุนที่ความเร็วใดๆในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนและมีค่าน้อยกว่าความเร็วซิงโครนัส จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ซึ่งความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสและความเร็วรอบของโรเตอร์เรียกว่าสลลิป (slip) ในการอธิบายค่าสลลิปจะแสดงอยู่ในรูปสมการของเปอร์เซ็นต์สลลิป (per-unit slip) ดังสมการที่ 3 [4]

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.2)$$

โดยที่ ω_s = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (rad/s)

ω_r = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rad/s)

เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบโคจรที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ดังได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับ sf แรงบิดที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบโคจรเรียกว่าแรงบิดอะซิงโครนัส (asynchronous torque)

2.3 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนที่มีโรเตอร์เป็นประเภทไม่มีขั้วยื่น ดังนั้นช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์จึงมีขนาดเท่ากันตลอด (uniform air-gap) การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงมีหลักการเกี่ยวกับการเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดที่โรเตอร์ไม่มีขั้วยื่น

2.3.1 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น

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

ในการพิจารณาการเกิดแรงบิดจะพิจารณาจากฟลักซ์ร่วมลัพธ์ (resultant mutual flux) โดยพิจารณาในเทอมของ magnetic coenergy ที่สะสมอยู่ในช่องว่างอากาศในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์, โรเตอร์และมุม δ_r ระหว่างแกนแม่เหล็กทั้งสอง ซึ่งแรงบิดสามารถคำนวณได้จากการหาอนุพันธ์เชิงซ้อน (partial derivative) ของ coenergy กับมุม δ_r

ในการพิจารณากำหนดให้สนามแม่เหล็กในแนวเส้นสัมผัสมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะสนามแม่เหล็ก H ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่จะเขียนต้นฉบับการคัด

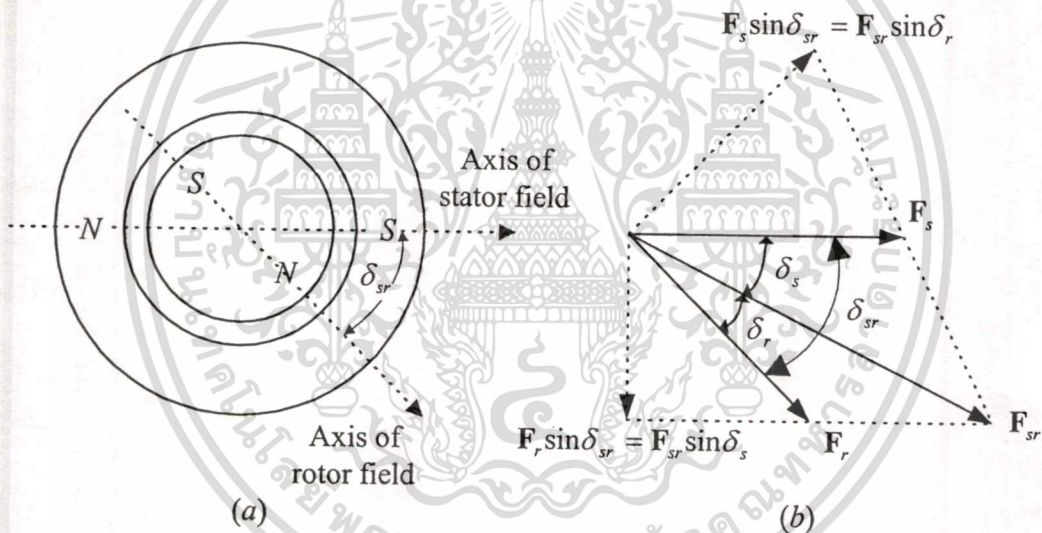
ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่น เมื่อทำการอินทิเกรตเชิงเส้นความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านช่องว่างอากาศจะได้เท่ากับ Hg ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ \mathfrak{F}_{sr} ดังสมการ

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

สัญลักษณ์ \mathfrak{F}_{sr} แสดงให้เห็นว่าค่า mmf wave เป็นฟังก์ชันของมุมรอบๆเส้นรอบวงของสเตเตอร์ เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ F_{sr} เกิดจากผลรวมทางเวกเตอร์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ F_s และโรเตอร์ F_r ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการการรวมกันทางเวกเตอร์ดังนี้

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



รูปที่ 2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสองขั้วอย่างง่าย (a) แบบจำลองพื้นฐาน (b) ไดอะแกรมของเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

ค่า F แทนค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ดังนั้นสนามแม่เหล็กลัพธ์ H มีการกระจายตัวแบบไซน์ซอยด์ ซึ่งค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กลัพธ์หาได้จากสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ coenergy density ในช่องว่างอากาศ ณ จุดใดๆ ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากับ H มีค่าเท่ากับ $\frac{\mu_0}{2} H^2$ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ coenergy density มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} & \frac{\mu_0}{2} \frac{H_{peak}^2}{2} \\ & \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{F_{sr}}{g} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

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

ดังนั้น ค่า coenergy ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} W'_{fd} &= (\text{ค่าเฉลี่ยของ coenergy density}) (\text{ปริมาตรของช่องว่างอากาศ}) \\ &= \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{F_{sr}}{g} \right)^2 \pi D l g \\ &= \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} F_{sr}^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดยที่ D = ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างอากาศ (m.)
 l = ความยาวในแนวแกนของช่องว่างอากาศ (m.)
 g = ระยะช่องว่างอากาศ (m.)

จากสมการที่ 2.4 จะได้ค่า coenergy ที่สะสมอยู่ในช่องว่างอากาศในรูปของค่าสูงสุดของขนาดแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการ

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

จากสมการที่ 2.8 สามารถหาสมการของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยทำการหาอนุพันธ์เชิงซ้อนระหว่าง coenergy และมุมระหว่างแกนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าของสเตเตอร์และโรเตอร์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์ซึ่งจะได้สมการแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีสองขั้วดังนี้

$$T = + \frac{\partial W'_{fd}}{\partial \delta_{sr}} = - \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad (2.9)$$

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีจำนวน P ขั้วจะได้สมการแรงบิดอยู่ในรูปแบบ

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

จากรูปที่ 2.3b จะพบว่า $F_r \sin \delta_{sr}$ เป็นส่วนประกอบของ F_r ในแนวตั้งฉากกับ F_s และ $F_s \sin \delta_{sr}$ เป็นส่วนประกอบของ F_s ในแนวตั้งฉากกับ F_r ซึ่งจากสมการที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดแปรผันกับผลคูณเชิงเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.3b จะได้ความสัมพันธ์

$$F_s \sin \delta_{sr} = F_{sr} \sin \delta_r \quad (2.11)$$

$$F_r \sin \delta_{sr} = F_{sr} \sin \delta_s \quad (2.12)$$

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12 เมื่อทำการแปลงรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์จะได้

$$T = - \frac{P \pi \mu_0 D l}{2g} F_s F_{sr} \sin \delta_s \quad (2.13)$$

$$T = - \frac{P \pi \mu_0 D l}{2g} F_r F_{sr} \sin \delta_r \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.10, 2.13, และ 2.14 เป็นการนำเสนอรูปแบบของสมการแรงบิดใน 2 รูปแบบคือ

1. แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของแต่ละส่วน โดยแยกเป็นส่วนของสเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการที่ 2.10
2. แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์และส่วนของสเตเตอร์หรือโรเตอร์ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$T = -\frac{P}{2} \frac{\pi D l}{2} B_{sr} F_r \sin \delta_r \quad (2.15)$$

ในการออกแบบอุปกรณ์ทางด้าน electromagnetic จะมีข้อจำกัดอยู่ที่การอิ่มตัวของสารแม่เหล็กซึ่งค่าสูงสุดของรูปคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกลับ B_{sr} มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.0 T เพื่อให้เกิดความสะดวกในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าดังนั้นจึงสามารถแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของฟลักซ์แม่เหล็กกลับโดย

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

ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นสัญญาณแบบไซน์ซอซด์ในครึ่งลูกคลื่นมีค่าเท่ากับ $2/\pi$ คูณกับค่าสูงสุดของรูปคลื่นดังสมการ

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

ค่า B แทนค่าสูงสุดของรูปคลื่นของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังนั้นผลลัพธ์ของสมการที่ 2.15 คือ

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

โดยที่ Φ_{sr} = ฟลักซ์แม่เหล็กกลับซึ่งสร้างโดยสเตเตอร์และโรเตอร์
 δ_r = มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การเกิดแรงบิดในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 ซึ่งค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีลักษณะเกี่ยวกับการเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดไม่มีขั้วขึ้นซึ่งสมการแรงบิดแสดงดังสมการที่ 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

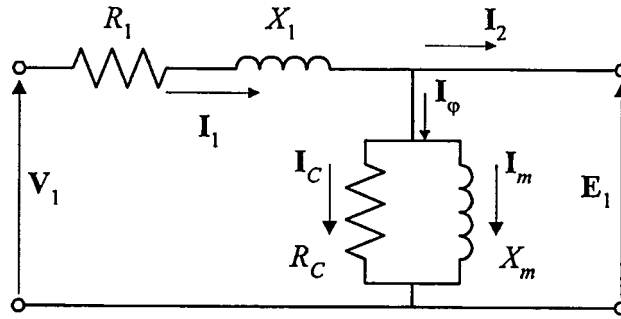
2.4 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปแบบหนึ่งในการพิจารณารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กคือการพิจารณาจากวงจรสมมูลย์โดยพิจารณาให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้รับการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟสสมดุล ในการพิจารณาวงจรสมมูลย์นั้นจะทำการพิจารณาแยกเป็นเฟสไปโดยกำหนดให้มีการต่อวงจรของมอเตอร์เป็นแบบ Y และแรงดันที่ปรากฏที่ขั้วของวงจรสมมูลย์เป็นแรงดันเฟส ส่วนกระแสเป็นกระแสไลน์ ลักษณะของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเหมือนกับหม้อแปลง โดยเริ่มพิจารณาจากทางด้านสเตเตอร์ก่อนซึ่งสมการซึ่งอธิบายวงจรสมมูลย์ทางด้านสเตเตอร์เป็นดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศถูกสร้างจากผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งจากรูปที่ 2.4 กระแสสเตเตอร์ I_1 สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน โดยส่วนแรกคือส่วนประกอบทางด้านภาระ (load component) I_2 ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ และส่วนที่สองคือ ส่วนประกอบทางด้านกระตุ้นหรือกระแสกระตุ้น (exciting component) I_ϕ ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศและเป็นฟังก์ชันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_1 กระแสกระตุ้นจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกอยู่ในรูปการสูญเสียที่แกนเหล็ก (core loss component) I_c ซึ่งจะมีเฟสทับกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 ส่วนที่สองอยู่ในรูปของกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็ก I_m ซึ่งจะล่าหลัง E_1 อยู่ 90 องศา ซึ่งในวงจรสมมูลจะแสดงการสูญเสียในแกนเหล็กในรูปของ R_c ต่อขนานอยู่กับส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กในรูปของ X_m ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะต่ออยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1

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

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

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

ในส่วนของการสัมพันธ์ทางด้านกระแสก็เช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจริงที่โรเตอร์ I_{rotor} และกระแสในวงจรสมมูลย์ของโรเตอร์ I_{2s} เป็นดังสมการที่ 2.22

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

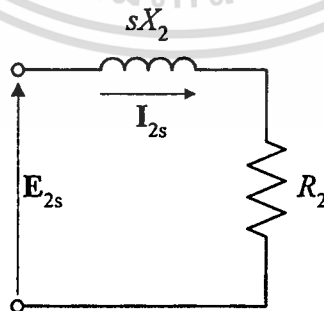
เมื่อนำสมการที่ 2.21 มาหารด้วยสมการที่ 2.22 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า impedance ของวงจรสมมูลย์ของโรเตอร์ Z_{2s} และค่า impedance ของวงจรโรเตอร์จริง Z_{rotor}

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

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

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

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



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลย์ทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป

จากสมการที่ 2.24 จะได้ค่า reactance มีค่าแปรผันกับค่าสลิปของมอเตอร์โดยที่ X_2 เป็นค่า reactance ที่ความถี่เดียวกับสเตเตอร์ เมื่อมองโรเตอร์จาก กรอบอ้างอิงของโรเตอร์(rotor reference frame) จะได้ว่าจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.5

เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรต่างๆของโรเตอร์โดยมองจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์ (stator reference frame) พบว่าเมื่อมองจากด้านสเตเตอร์จะพบว่ารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนา โดยฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ E_1 และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ E_{2s} ซึ่งหากว่าไม่มีผลจากความเร็วของโรเตอร์(โรเตอร์หยุดนิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสเตเตอร์) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์จะเท่ากับที่สเตเตอร์ แต่เนื่องจากโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วใดๆทำให้มีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์เท่ากับ 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

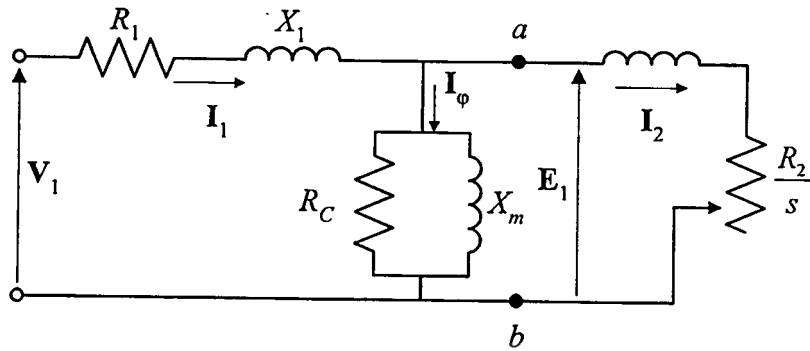
$$I_{2s} = I_2 \quad (2.26)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.25 หารด้วยสมการที่ 2.26 จะได้

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

เมื่อนำผลของความเร็วยุบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ามาพิจารณาร่วมกับสมการที่ 2.24 และสมการที่ 2.27 จะได้ความสัมพันธ์

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



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อนำค่าสลิปหารทั้งสองข้างของสมการที่ 2.28 จะได้

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

เป็นการพิจารณาองค์ประกอบของโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์

เมื่อพิจารณาทางกายภาพพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์ซึ่งมีความถี่ sf โดยมีทิศทางไปในทางเดียวกับโรเตอร์ซึ่งมีความถี่เท่ากับ $(1-s)f$ ดังนั้นเมื่อมองจากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ พบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่โรเตอร์มีความถี่เท่ากับ sf แต่เมื่อพิจารณาจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์จะพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์จะมีความถี่เท่ากับ ความถี่ซิงโครนัสนั่นเอง (synchronous frequency) เมื่อพิจารณาในรูปของวงจรสมมูลจะได้ดังรูปที่ 2.6

2.5 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ภายหลังจากได้วงจรสมมูลแล้วสามารถนำวงจรสมมูลมาคำนวณหาสมรรถนะและคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำอันได้แก่ กำลังไฟฟ้า, แรงบิด เป็นต้น

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.6 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ transfer ผ่านช่องว่างอากาศ (power transfer across the airgap) P_{g1} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.30 โดยอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า q_1 แทนจำนวนเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากสมการที่ 2.30 กำลังไฟฟ้าที่ได้เป็นกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศโดยกำลังไฟฟ้างกล่าวสามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นการสูญเสียที่สเตเตอร์ในรูปของความร้อนดังสมการที่ 2.31 [4]

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

อีกส่วนคือส่วนที่แปลงรูปพลังงานมาเป็นพลังงานกลดังสมการที่ 2.32

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

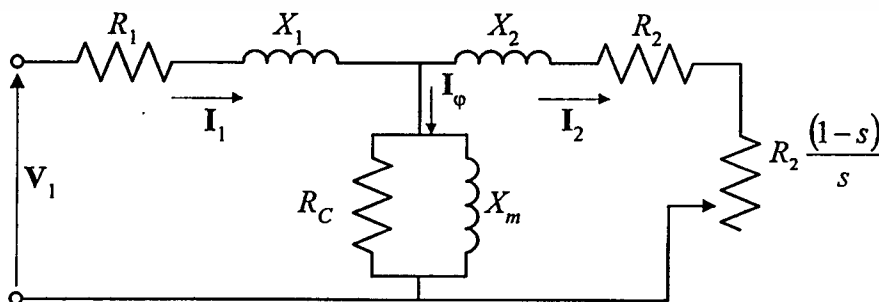
จากสมการที่ 2.32 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปที่กะทัดรัดขึ้นได้

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

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของ P_{g1} ดังสมการที่ 2.34

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

จากสมการที่ 2.32, 2.33, และ 2.34 เมื่อนำมาเขียนในรูปของวงจรสมมูลซึ่งแยกองค์ประกอบที่เป็นการสูญเสียในรูปความร้อนและในรูปของกำลังทางกลออกได้ดังรูปที่ 2.7 โดยค่า R_2 เป็นแทนส่วนของความสูญเสียในรูปความร้อน และ $R_2 \frac{(1-s)}{s}$ แทนส่วนที่เป็นกำลังงานทางกล



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลในอีกรูปแบบหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า electromagnetic torque T_e เป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ ซึ่งผลคูณระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ความเร็วเชิงโคโรนัส ω_s จะได้กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงอยู่ในสมการที่ 2.35

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

เมื่อนำสมการที่ 2.33 มาพิจารณาพร้อมกับสมการที่ 2.35 จะได้สมการแรงบิดดังสมการที่ 2.36

$$T_e = \frac{1}{\omega_s} q_1 I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.36)$$

ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ 3 เฟส ค่า q_1 จะมีค่าเท่ากับ 3 ดังนั้นสมการที่ 2.36 จะกลายเป็น

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

ในส่วนของค่าความเร็วเชิงโคโรนัส ω_s สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.38

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

โดยที่ p = จำนวนขั้วของมอเตอร์
 f = ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า

ค่าแรงบิดที่ได้จากสมการ 2.37 เป็นค่าแรงบิดภายในมอเตอร์เท่านั้นซึ่งยังไม่เป็นค่าแรงบิดที่ใช้ขั้วภาระต่างๆ ซึ่งต้องนำค่าความสูญเสียทางกลเนื่องจากความเสียดทานและแรงต้านของลมและค่า stray load losses ออกเสียก่อนจึงจะได้ค่าแรงบิดที่เพลลาที่ใช้ขั้วภาระจริงๆ

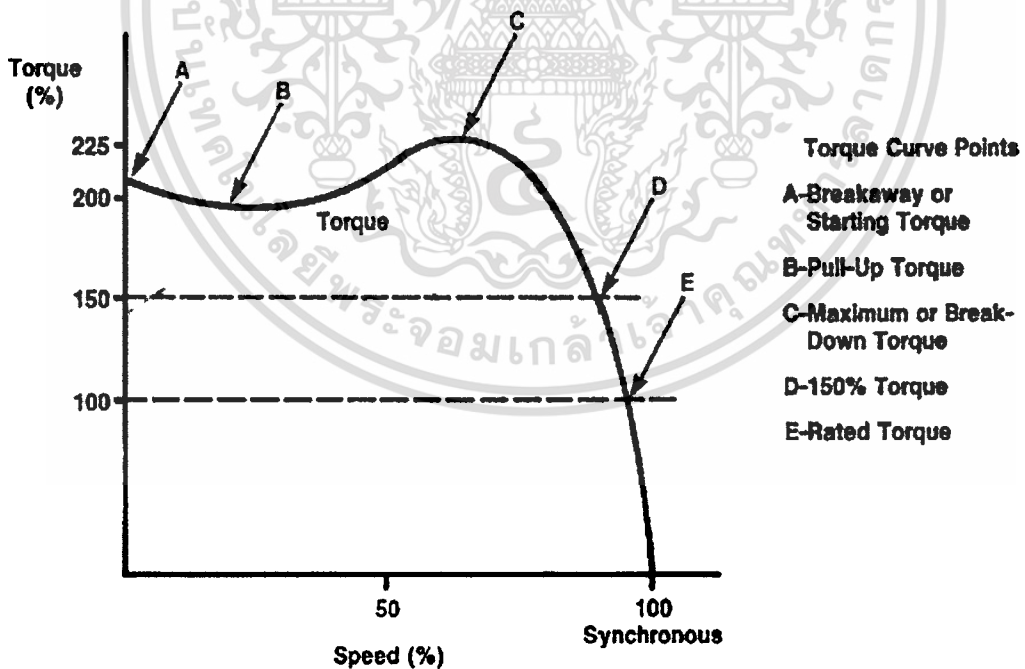
บทที่ 3

วิธีการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 บทนำ

กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ ณ ความเร็วใดๆ จากความเร็วศูนย์ถึงความเร็วซิงโครนัส วิธีการในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีอยู่หลายวิธีซึ่งขึ้นอยู่กับวิศวกรหรือผู้ใช้งานมอเตอร์จะเลือกนำมาใช้ แต่ในการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้หลายมาตรฐาน และแต่ละมาตรฐานก็มีอยู่หลายวิธีที่ใช้ในการทดสอบ ในส่วนวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นวิธีหนึ่งในสี่วิธีซึ่งได้กำหนดไว้ใน IEEE standard 112-1996 [1]

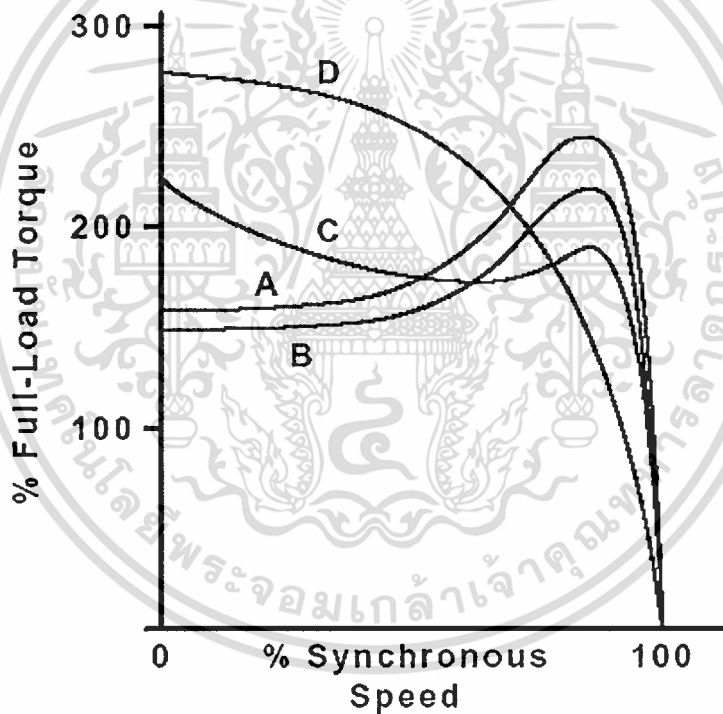
3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งวิศวกรหรือผู้ใช้อมอเตอร์สามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกใช้อมอเตอร์ได้ จุดต่างๆบนกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปดังแสดงในรูปที่ 3.1

จากรูปที่ 3.1 จุด A เรียกว่า Starting Torque หรือ Breakaway Torque ซึ่งเป็นค่าแรงบิดขณะที่ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับศูนย์ เป็นแรงบิดขณะสตาร์ทมอเตอร์ ค่าแรงบิด ณจุดนี้จะแตกต่างกันตามการออกแบบของมอเตอร์ จุด B เรียกว่า Pull-up Torque ซึ่งเป็นแรงบิดที่น้อยที่สุดที่ถูกสร้างโดยมอเตอร์ขณะที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากสภาวะหยุดนิ่งถึงความเร็วที่ให้แรงบิดสูงสุด (breakdown torque) จุด C เรียกว่า Breakdown Torque หรือ Maximum Torque เป็นค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ จุด E เป็นค่าแรงบิดพิสัยของมอเตอร์



รูปที่ 3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำของมอเตอร์ในการออกแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน NEMA

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการออกแบบที่แตกต่างกันตามมาตรฐานของ NEMA ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Design A เป็นมอเตอร์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานเฉพาะด้าน มีแรงบิดขณะสตาร์ทเท่ากับ 125%-175% ของแรงบิดที่พิกัด ค่ากระแสขณะสตาร์ทเท่ากับ 5-7 เท่าของกระแสพิกัดมี speed regulation เท่ากับ 2%-4%

- Design B เป็นมอเตอร์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานทั่วไป มีค่าแรงบิดขณะสตาร์ทเช่นเดียวกับ Design A มีค่ากระแสขณะสตาร์ทเท่ากับ 4-5.5 เท่าของกระแสพิกัด และมี speed regulation เท่ากับ 3%-5%

- Design C เป็นมอเตอร์ที่ถูกออกแบบมาให้มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูง (เหมาะสำหรับภาระประเภท ปั้มน้ำ) มีค่าแรงบิดขณะสตาร์ทเท่ากับ 200%-275% ของแรงบิดที่พิกัด มีค่ากระแสขณะสตาร์ทเท่ากับ 3.5-5 เท่าของกระแสพิกัดและมี speed regulation เท่ากับ 4%-5%

- Design D เป็นมอเตอร์ที่ถูกออกแบบให้มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูงเช่นกันแต่สูงกว่า Design C มีค่าแรงบิดขณะสตาร์ทเท่ากับ 250%-300% ของแรงบิดที่พิกัด มีค่ากระแสขณะสตาร์ทเท่ากับ 3.5-5 เท่าของกระแสพิกัด และมี speed regulation เท่ากับ 4%-5%

นอกจากนี้ยังมีมอเตอร์ที่ถูกออกแบบในรูปแบบอื่นที่ไม่ได้แสดงในรูปที่ 3.2 คือ Design E และ Design F

- Design E เป็นมอเตอร์ที่ถูกออกแบบให้มีแรงบิดขณะสตาร์ทต่ำ ในมอเตอร์ขนาดต่ำกว่า 5.5 kW จะมีกระแสขณะสตาร์ทต่ำเช่นกัน มอเตอร์ที่มีขนาดมากกว่า 5.5kW ควรสตาร์ทด้วยวิธี reduce voltage starting มีค่า speed regulation สูง (low slip)

- Design F เป็นมอเตอร์มอเตอร์ที่ถูกออกแบบให้มีแรงบิดต่ำ สามารถสตาร์ทได้ที่แรงดันพิกัด มีค่ากระแสสตาร์ทต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ design อื่นๆ มีค่ากระแสสตาร์ทประมาณ 2-4 เท่าของกระแสพิกัดและมีค่าแรงบิดขณะสตาร์ทเท่ากับ 125%ของค่าแรงบิดที่พิกัด มีค่า speed regulation มากกว่า 5% ในกรณีที่มอเตอร์มีขนาดสูงกว่า 18.5kWจะถูกออกแบบมาเพื่อใช้แทนมอเตอร์ Design B

3.3 การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบตาม IEEE standard 112-1996 [1] ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้ระบุวิธีที่ใช้ในการทดสอบไว้ 4 วิธี ได้แก่ 1. วิธีการวัดค่าเอาต์พุต (output measurement), 2. วิธีเร่งความเร็ว (acceleration), 3. วิธีการวัดค่าอินพุต (input measurement), และ 4. วิธีวัดค่าโดยตรง (direct measurement) เนื่องจากว่าวิธีการหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ด้วยการทดสอบด้วยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 4 นั้นจำเป็นต้องรักษาระดับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ก่อนที่จะทำการบันทึกข้อมูลได้ ในส่วนวิธีที่ 3 นั้นเป็นการทดสอบในกรณีที่ไม่สามารถปลดภาระออกจากเพลลาของมอเตอร์ได้ซึ่งเป็นทำให้ค่าแรงบิดที่คำนวณได้นั้นไม่ครบตลอดย่านความเร็วรอบของมอเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะความเร็วสูงสุดจะหยุดอยู่ที่ความเร็วพิกัดเท่านั้นและข้อเสียอีกประการคือต้องทำการประมาณค่าความสูญเสียจากสเตเตอร์เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าดังกล่าวได้โดยตรง ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว ซึ่งมีข้อดีคือใช้เวลาในการทำการทดสอบสั้นและให้ข้อมูลได้ตลอดย่านความเร็วของมอเตอร์เนื่องจากการทดสอบที่สภาวะไร้ภาระ (no-load) ซึ่งวิธีการในการทดสอบนั้นจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

3.4 การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) กระทำโดยการสตาร์ทมอเตอร์ด้วยวิธีสตาร์ทตรง (direct-on-line starting) โดยมอเตอร์อยู่ในสภาวะไร้ภาระ (no-load) จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลแรงดัน, กระแส, ความเร็วรอบ, และเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว วิธีการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบด้วยวิธีการเร่งความเร็วนี้จะต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลกระทบจากสถานะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) จากเครื่องมือวัดและจากตัวมอเตอร์เองซึ่งจะส่งผลกระทบต่อข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะที่ทำการเร่งความเร็วได้ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการกำจัดผลกระทบดังกล่าวโดยต้องยึดช่วงเวลาในการเร่งความเร็วให้นานขึ้น โดยการคัปปลิง (coupling) ล้อช่วยแรงเข้ากับเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ วิธีดังกล่าวจะเป็นการเพิ่มค่าคงตัวเวลาทางกล (mechanical time constant) ให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำทำให้เวลาในการเร่งเร็วนานขึ้น นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีคือทำการสตาร์ทมอเตอร์โดยทำการลดแรงดันที่ป้อนเข้าสู่สเตเตอร์ของมอเตอร์ วิธีนี้ก็เพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วเช่นกัน

ภายหลังทำการสตาร์ทมอเตอร์และบันทึกข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์แล้ว นำข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำมาคำนวณหาแรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ด้วยสมการที่ 3.1 [1]

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

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 เพื่อจัดสมการให้อยู่ในรูปที่นิยมใช้กันทั่วไปจึงจัดรูปสมการใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่ $\frac{d\omega}{dt}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s²)

3.4.1 สมการแรงบิดมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะdynamic

เมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะdynamic สมการแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะแสดงดังสมการที่ 3.3[3],[5]

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

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

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

โดยที่ T_m = แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)
 T_L = แรงบิดภาระ (N-m)
 T_c = แรงบิดเนื่องจาก coulomb friction (N-m)
 $D\omega_r$ = แรงบิดเนื่องจากความหนืด (viscous torque) (N-m)
 $F\omega_r^2$ = แรงบิดเนื่องจากแรงต้านของลม (windage torque) (N-m)
 J_m = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (kg-m²)
 ω_r = ขนาดของความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (rad/s)

3.4.2 เทคนิคในการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4 ซึ่งกล่าวไว้ว่าในการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วจำเป็นต้องอาศัยเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของ electrical transient จากมอเตอร์และเครื่องมือวัดซึ่งจะส่งผลกระทบต่อข้อมูลความเร็วรอบที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำหมดไป[1],[3] ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มเวลาในการเร่งความเร็วโดยเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์แสดงดังสมการที่ 3.6

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

โดยที่ t = เวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์จาก ω_1 ไปสู่ ω_2

เนื่องจากการทดสอบการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็วนั้นกระทำการทดสอบในสถานะที่มอเตอร์อยู่ในสถานะ no-load และค่า T_c และ $F\omega^2$ มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงบิดอื่นๆ ดังนั้นสมการแรงบิดในสมการที่ 3.3 จะกลายเป็น[5],[18]

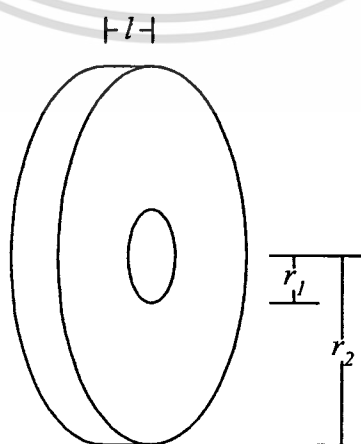
$$T_m = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad (3.7)$$

จากสมการที่ 3.6 เมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นทำให้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์สูงขึ้นซึ่งเมื่อทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาด J_1 ให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้วสมการแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงดังสมการที่ 3.8[18]

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

3.4.3 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ

ในส่วนของล้อช่วยแรงที่ใช้สำหรับเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็วนี้มีรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 3.3



เอกรูปที่ 3.3 รูปทรงของล้อช่วยแรงที่ใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์เหนี่ยวนำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 สมการที่ใช้คำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงแสดงดังสมการ

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

โดยที่ ρ = ความหนาแน่นของเนื้อสารที่ใช้ทำล้อช่วยแรง (kg/m^3)
 r_1, r_2 = รัศมีภายในและภายนอกของล้อช่วยแรง (m)
 l = ความหนาของล้อช่วยแรง (m)

3.5 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด

วิธีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นกระทำโดยการใช้อ้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่าหนึ่งมาทำการคัปปลิง (coupling) เข้ากับเพลลาของมอเตอร์ซึ่งวิธีการในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของระบบทดสอบ สามารถคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) ซึ่งขั้นตอนการทดสอบกระทำตาม IEC standard 34-2 [2] โดยทำการเดินเครื่องมอเตอร์ที่สภาวะคงตัว (steady state) และมีการคัปปลิงล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่าหนึ่งเข้าที่เพลลาของมอเตอร์ จากนั้นทำการปลดแหล่งจ่ายออกแล้วทำการบันทึกความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลงจนกระทั่งความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงถึงประมาณ 95% ของความเร็วปกติ ภายหลังจากทำการปลดแหล่งจ่ายออกจากขั้วของสเตเตอร์ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ (T_m) จะมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นสมการแรงบิดในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลงเป็นดังนี้[9],[18]

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

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

จากสมการที่ 3.10 และ 3.11 เมื่อทำการแก้สมการอนุพันธ์ (differential equation) จะได้ผลเฉลย (solution) ของสมการอยู่ในรูปแบบ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่ ω_0 = ค่าความเร็วเริ่มต้นในการหน่วงความเร็ว (rad/s)

จากสมการที่ 3.10 และ 3.11 นำสมการทั้งสองมาทำการหาผลลัพธ์ของสมการสองตัวแปร คือค่า J_m และค่า D โดยจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ดังสมการที่ 3.14

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

ผลลัพธ์ของสมการที่ 3.14 จะแสดงดังสมการที่ 3.15

$$\begin{bmatrix} J_m \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d\omega_{r1}}{dt} & \omega_{r1} \\ \frac{d\omega_{r2}}{dt} & \omega_{r2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ -J_1 \frac{d\omega_{r2}}{dt} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

ในการคำนวณสมการที่ 3.15 ให้ทำการคำนวณที่ความเร็วพิกัด

บทที่ 4

กระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการคำนวณกราฟ คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

4.1 บทนำ

จากข้อมูลแรงดัน, กระแส, และความเร็วรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสซึ่งบันทึกได้จากการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็นข้อมูลที่อยู่ในลักษณะข้อมูลดิบซึ่งไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ทันที ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการคำนวณและทำการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวเพื่อให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานได้ทันที

4.2 การคำนวณหาค่า rms ของสัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์

ข้อมูลของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่บันทึกได้ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วนั้นเป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบค่ากระแสและแรงดัน ณ เวลาใดๆ ซึ่งไม่สามารถนำมาประกอบการวิเคราะห์คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ทันที ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงข้อมูลกระแสและแรงดันดังกล่าวให้อยู่ในรูปของค่า rms เสียก่อน ซึ่งข้อมูลทั้ง 2 อย่างนั้นเป็นข้อมูลลักษณะเป็น periodic function ดังนั้นสมการในการคำนวณหาค่า rms ของข้อมูลที่เป็น periodic function แสดงดังสมการที่ 4.1

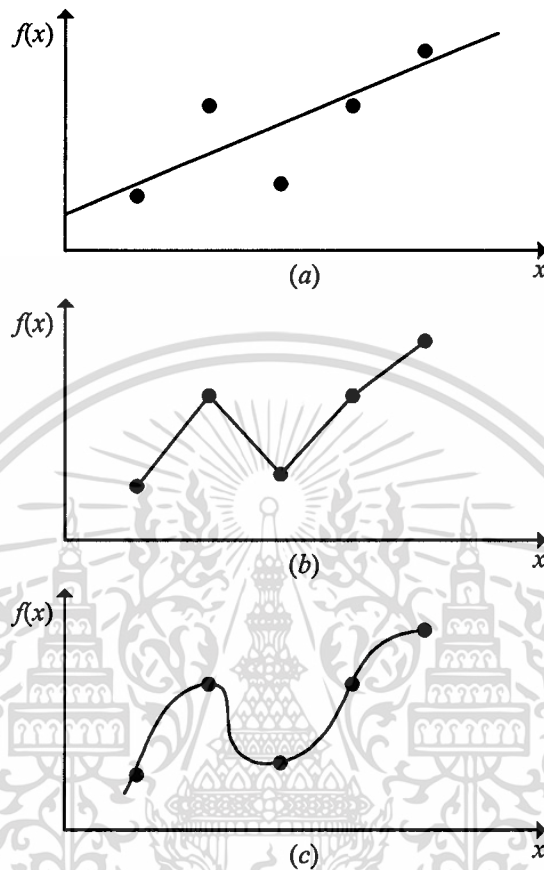
$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T} f(t)^2 dt} \quad (4.1)$$

โดยที่ F_{rms} = ค่า rms ของ periodic function
 $f(t)$ = ค่าของฟังก์ชันแปรตามเวลา
 T = คาบเวลาของ periodic function

4.3 Curve Fitting

โดยปกติแล้วในการบันทึกข้อมูลที่เป็นข้อมูลต่อเนื่องข้อมูลที่ทำกรบันทึกจะอยู่ในรูปแบบ discrete ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับแต่ง curve ของข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมวิธีการ

ในการปรับแต่ง curve ของข้อมูลให้เหมาะสมนั้นแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักได้แก่การทำ interpolation และการทำ least square regression รวมเรียกวธีการทั้ง 2 วิธีการนี้ว่า curve fitting



รูปที่ 4.1 การปรับแต่ง curve ด้วยวิธีต่างๆ (a) least-square regression (b) linear interpolation (c) curvilinear interpolation

การปรับแต่ง curve ด้วยวิธี regression หรือการหาการถดถอยของ curve เป็นการหาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลวิธีหนึ่ง เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีการกระจายของข้อมูลมากในกรณีที่มีข้อมูลที่ทำการบันทึกได้เป็นข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวน (noise) ดังนั้นแต่ละจุดของข้อมูลที่บันทึกได้ อาจจะไม่ใช่ข้อมูลที่ถูกต้องก็ได้ ดังนั้นจึงต้องทำการหาแนวโน้มของข้อมูลโดยการหาสมการถดถอย (regression equation) ของข้อมูลดังกล่าวแล้วนำมาทำการพล็อตกราฟของข้อมูลนั้นๆ การถดถอยนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ โดยแบ่งออกเป็น การถดถอยเชิงเดียว (simple regression), การถดถอยแบบเส้นตรง (multiple regression), และการถดถอยแบบเส้นโค้ง (curvilinear regression)

การปรับแต่ง curve ด้วยวิธี interpolation กระทำโดยการลากเส้นผ่านจุดข้อมูลทุกจุด วิธีการ interpolation สามารถแบ่งแยกได้เป็นอีกหลายกรณี เช่น linear interpolation, curvilinear

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

interpolation เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1b และ 4.1c จากรูปทั้งสองพบว่าหากข้อมูลที่ทำการบันทึกได้ทุกจุดไม่ใช่ค่าที่แท้จริงแล้ว(อาจเป็นสัญญาณรบกวนหรือความผิดพลาดจากการบันทึกข้อมูล) ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากวิธีนี้จะไม่ใช่ความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง ดังนั้นวิธี interpolation นี้จะเหมาะสมเฉพาะข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงสูงเท่านั้น

4.4 การถดถอย(Regression)

การถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติอย่างหนึ่งที่ใช้ในการตรวจหาหรือตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป ในงานทางด้านวิศวกรรมสามารถนำการถดถอยมาใช้ในการปรับแต่ง curve (curve fitting) เพื่อทำการหาแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามของข้อมูลจากการทดลองได้ การถดถอยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือการถดถอยเชิงเดียว (linear regression), การถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression), และการถดถอยแบบเส้นโค้ง (curvilinear regression)

การถดถอยเชิงเดียว (simple regression) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ชุดคือตัวแปรต้น 1 ชุด และตัวแปรตาม 1 ชุด โดยอยู่ในรูปฟังก์ชัน $Y = f(X)$ โดย X แทนตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ (independent variable) และ Y แทนตัวแปรตาม (dependent variable) ในกรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นเส้นตรงเรียกว่า การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (simple linear regression) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.1(a)

การถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 3 ชุดขึ้นไป โดยมีตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ 1 ชุดและตัวแปรตาม 2 ชุดขึ้นไป โดยรูปแบบของฟังก์ชันของการถดถอยเชิงซ้อนจะอยู่ในรูป $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ ในกรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นเส้นตรงเรียกว่า การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงซ้อน (multiple linear regression)

การถดถอยแบบเส้นโค้ง (curvilinear regression) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามโดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามไม่เป็นเส้นตรง ในการพิจารณาการถดถอยแบบเส้นโค้งนี้ใช้ได้ทั้งกรณีที่เป็นการถดถอยเชิงเดียว (simple regression) และการถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression)

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่ากรณีที่ข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือการทดสอบข้อมูลที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อน (error) เกิดขึ้นทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามอาจไม่ใช่ความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง หรือทำให้ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเป็นสมการได้ ดังนั้นจึงต้องทำการหาแนวโน้มของความสัมพันธ์นั้น โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างแนวโน้มที่ทำการคำนวณได้กับข้อมูลที่ได้จากการบันทึกจริงมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งวิธีการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อน (error) มีค่าน้อยที่สุดนี้เรียกว่าวิธีกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองน้อยที่สุด (least-squares method) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-squares method) มาใช้ในการหาสมการแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลต่างๆ

4.4.1 การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (Simple Linear Regression)

ในการหาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีลักษณะการจัดเรียงข้อมูลเป็นเส้นตรงจะเรียกว่าการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (simple linear regression) โดยมีสมการความสัมพันธ์ของข้อมูลของตัวแปรต้นและตัวแปรตาม $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ เป็นดังนี้

$$y = a_0 + a_1x + e \quad (4.2)$$

โดยที่ a_0 = สัมประสิทธิ์ของสมการแทนจุดตัดแกน y
 a_1 = สัมประสิทธิ์ของสมการแทนความชันของเส้นตรง
 e = ความคลาดเคลื่อน(error) ระหว่างสมการถดถอยและข้อมูลจริง

จากสมการที่ 4.2 ค่าความคลาดเคลื่อน (error) จะแทนผลต่างในแนวแกนของตัวแปรตาม โดยเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$e = y - a_0 - a_1x \quad (4.3)$$

จากสมการที่ 4.3 สามารถแยกพจน์ทางด้านขวาของสมการออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่ได้จากการบันทึกจริงคือ y และส่วนที่เป็นสมการถดถอยคือ $a_0 + a_1x$ ซึ่งมีลักษณะเป็นสมการเส้นตรงดังสมการที่ 4.4

$$\hat{y} = a_0 + a_1x \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.3 หนทางหนึ่งในการเลือกสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามคือการทำให้อายุค่าความคลาดเคลื่อน (error) มีค่าน้อยที่สุด จากสมการที่ 4.3 เมื่อแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของค่าความคลาดเคลื่อน (error) ในแต่ละจุดข้อมูลจะได้

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i) \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่าห แทนจำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด จากสมการที่ 4.5 พบว่าถ้ากำหนดให้ค่า ความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่บันทึกได้กับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากสมการถดถอยมีค่าน้อยที่สุดนั้นยังไม่เพียงพอ โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.2 (a)

จากรูปที่ 4.2(a) พบว่าเมื่อทำการ minimizes ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนให้มีค่าต่ำที่สุด แม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะให้ความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดก็จริง แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนมีทั้งค่าบวกและค่าลบ ดังนั้นในกรณีของเส้นประแดงให้เห็นถึงข้อเสียของวิธีการนี้คือให้ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเช่นกัน แต่ให้แนวโน้มที่ไม่ถูกต้อง

ในส่วนการ minimizes ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนดังแสดงในรูปที่ 4.2(b) มีสมการอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\sum_{i=1}^n |e_i| = \sum_{i=1}^n |y_i - a_0 - a_1 x_i| \quad (4.6)$$

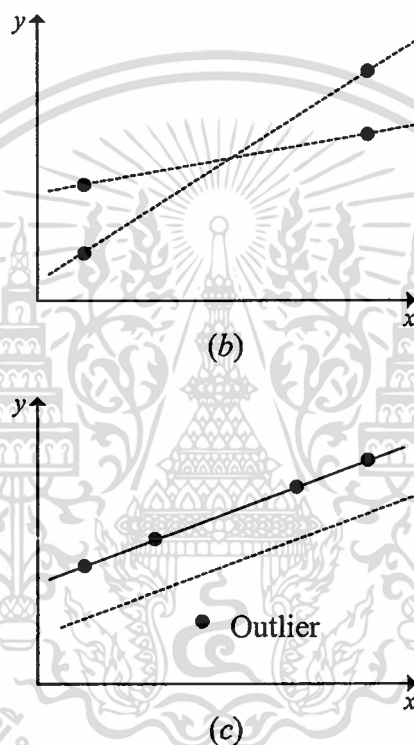
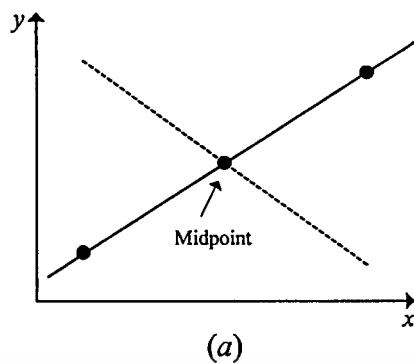
จากสมการที่ 4.6 แสดงดังรูปที่ 4.2b ซึ่งแสดงดังเส้นประทั้งสองเส้นแสดงให้เห็นว่าการฟิต curve ด้วยวิธี minimize ค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนจะให้เส้นแนวโน้มที่เหมาะสมมากกว่าหนึ่งเส้น

ส่วนวิธีการ minimax หรือการ minimizes ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากที่สุดนั้นเป็นการทำให้ระยะคลาดเคลื่อนระหว่างจุดข้อมูลที่มีการกระจายตัวออกห่างจากเส้นแนวโน้มมากที่สุดให้มีค่าน้อยที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.2(c) จากรูปดังกล่าว แนวเส้นประคือแนวเส้นแนวโน้มที่ทำการ minimax แล้วซึ่งปกติเส้นแนวโน้มที่แท้จริงควรจะเป็นเส้นทึบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามาก ๆ นั้น วิธี minimax จะให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจนัก

เพื่อที่จะกำจัดปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นจากการหาแนวโน้มของ curve ทั้ง 3 วิธี วิธีการที่เหมาะสมที่สุดคือการ minimizes ค่ากำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \quad (4.7)$$

สัญลักษณ์ SSE แทน sum of square of error หรือ unexplained sum of square



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการปรับแต่ง curve ในลักษณะต่างๆ (a) minimizes ผลรวมของค่าคลาดเคลื่อน (b) minimizes ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (c) minimizes ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าสูงที่สุด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในสมการที่ 4.3 สมการของแนวโน้มของข้อมูลจะอยู่ในรูปของ $a_0 + a_1x$ ดังนั้นเป้าหมายที่สำคัญคือการหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 โดยการทำให้ partial derivative สมการที่ 4.7 เทียบกับตัวแปรทั้งสองตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\frac{\partial SSE}{\partial a_0} &= -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i) \\ \frac{\partial SSE}{\partial a_1} &= -2 \sum [(y_i - a_0 - a_1 x_i) x_i]\end{aligned}\quad (4.8)$$

จากสมการที่ 4.8 เพื่อทำการหาค่าต่ำสุดดังนั้นค่า derivative จะต้องเท่ากับ 0 ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}0 &= \sum y_i - \sum a_0 - \sum a_1 x_i \\ 0 &= \sum y_i x_i - \sum a_0 x_i - \sum a_1 x_i^2\end{aligned}\quad (4.9)$$

จากสมการที่ 4.9 ค่า $\sum a_0$ มีค่าเท่ากับ na_0 ดังนั้นเมื่อทำการย้ายข้างสมการและจัดให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมจะได้

$$na_0 + (\sum x_i) a_1 = \sum y_i \quad (4.10)$$

$$(\sum x_i) a_0 + (\sum x_i^2) a_1 = \sum x_i y_i \quad (4.11)$$

จากสมการที่ 4.10 และสมการที่ 4.11 เมื่อทำการแก้สมการทั้งสองจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 ดังนี้

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (4.12)$$

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.13)$$

4.4.2 การถดถอยแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียล (Polynomial Regression)

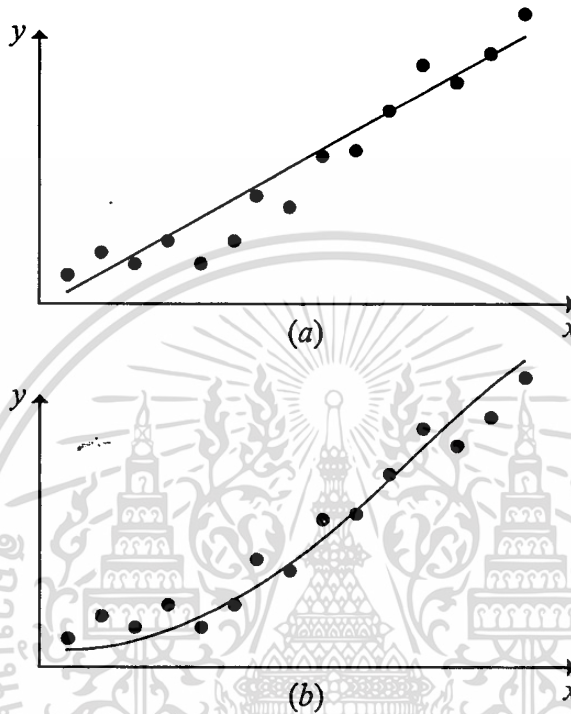
ข้อมูลทางด้านวิศวกรรมโดยทั่วไปแล้วส่วนมากจะไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นการหาแนวโน้มข้อมูลโดยการแทนด้วยสมการเส้นตรงนั้นยังไม่เพียงพอต่อการจัดเรียงตัวของข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยจากรูปที่ 4.3(a) กราฟแนวโน้มที่ได้จากสมการถดถอยแบบเส้นตรง (linear regression equation) ยังไม่เพียงพอต่อการจัดเรียงตัวของข้อมูลเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.3(b) ซึ่งเป็นกราฟแนวโน้มที่ได้จากสมการถดถอยแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียล (polynomial regression) ซึ่งการถดถอยที่เป็นในลักษณะเส้นโค้งแบบโพลีโนเมียลนี้เรียกว่า polynomial regression ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression) ดังตัวอย่างสมการโพลีโนเมียลกำลังสองคือ

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + e \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + e \quad (4.15)$$

จากสมการที่ 4.14 ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการพหุนามกำลังสองเมื่อเปรียบเทียบกับสมการเชิงเส้นแบบหลายตัวแปรดังสมการที่ 4.15 โดยที่ $x \equiv x_1$ และ $x^2 \equiv x_2$



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการถดถอย (a) linear regression, (b) polynomial regression

สมการทั่วไปของเส้นโค้งพหุนาม

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e \quad (4.16)$$

m แทนเลขชี้กำลังสูงสุดของพหุนามจากสมการที่ 4.16 สมการถดถอยแบบพหุนามคือ $a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$ ซึ่งค่ากำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในรูปแบบคล้ายกับกรณีเส้นตรง

$$\hat{y} = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (4.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 4.17 เมื่อพิจารณาที่เลขชี้กำลังของสมการโพลีโนเมียลพบว่าถ้าเลขชี้กำลังสูงสุดของโพลีโนเมียลมีค่าเท่ากับ 1 แล้วสมการดังกล่าวจะกลายเป็นสมการถดถอยแบบเส้นตรงโดยทันที

จากสมการที่ 4.16 ผลต่างกำลังสองของข้อมูลจริงและข้อมูลจากสมการถดถอยคือ

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_m x_i^m)^2 \quad (4.18)$$

ในการหาสัมประสิทธิ์ของสมการโพลีโนเมียลจะอยู่ในรูปแบบ

$$\begin{aligned} \frac{\partial SSE}{\partial a_0} &= -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_m x_i^m) \\ \frac{\partial SSE}{\partial a_1} &= -2 \sum x_i (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_m x_i^m) \\ \frac{\partial SSE}{\partial a_2} &= -2 \sum x_i^2 (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_m x_i^m) \\ &\dots \\ \frac{\partial SSE}{\partial a_m} &= -2 \sum x_i^m (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_m x_i^m) \end{aligned} \quad (4.19)$$

จากสมการที่ 4.19 กำหนดให้ผลการคำนวณหาสมการอนุพันธ์เท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อจัดรูปแบบสมการที่ 4.19 ใหม่จะได้สมการที่ 4.20

$$\begin{aligned} (n)a_0 + (\sum x_i)a_1 + (\sum x_i^2)a_2 + \dots + (\sum x_i^m)a_m &= \sum y_i \\ (\sum x_i)a_0 + (\sum x_i^2)a_1 + (\sum x_i^3)a_2 + \dots + (\sum x_i^{m+1})a_m &= \sum x_i y_i \\ (\sum x_i^2)a_0 + (\sum x_i^3)a_1 + (\sum x_i^4)a_2 + \dots + (\sum x_i^{m+2})a_m &= \sum x_i^2 y_i \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\dots$$

$$(\sum x_i^m)a_0 + (\sum x_i^{m+1})a_1 + (\sum x_i^{m+2})a_2 + \dots + (\sum x_i^{m+m})a_m = \sum x_i^m y_i$$

จากสมการที่ 4.20 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าคือ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ เพื่อทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวสามารถทำได้โดยการแก้สมการ m ตัวแปรโดยจำนวนสัมประสิทธิ์จะขึ้นกับค่าเลขชี้กำลังสูงสุดของสมการโพลีโนเมียล

4.4.3 การพิจารณาความเหมาะสมของสมการถดถอย

ในการหาแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองชุดคือตัวแปรต้นและตัวแปรตามโดยการใช้ least-square regression นั้นเพื่อให้ได้แนวโน้มที่ใกล้เคียงความจริงที่สุด ต้องมีการพิจารณาความเหมาะสมของสมการที่นำมาใช้แสดงแนวโน้มของข้อมูลดังกล่าวด้วย วิธีการหนึ่งคือการพิจารณาการกระจายของข้อมูลรอบๆเส้นสมการถดถอยโดยค่าดังกล่าวเรียกว่า standard error of estimate ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{SSE}{n - (m + 1)}} \quad (4.21)$$

โดยที่ค่า n แทนจำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด, m แทนเลขชี้กำลังสูงสุดของสมการพหุนาม และค่า $n - (m + 1)$ เรียกว่าระดับความเป็นอิสระ (degree of freedom) (ภาคผนวก ก) ซึ่งแทนจุดที่เป็นอิสระดั่งนั้นในกรณีที่เป็นสมการเส้นตรงค่า standard error of estimate จะมีค่าเท่ากับค่า standard deviation ของตัวอย่างของประชากร และจะมีค่าระดับความเป็นอิสระเท่ากับ $n - 2$

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{SSE}{n - 2}} \quad (4.22)$$

ในการพิจารณาค่า standard error of estimate ถ้าหากว่าค่าที่ได้มีค่าต่ำแสดงว่ามีการกระจายข้อมูลรอบเส้นสมการถดถอยต่ำ แต่ถ้าหากว่าค่าที่ได้มีค่าสูงแสดงว่ามีการกระจายของข้อมูลรอบๆเส้นสมการถดถอยสูงเช่นกัน วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการหนึ่งในการพิจารณาความเหมาะสมในการเลือกสมการถดถอยเพื่อใช้ในการ fit curve

ในการพิจารณาด้วยค่า standard error of estimate ($S_{y/x}$) ยังไม่เพียงพอสำหรับการกำหนดว่าสมการถดถอยใดเหมาะสมสำหรับนำมาแทนแนวโน้มของความสัมพันธ์ของข้อมูลที่สุด ดังนั้นจึงมีวิธีการพิจารณาอีกวิธีคือการใช้ค่า coefficient of determination ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ r^2 มาใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมของสมการถดถอยที่ใช้สำหรับแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองชุดโดยค่า r^2 มีรูปแบบสมการดังนี้

$$r^2 = \frac{SSY - SSE}{SSY} \quad (4.23)$$

จากสมการที่ 4.23 ค่า SSY คือค่า total sum of square about the mean หรือ total unexplained variation ซึ่งค่า SSY มีรูปแบบสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SSY = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.24)$$

ในส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSY และค่า SSE แสดงดังสมการ

$$(SSY - SSE) = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (4.25)$$

ดังนั้นเมื่อจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบของค่าตัวแปรตาม y จะได้

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.26)$$

ดังนั้นค่า r^2 เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของค่า y จะได้

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.27)$$

ค่า r^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าค่า r^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 มากเท่าใดแสดงว่า curve ที่ได้จากสมการถดถอยนั้นมีความเหมาะสมในการแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองชุดมาก แต่ถ้าหากว่าค่า r^2 มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า curve ที่ได้จากสมการถดถอยดังกล่าวไม่เหมาะสมสำหรับการแสดงแนวโน้มของข้อมูลนั้นๆ

ในกรณีที่สมการถดถอยเป็นสมการโพลีโนเมียล เมื่อต้องการหาสมการโพลีโนเมียลที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการ fit curve นั้น การใช้ค่า r^2 ยังไม่เพียงพอสำหรับการทำการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบเพื่อยืนยันความเหมาะสมของสมการถดถอยแบบโพลีโนเมียลที่นำมาใช้ในการแสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ของข้อมูลดังกล่าวเพิ่มขึ้น โดยการทำให้ Partial F Test มีวิธีการทดสอบดังนี้

จากสมการที่ 4.25 กำหนดให้

$$\text{regression SS} = (SSY - SSE) = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (4.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกสมการที่ 4.28 ว่า regression sum of square ในการพิจารณาหาค่าดีกรีสูงสุดที่เหมาะสมที่จะใช้ในแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองชุดโดยการเพิ่มดีกรีของโพลีโนเมียลไปครั้งละ 1 ดีกรีและทำการทดสอบว่าดีกรีที่เพิ่มขึ้นมามีนัยสำคัญมากกว่ากรณีไม่เพิ่มดีกรีหรือไม่ โดยในการทำการทดสอบ Partial F Test นี้ ต้องทำการหาค่า extra sum of square โดยค่าดังกล่าวอยู่ในรูป

$$SS(x^{m+1} | x, x^2, \dots, x^m) = SS(x, x^2, \dots, x^m, x^{m+1}) - SS(x, x^2, \dots, x^m) \quad (4.29)$$

จากสมการที่ 4.29 พจน์ทางด้านซ้ายของสมการ $SS(x^{m+1} | x, x^2, \dots, x^m)$ แทน extra sum of square เมื่อมีการเพิ่มดีกรีให้แก่โพลีโนเมียลซึ่งเดิมมีดีกรีสูงสุดเท่ากับ m ให้เพิ่มเป็น $m+1$

นอกจากค่า regression SS ต้องทำการหาค่า MS residual หรือค่า mean-square residual สำหรับโมเดลของความสัมพันธ์ของแต่ละดีกรีของโพลีโนเมียล โดยสมการของค่า MS residual อยู่ในรูป

$$MS \text{ residual}(x, x^2, \dots, x^m) = \frac{\text{residual } SS(x, x^2, \dots, x^m, x^{m+1}) + SS(x^{m+1} | x, x^2, \dots, x^m)}{df_{\text{res}} + 1} \quad (4.30)$$

df_{res} = ค่าระดับความเป็นอิสระของ residual

จากนั้นทำการหาทดสอบหาค่า F โดยสมการ

$$F(x^{m+1} | x, x^2, \dots, x^{m+1}) = \frac{SS(x^{m+1} | x, x^2, \dots, x^m) / 1}{MS \text{ residual}(x, x^2, \dots, x^m, x^{m+1})} \quad (4.31)$$

จากสมการที่ 4.31 นำค่า F ที่ได้มาทำการทดสอบสมมติฐาน (hypothesis test) โดยขั้นแรกต้องกำหนดช่วงความเชื่อมั่น (confident interval) ไว้และตั้งสมมติฐานหลัก H_0 และสมมติฐานทางเลือก H_1 ดังนี้

H_0 : x^{m+1} ไม่มีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มเข้าไปในสมการโพลีโนเมียล

H_1 : x^{m+1} มีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มเข้าไปในสมการโพลีโนเมียล

วิธีการทดสอบโดยการตรวจสอบค่าความน่าจะเป็นโดยพิจารณาจากพื้นที่ใต้กราฟของเส้นโค้งการกระจายแบบ F (F distribution curve)

โดยปกติแล้วจะกำหนดช่วงความเชื่อมั่นไว้ 95% ซึ่งถ้าหากว่าค่าความน่าจะเป็นที่ได้มีค่าน้อยกว่า 5% หรือน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า H_1 เป็นจริงแสดงว่า x^{m+1} มีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มเข้าไปใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการโพลีโนเมียล แต่ถ้าค่าความน่าจะเป็นที่ได้มีค่ามากกว่า 5% หรือมากกว่า 0.05 แสดงว่า H_0 เป็นจริงแสดงว่า x^{m+1} ไม่มีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มเข้าไปในสมการโพลีโนเมียล

ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ถ้าทำการเพิ่มเลขชี้กำลังเข้าไปจนกระทั่งค่าความน่าจะเป็นมากกว่า 0.05 แล้วให้หยุดและเลขชี้กำลังสูงสุดของสมการจะเป็นค่าสุดท้ายที่ให้ค่าความน่าจะเป็นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05

4.4.4 การถดถอยแบบเส้นโค้งที่สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้นได้

นอกจากการถดถอยแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียล (polynomial regression) ยังมีสมการเส้นโค้งในรูปแบบอื่นซึ่งโดยรูปแบบที่นำเสนอนี้จะสามารถเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้ ยกตัวอย่างเช่น exponential equation, power equation, และ saturation-growth-rate equation ดังแสดงในสมการที่ 4.32, 4.33, และ 4.44 ตามลำดับ

$$y = ae^{bx} \quad (4.32)$$

$$y = ax^b \quad (4.33)$$

$$y = a \frac{x}{b+x} \quad (4.34)$$

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีสมการที่ต้องใช้สมการในรูปแบบของสมการที่ 4.32 คือสมการที่ 3.12 และ 3.13 จากสมการที่ 4.32 การที่จะจัดรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นสามารถทำได้โดยการหาค่าลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm) ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\ln y = \ln a + bx \ln e \quad (4.35)$$

จากสมการที่ 4.35 ค่า $\ln e = 1$ ดังนั้นสมการที่ 4.35 จะกลายเป็น

$$\ln y = \ln a + bx \quad (4.36)$$

จากสมการที่ 4.35 และ 4.36 เมื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 4.4

หลังจากทำการแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงแล้วจากนั้นทำการปรับแต่ง curve ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-square method) โดยทำการหาสมการถดถอยเส้นตรงดังแสดงในหัวข้อที่ 4.4.1 ซึ่งจะได้สมการอยู่ในรูป

$$\hat{y} = a_0 + a_1x \quad (4.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

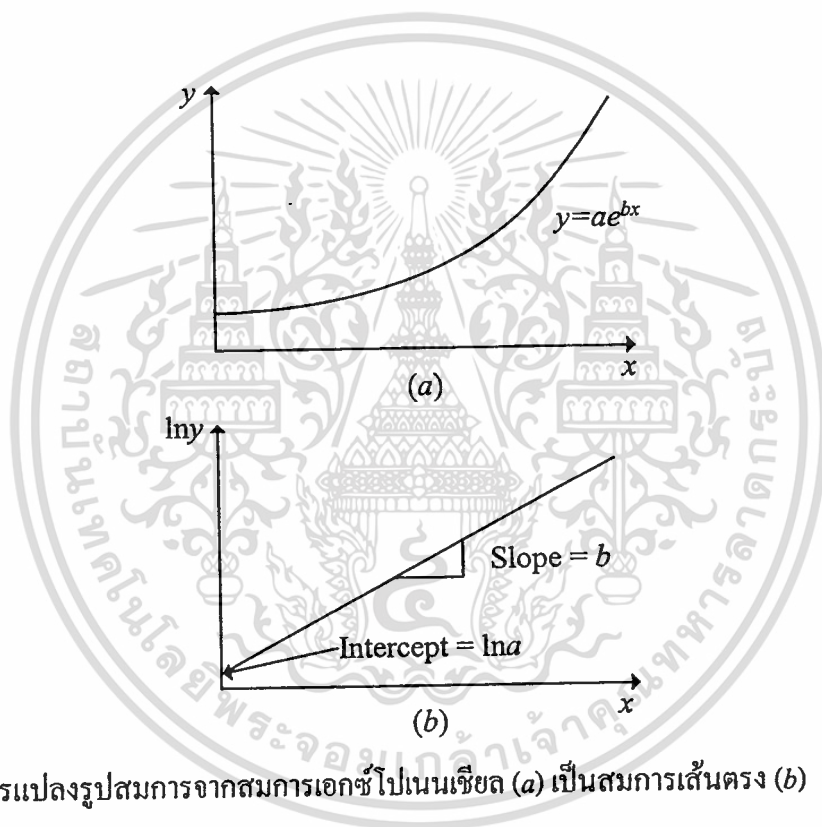
จากนั้นใช้ least square regression ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 เมื่อได้ค่า a_0 และ a_1 นำค่าดังกล่าวไปแทนในสมการที่สมการที่ 4.36 โดย

$$a_0 = \ln a \quad (4.38)$$

$$a_1 = b \quad (4.39)$$

$$\hat{y} = \ln y \quad (4.40)$$

จากนั้นทำการหาฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลของสมการที่ 4.36 จะได้สมการแนวโน้มของข้อมูลดิบที่ต้องการพิต



รูปที่ 4.4 การแปลงรูปสมการจากสมการเอกซ์โปเนนเชียล (a) เป็นสมการเส้นตรง (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 บทนำ

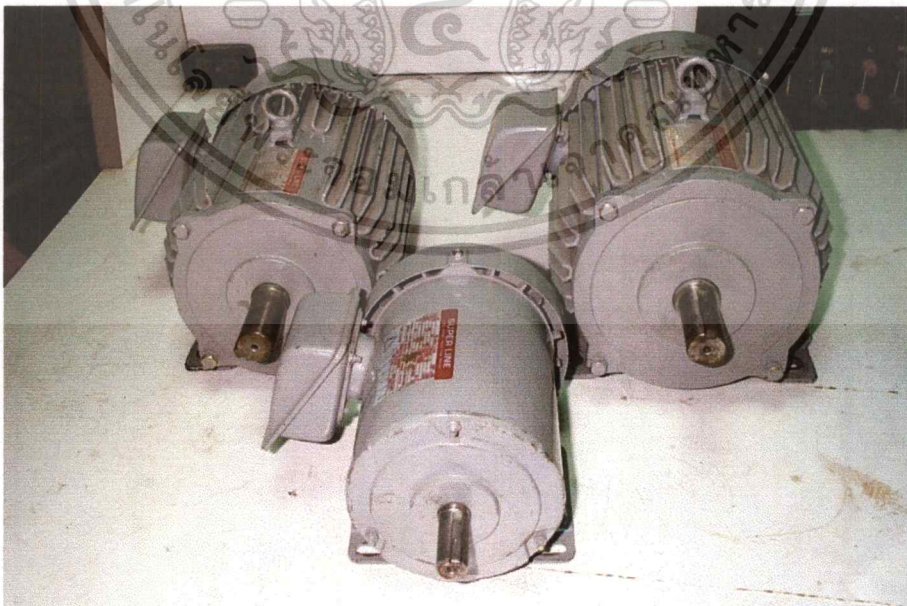
ในการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็ว (acceleration method) และ วิธีการหน่วงความเร็ว (retardation method) เป็นหลักซึ่งวิธีการดังกล่าวได้มีระบุไว้ใน IEEE standard 112-1996 [1] และ IEC standard 34-2 [2] ตามลำดับ

ในบทนี้จะนำเสนอการทดสอบ ผลการทดสอบในรูปแบบต่างๆและการคำนวณหาคุณลักษณะแรงบิดความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำพร้อมคุณลักษณะอื่นๆด้วย

5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

5.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (3 Phase Induction Motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกสร้างขึ้นโดยอ้างอิงมาตรฐาน JIS C4004 เป็นมอเตอร์ประเภท totally enclosed fan cool (TEFC) โดยมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 3 ขนาดคือ 1, 3, และ 5 แรงม้า ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 มอเตอร์ขนาด 1, 3, และ 5 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พิกัดต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ

พิกัด กำลัง (Hp)	พิกัด แรงดัน (V)	พิกัด กระแส (A)	พิกัด ความเร็วรอบ (rpm)	พิกัด แรงบิด (N-m)
1	220/380	3.4/2.0	1400	5.0884
3	220/380	8.7/5.0	1420	15.0502
5	220/380	13.7/7.9	1420	25.0837

5.2.2 DC Tachogenerator

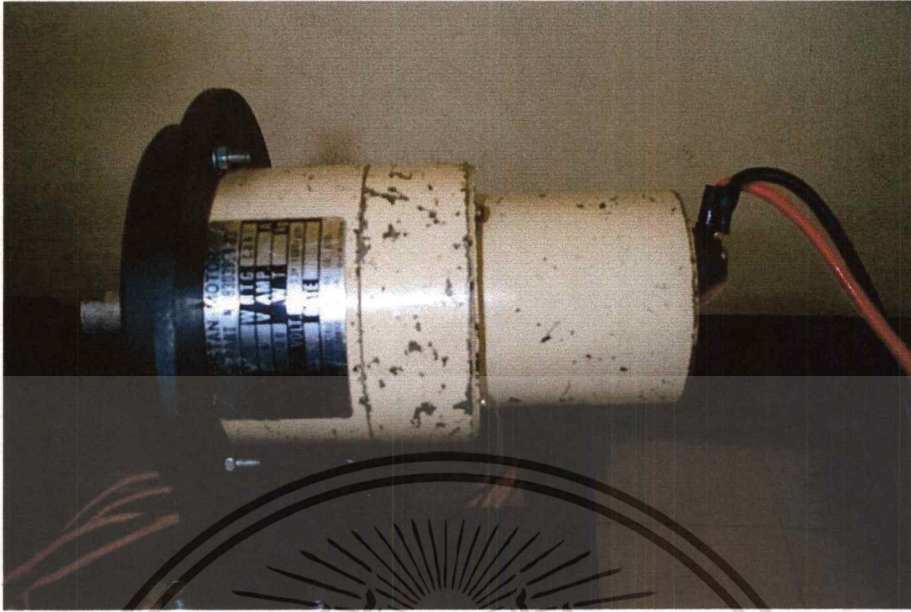
DC Tachogenerator เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงโดยประเภทหนึ่ง โดย DC Tachogenerator ที่นำมาใช้สำหรับทดสอบเป็นประเภทที่มีแปร่งถ่านโดยสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความเร็วยรอบของ DC Tachogenerator แสดงดังสมการที่ 5.1

$$v = k\omega \quad (5.1)$$

โดยที่ v = แรงดันเอาต์พุตของ DC Tachogenerator (V)
 k = ค่าคงที่การแปรผันระหว่างแรงดันและอัตราเร็วเชิงมุม (V/(rad/s))
 ω = อัตราเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/s)

ในการทดสอบหาค่าคงที่การแปรผันดังกล่าวคำนวณจากการเปรียบเทียบกับ incremental encoder ที่มีความละเอียด 1000 pulse/rev โดยทำการทดสอบที่ความเร็วในสภาวะคงตัวแล้วนำค่าความเร็วรอบที่ได้จาก incremental encoder มาคำนวณเปรียบเทียบกับระดับแรงดันที่ได้จาก DC Tachogenerator

DC Tachogenerator ที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่าคงที่การแปรผันระหว่างแรงดันและอัตราเร็วเชิงมุมประมาณ 0.0297 (V/(rad/s))



รูปที่ 5.2 DC Tachogenerator ที่ใช้ในการทดสอบ

5.2.3 ล้อช่วยแรง (Flywheel)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยหลายขนาดเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกัน โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.2 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, และมวลของล้อช่วยแรงที่ใช้ทำการทดสอบ

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ของล้อช่วยแรง ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง (m)	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 5.3 ล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ

5.2.4 Analyzing Recorder

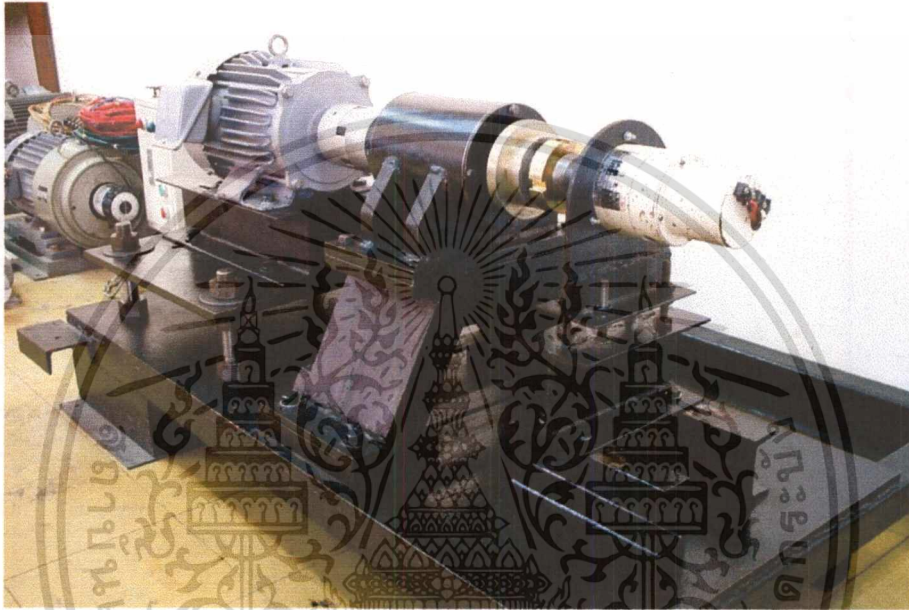
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลแรงดัน, กระแส, ความเร็วรอบ, และเวลาที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้ง รูปแบบของ analyzing recorder แสดงดังรูปที่ 5.4



เอกสารรูปที่ 5.4 Analyzing Recorder ที่ใช้ในการทดสอบศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5 แทนสำหรับทดสอบมอเตอร์

เนื่องจากการทดสอบมอเตอร์ด้วยวิธีเร่งความเร็วโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยมีโอกาสเกิดอันตรายสูง และการใช้ล้อยช่วยแรงมาค้ำปลีกับเพลลาของมอเตอร์โดยตรงซึ่งเป็นไปได้ยากเนื่องจากไม่มีจุดที่ใช้ล้อยช่วยแรงให้ติดกับเพลลา ดังนั้นจึงต้องมีแทนทดสอบเพื่อใช้สำหรับเป็นจุดติดตั้งมอเตอร์ และชุดเพลลาที่ใช้สำหรับติดตั้งล้อยช่วยแรง โดยที่ปลายทั้งสองข้างของชุดเพลลานี้จะค้ำปลีอยู่กับมอเตอร์เหนียวนาและ DC Tachogenerator ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แทนสำหรับทำการทดสอบมอเตอร์เหนียวนา

5.3 วิธีการทดสอบ

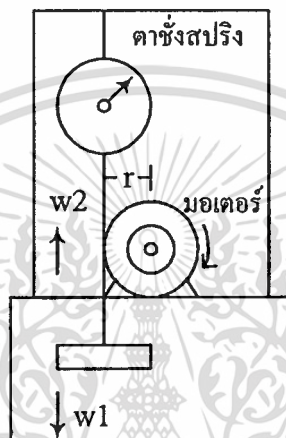
ในการทดสอบได้ทำการต่อมอเตอร์เป็นแบบสตาร์โดยทำการต่อแหล่งจ่ายผ่าน analyzing recorder เพื่อบันทึกข้อมูลต่างๆก่อนที่จะเข้าสู่มอเตอร์ โดยโคะแกรมการต่อวงจรสำหรับทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.6 ในการทดสอบต้องจะมีการทดสอบหลักอยู่ 2 ประเภทคือ การทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็วและการทดสอบด้วยวิธีการหน่วงความเร็ว ภายหลังจากการทดสอบทั้ง 2 แล้ว ต้องทำการทดสอบล้อยโรเตอร์เพื่อทำการหาค่าแรงบิดในขณะที่ความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับศูนย์ และทำการทดสอบภาระเพื่อหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงความเร็วพิกัดถึงความเร็วในสภาวะไร้ภาระ (no-load) ซึ่งมีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัสโดยการทดสอบทั้งสองอย่างนี้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบและเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือได้ของกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนียวนาจากการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็ว โดยรายละเอียดของการทดสอบทั้งหมดสามารถแจกแจงได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ในการทดสอบนั้นต้องทำการบันทึกข้อมูลแรงดัน, กระแส, ความเร็วรอบ, และเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed)

5.3.3 การทดสอบภาระของมอเตอร์ (Load Test)

ในการทดสอบภาระของมอเตอร์ทำการทดสอบโดยการใส่ภาระให้แก่มอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การทดสอบภาระของมอเตอร์

จากรูปที่ 5.7 ในการคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์หนึ่งขั้วนำโดยการทดสอบภาระของมอเตอร์นั้นสามารถคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์โดยอาศัยสมการที่ 5.1

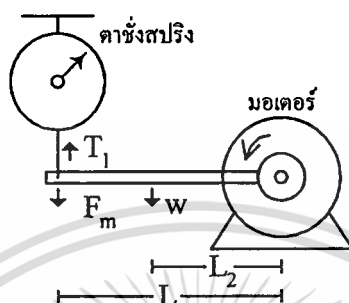
$$T = (w1 - w2) \times g \times r \quad (5.1)$$

- โดยที่
- T = แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)
 - $w1$ = มวลภาระที่ทดสอบ (kg)
 - $w2$ = ค่าแรงที่อ่านได้จากตาชั่ง (kg)
 - r = รัศมีของมู่เก้ (m)
 - g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกมีค่าเท่ากับ 9.81 (m/s²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 การทดสอบล๊อคโรเตอร์ (Locked Rotor Test)

ในการทดสอบล๊อคโรเตอร์สำหรับงานวิจัยนี้ต้องทำการล๊อคโรเตอร์ที่แรงดันพิกัดโดยทำการต่อแกนของแรงยาว 1 เมตรเข้ากับเพลาและตาชั่งสปริง จากนั้นนำขนาดของแรงที่อ่านได้จากตาชั่งมาคำนวณตามสมการในการหาค่าโมเมนต์ของแรงดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 การทดสอบล๊อคโรเตอร์

จากรูปที่ 5.8 เป็นภาพจำลองการทดสอบหาแรงบิดที่สภาวะล๊อคโรเตอร์โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาแรงบิดเป็นดังต่อไปนี้

$$F_m \times L = (T_1 \times L) - (w \times L_2) \quad (5.2)$$

โดยที่ F_m = แรงเนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์ (N)

T_1 = ค่าแรงดึงเชือกที่อ่านได้จากตาชั่งสปริง (N)

w = น้ำหนักของแกนสองแรง (N)

L = ระยะจากศูนย์กลางของมอเตอร์ถึงตำแหน่งของตาชั่งสปริง (m)

L_2 = ระยะจากศูนย์กลางของมอเตอร์ถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของแกนของแรง (m)

จากสมการที่ 5.2 ค่าแรงบิดที่สภาวะล๊อคโรเตอร์ (locked rotor torque) สามารถคำนวณจากสมการ $T_m = F_m \times L$ โดยมีหน่วยเป็นนิวตัน-เมตร (N-m)

*หมายเหตุ ในกรณีที่แกนของแรงทำมุม θ กับพื้นให้นำค่า $\cos\theta$ คูณเข้าทางด้านขวาของสมการที่ 5.2 เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

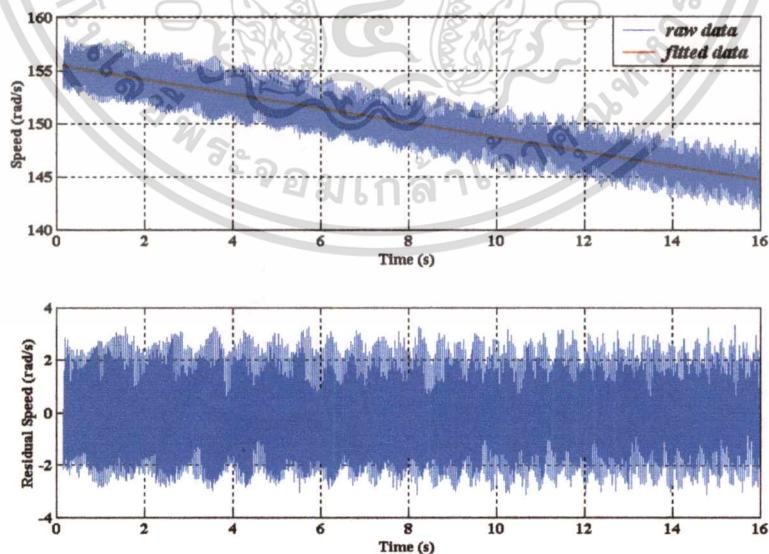
5.4 ผลการทดสอบ

5.4.1 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation Test)

ผลการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็วจะได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของระบบทดสอบ

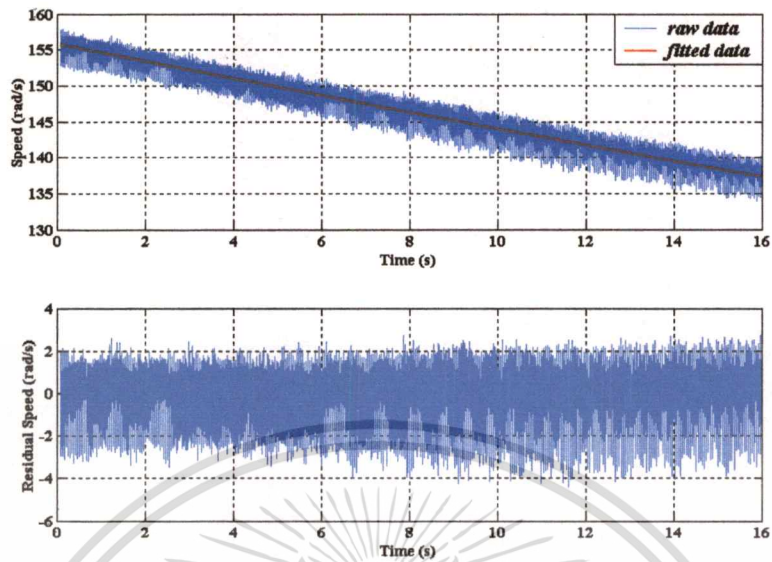
ตารางที่ 5.3 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของระบบทดสอบที่ได้จากการทดสอบหน่วงความเร็ว

ขนาดของมอเตอร์ (Hp)	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด ($\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})$)
1	0.0028	0.0042
3	0.0056	0.0042
5	0.0101	0.0053

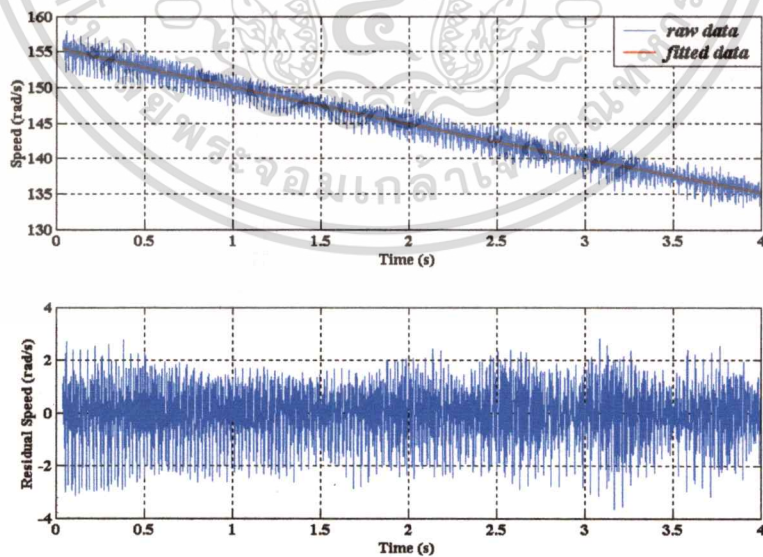


รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด $1.0093 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

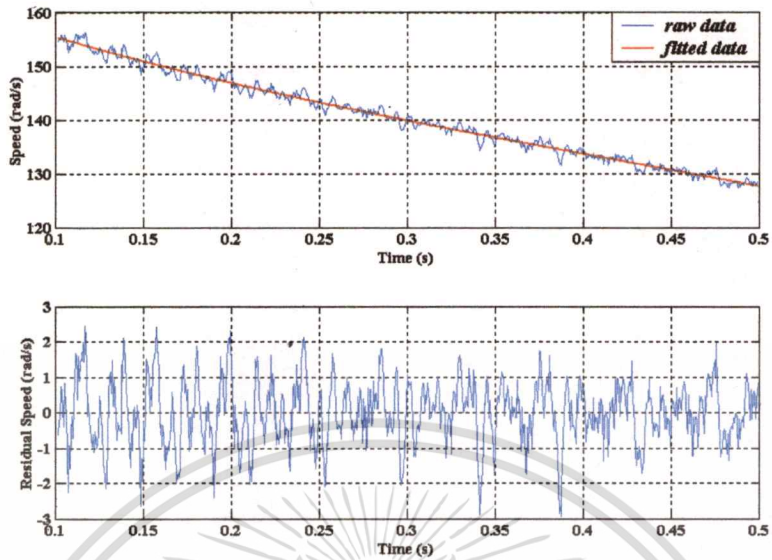


รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วย
แรงขนาด 0.5054 kg-m^2

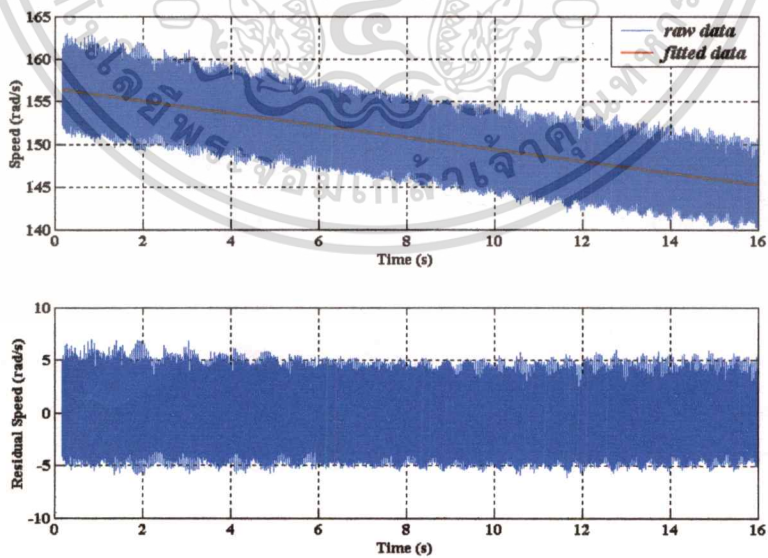


รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วย
แรงขนาด 0.0994 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

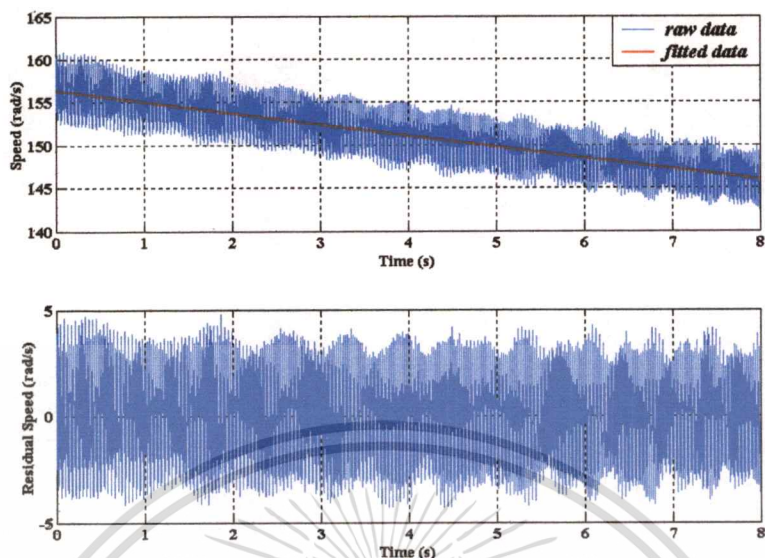


รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบโดยไม่เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์

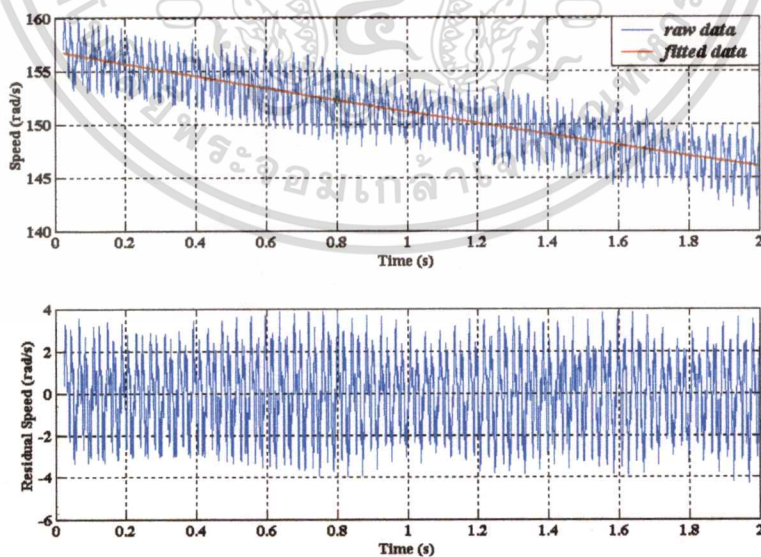


รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วย แรงขนาด 1.0093 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

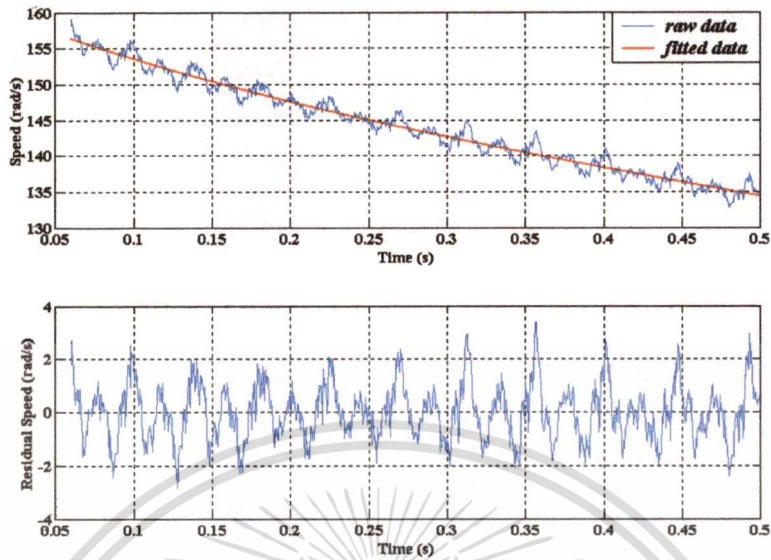


รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วย
แรงขนาด 0.5054 kg-m^2

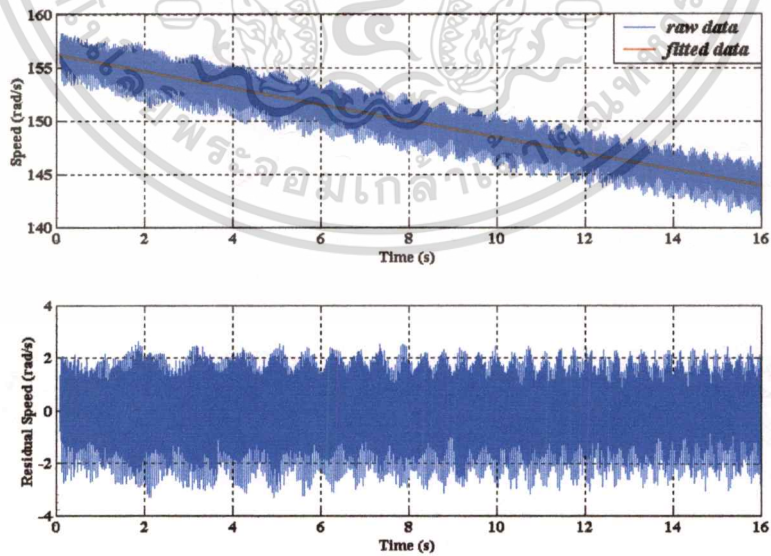


รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วย
แรงขนาด 0.0994 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

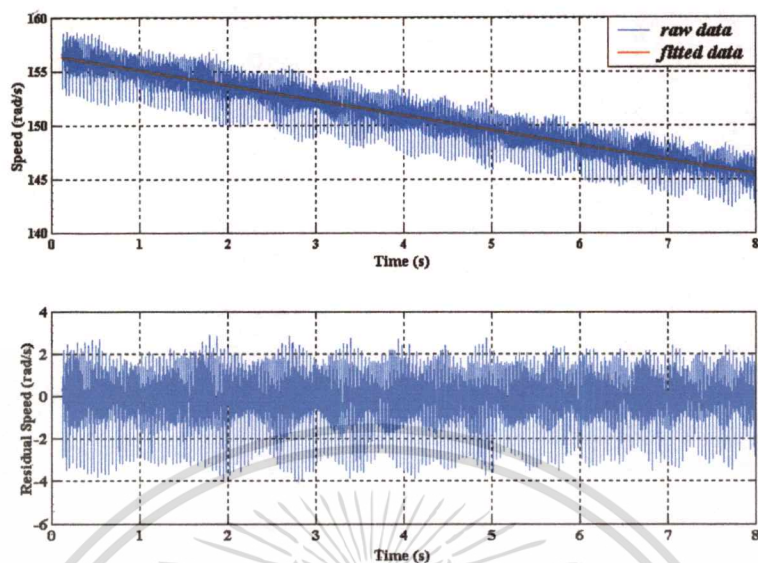


รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบโดยไม่เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์

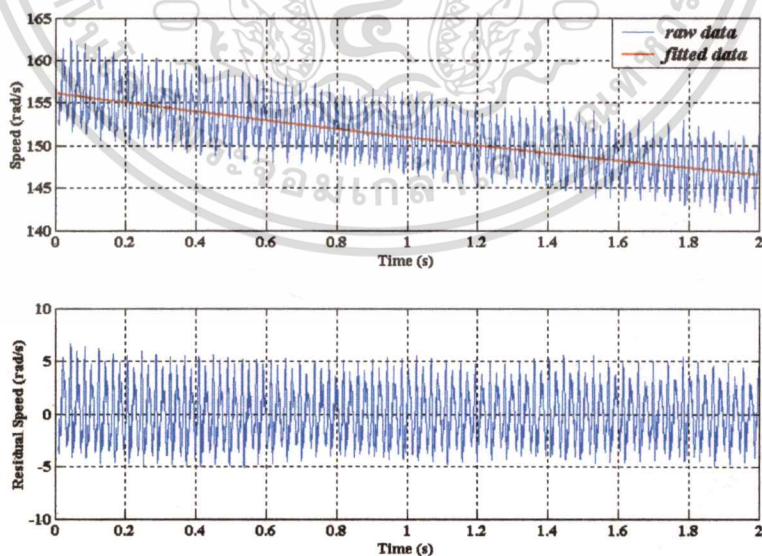


รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

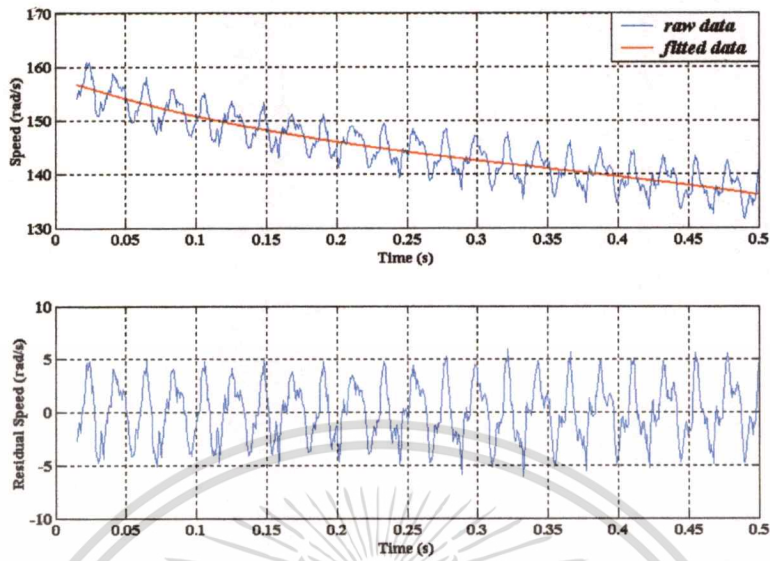


รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วย
แรงขนาด 0.5054 kg-m^2



รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วย
แรงขนาด 0.0994 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

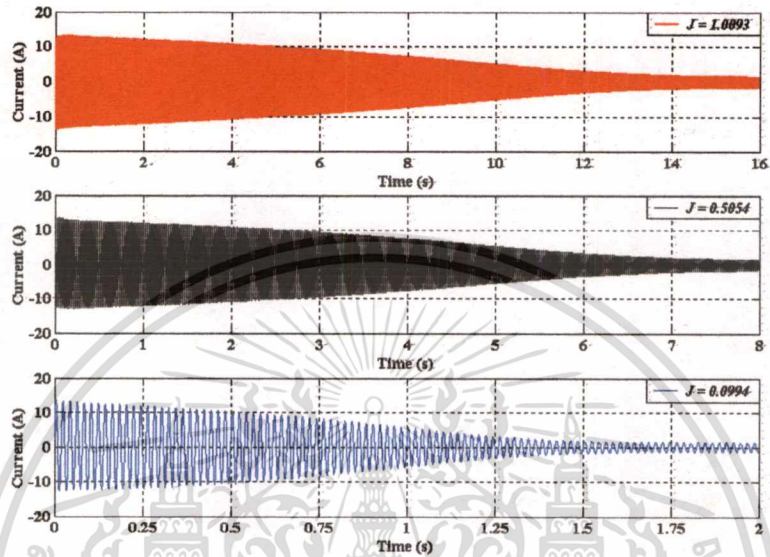


รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบโดยไม่เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์

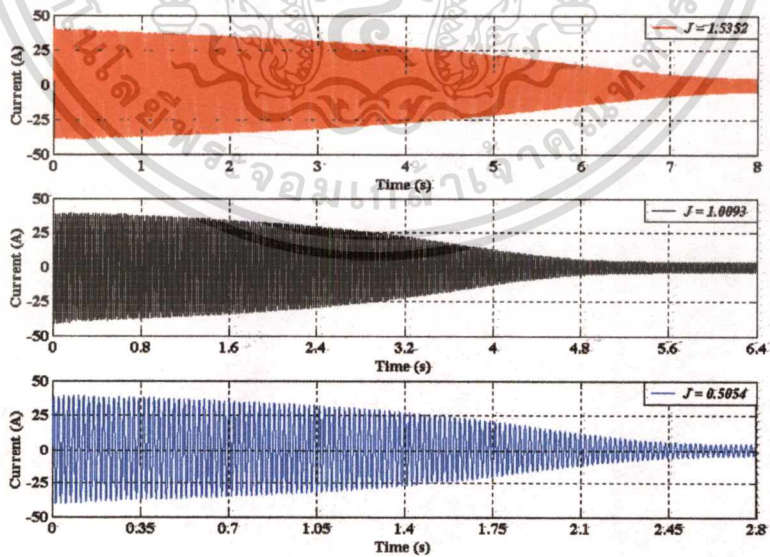
จากผลการทดลองในรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.20 เป็นการทดสอบด้วยวิธีห้วงความเร็ว (retardation test) ซึ่งแต่ละรูปแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลงโดยเส้นสีแดงในแต่ละรูปเป็นเส้นแนวโน้มการลดความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ least square regression โดยพล็อตร่วมกับข้อมูลจริง ส่วนรูปด้านล่างจะเป็นค่า error ที่ได้จากผลต่างระหว่างข้อมูลจริงกับค่าที่ได้จากสมการแนวโน้ม ซึ่งการพิจารณาความเหมาะสมของเส้นแนวโน้มสามารถพิจารณาจากความสมมาตรของข้อมูล error ได้ ภายหลังได้เส้นแนวโน้มของแต่ละการทดสอบแล้วเมื่อนำมาทำการคำนวณตามสมการที่ 3.10 และ 3.11 โดยทำการแก้สมการ 2 ตัวแปรตามสมการที่ 3.14 จะได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ (J_m) และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด (D) ของระบบทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.3

5.4.2 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration Test)

5.4.2.1 รูปคลื่นกระแสของมอเตอร์ขนาดต่างๆในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว

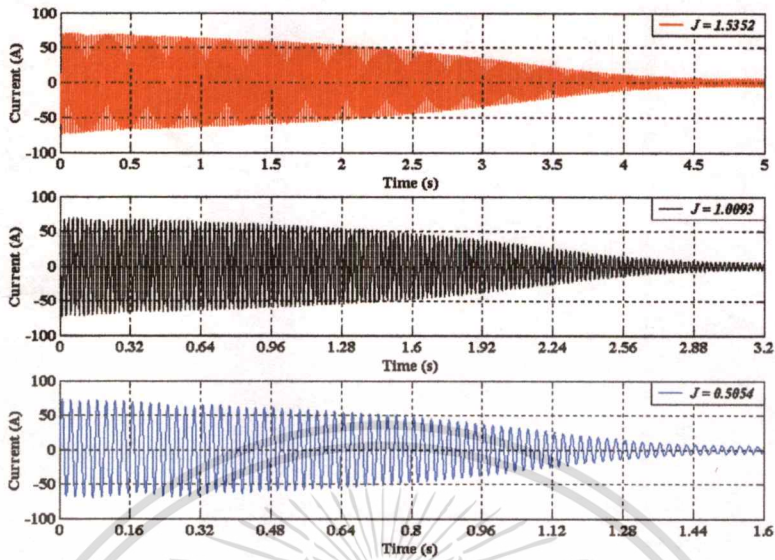


รูปที่ 5.21 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาดต่างกัน



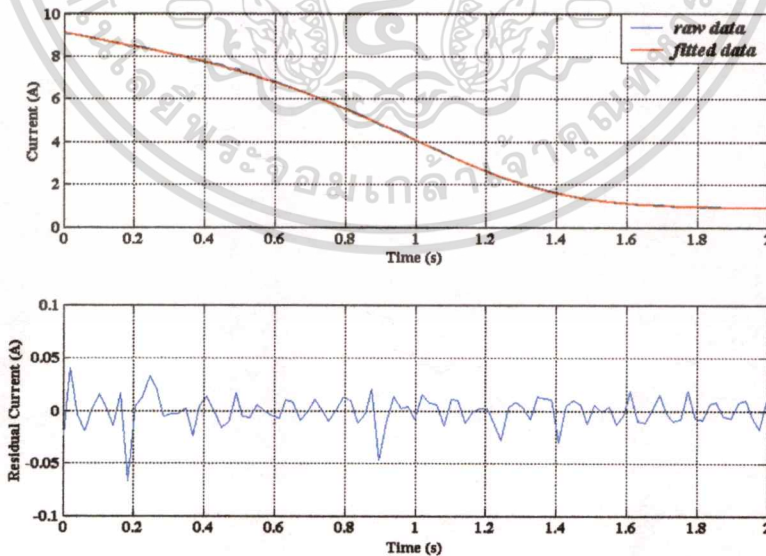
รูปที่ 5.22 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาดต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



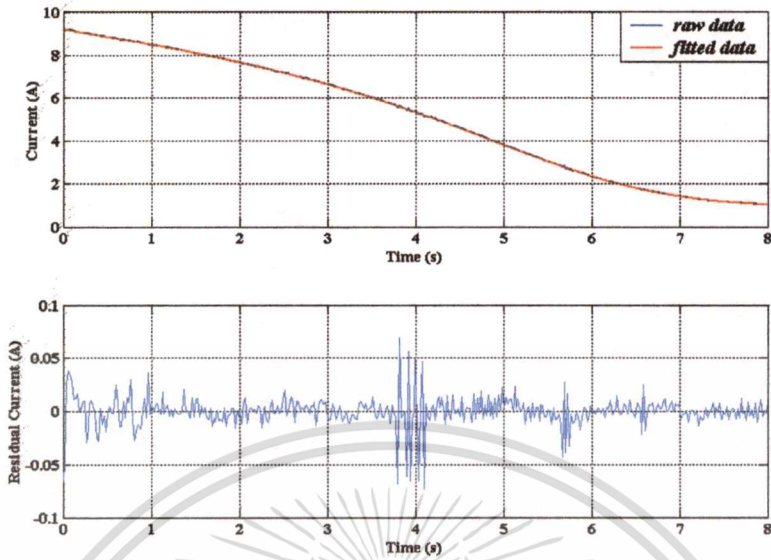
รูปที่ 5.23 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาดต่างกัน

5.4.2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า rms ของกระแสและเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว

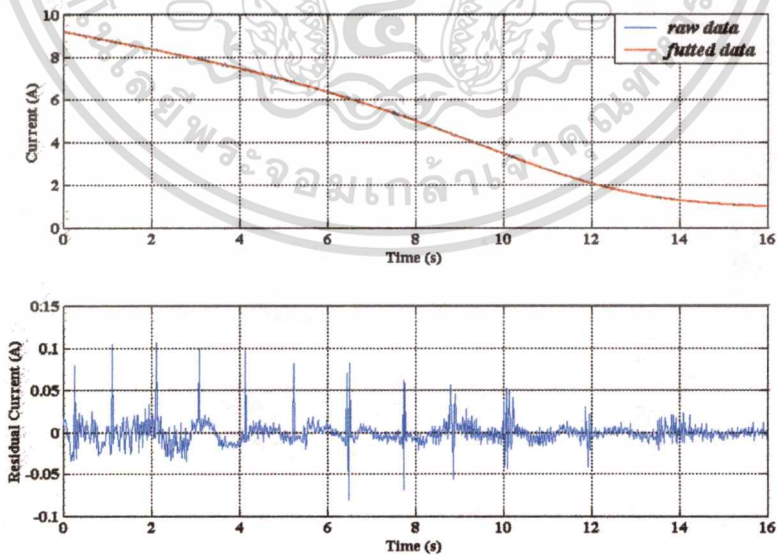


รูปที่ 5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0994 kg-m^2 (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

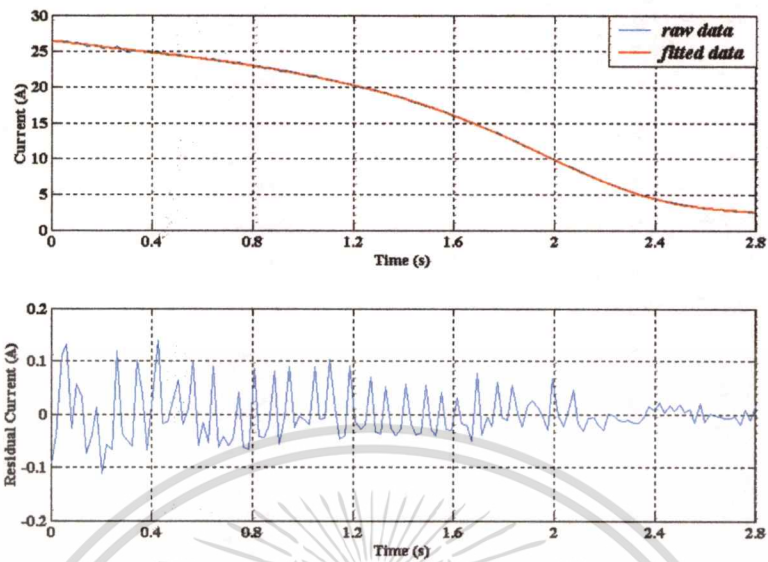


รูปที่ 5.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ
 ล้อช่วยแรงขนาด $0.5054 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

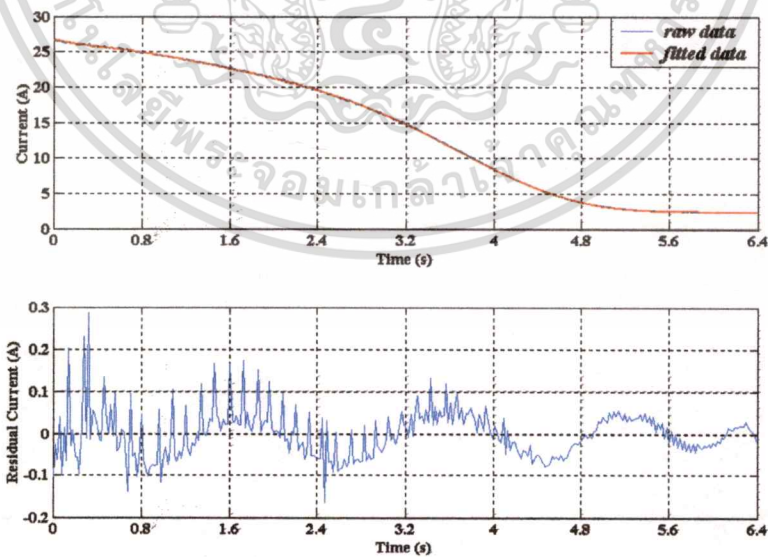


รูปที่ 5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ
 ล้อช่วยแรงขนาด $1.0093 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

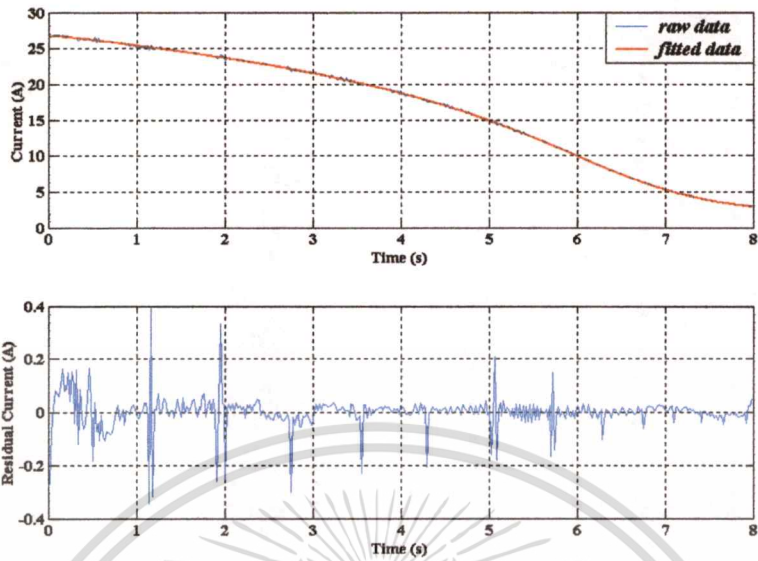


รูปที่ 5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ ล้อช่วยแรงขนาด $0.5054 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

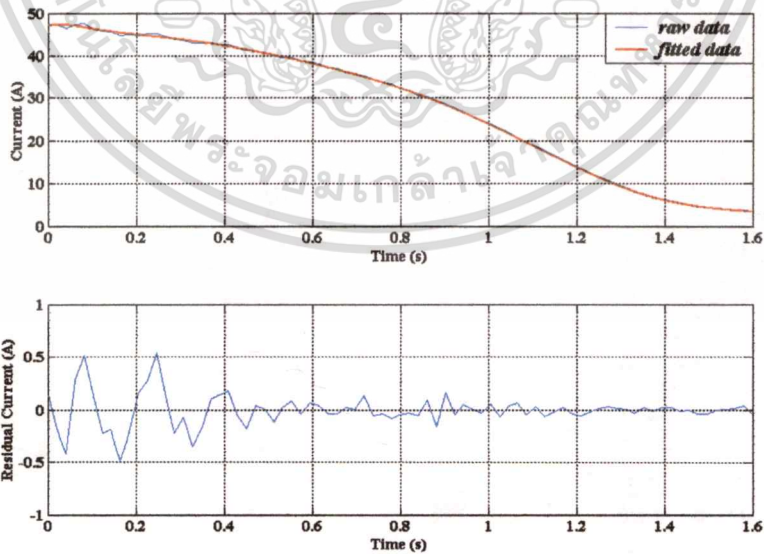


รูปที่ 5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ ล้อช่วยแรงขนาด $1.0093 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

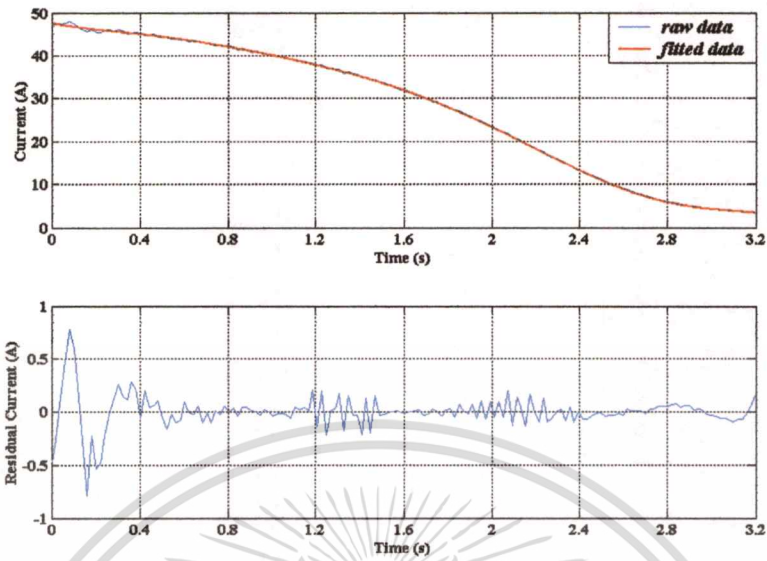


รูปที่ 5.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ ล้อช่วยแรงขนาด $1.5352 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

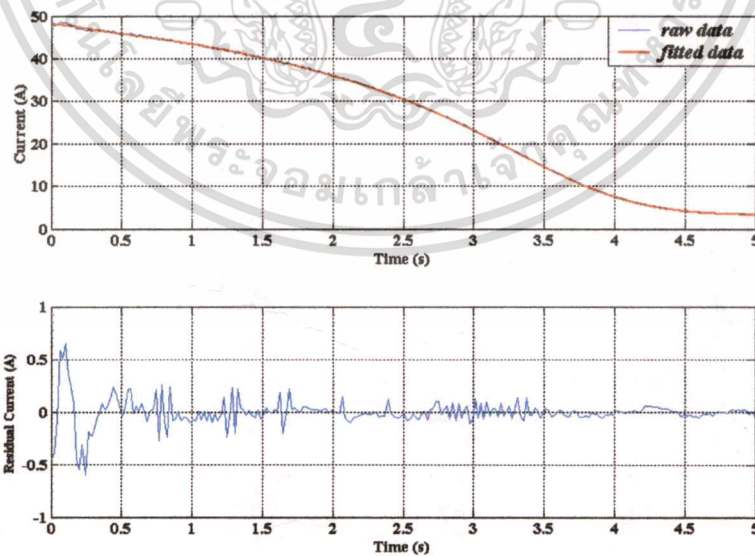


รูปที่ 5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ ล้อช่วยแรงขนาด $0.5054 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ ล้อช่วยแรงขนาด $1.0093 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)



รูปที่ 5.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ ล้อช่วยแรงขนาด $1.5352 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

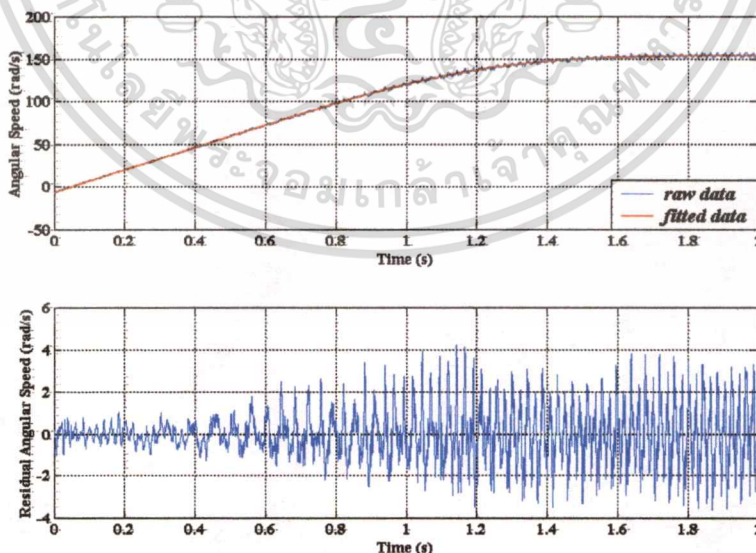
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.21 ถึงรูปที่ 5.23 เป็นการนำเสนอรูปคลื่นของกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 1, 3, และ 5 แรงม้า โดยกราฟแต่ละรูปเป็นการทดสอบกับล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่างๆกัน

ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 5.24 ถึงรูปที่ 5.32 เป็นการนำเสนอผลการคำนวณค่า rms ของกระแสในรูปที่ 5.21 ถึงรูปที่ 5.23 โดยในผลการทดลองจะนำเสนอข้อมูลออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรก เป็นค่า rms ของกระแสในกรณีที่ยังไม่ได้ทำ curve fitting (เส้นสีฟ้า) ซึ่งพล็อตร่วมกับข้อมูลที่ผ่านการทำ curve fitting แล้ว (เส้นสีแดง) ส่วนที่สองนำเสนอค่า error จากการทำ curve fitting ข้อมูลดังกล่าว ผลการทดลองส่วนนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการทำ curve fitting โดยพิจารณาความสมมาตรของค่า error ที่ได้

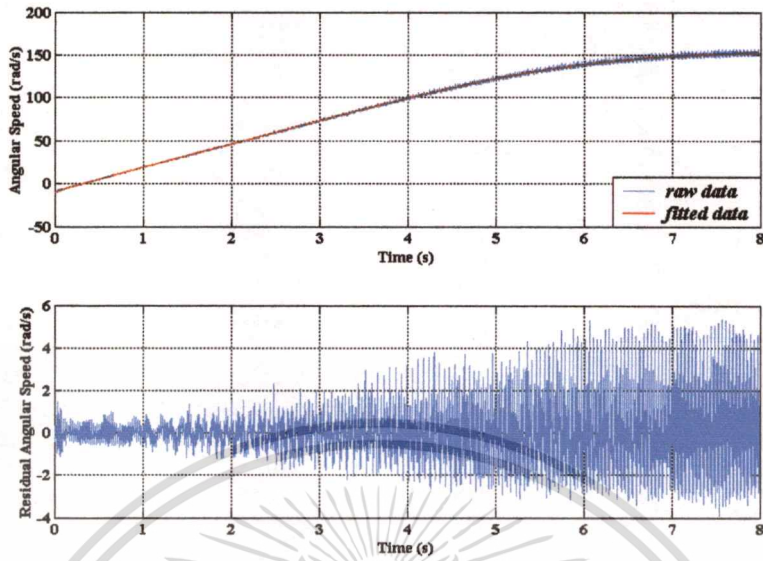
ในส่วนต่อไปจะเป็นการนำเสนอผลการทดลองในรูปแบบของข้อมูลของอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว โดยนำเสนอผลของการทำ curve fitting และค่า error ที่ได้จากการทำ curve fitting โดยจะทำการนำเสนอผลการทดลองในรูปที่ 5.33 ถึงรูปที่ 5.41 ซึ่งการพิจารณาผลการทดลองนั้นสามารถอาศัยวิธีการเช่นเดียวกับการพิจารณาค่า rms ของกระแส

5.4.2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว

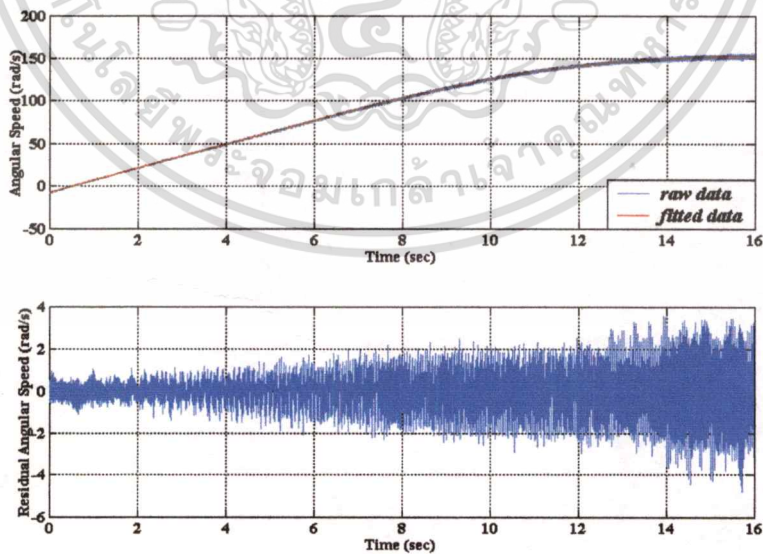


รูปที่ 5.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด $0.0994 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังทำ curve fitting (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

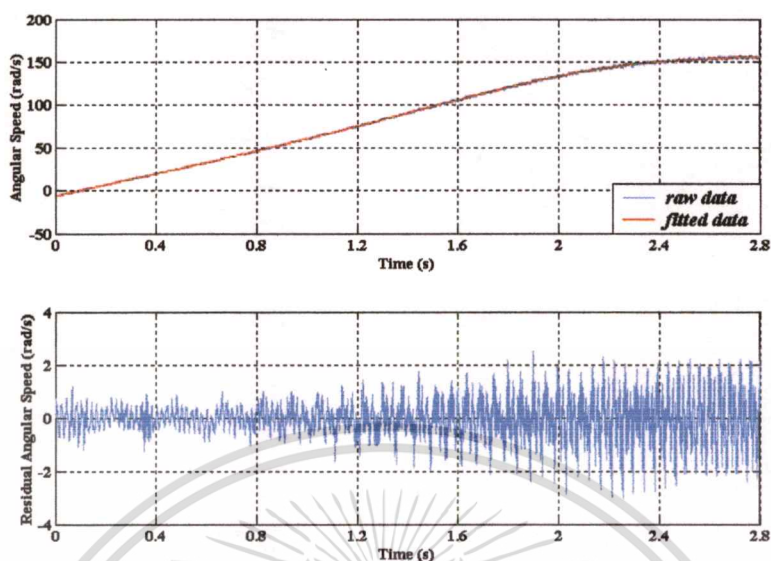


รูปที่ 5.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด $0.5054 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

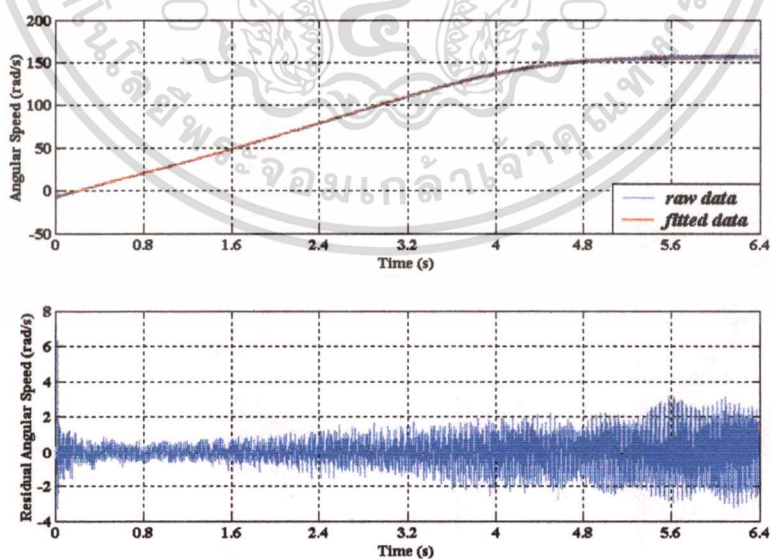


รูปที่ 5.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด $1.0093 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

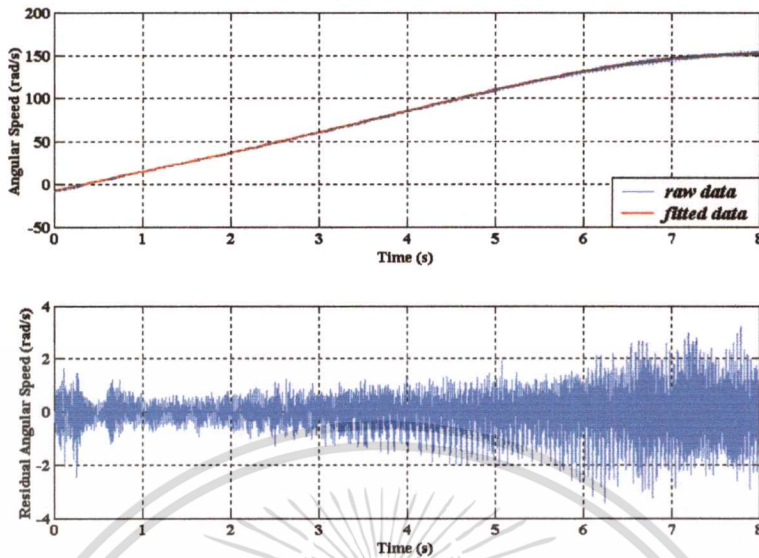


รูปที่ 5.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด $0.5054 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

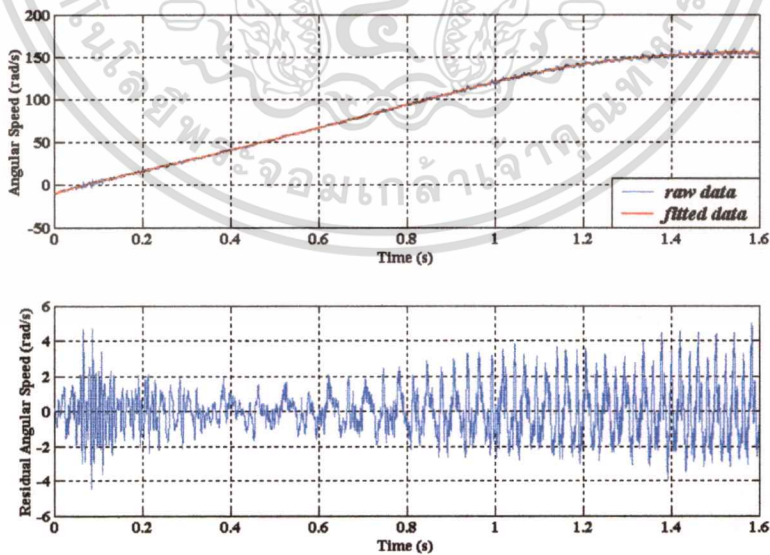


รูปที่ 5.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด $1.0093 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

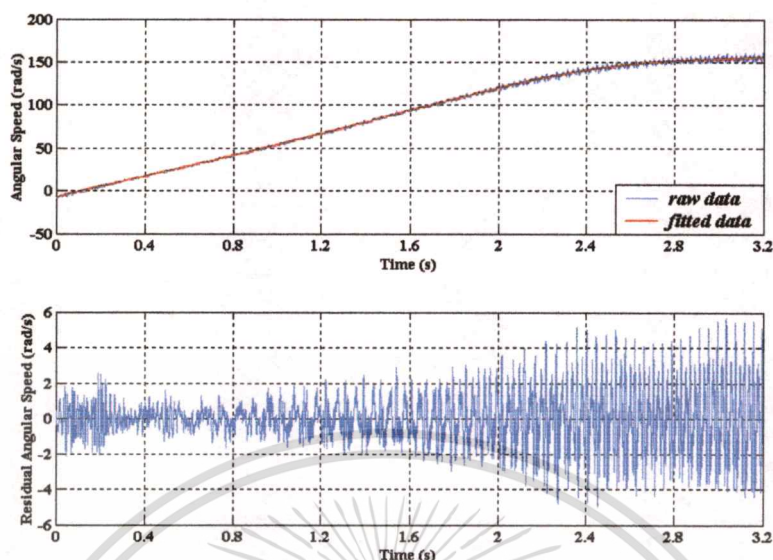


รูปที่ 5.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด $1.5352 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

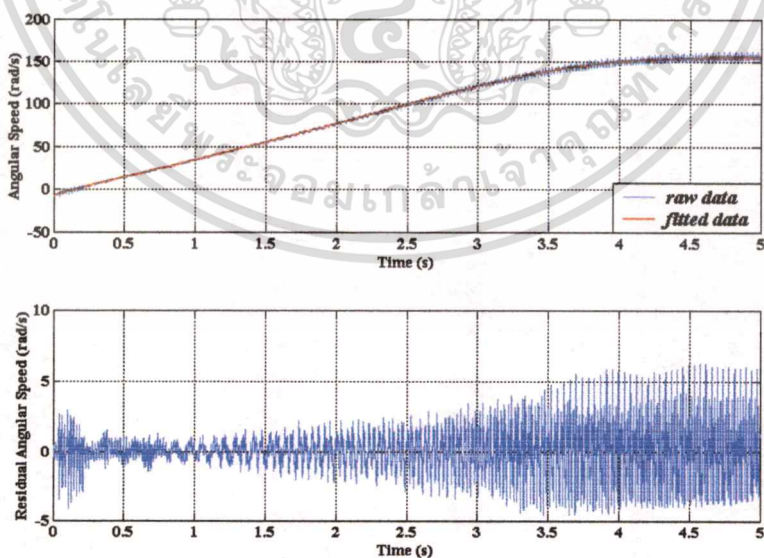


รูปที่ 5.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด $0.5054 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

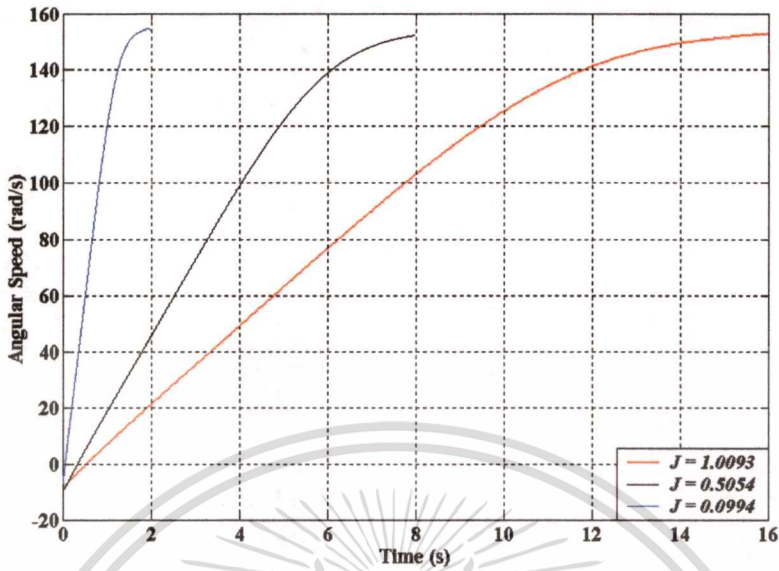


รูปที่ 5.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด $1.0093 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

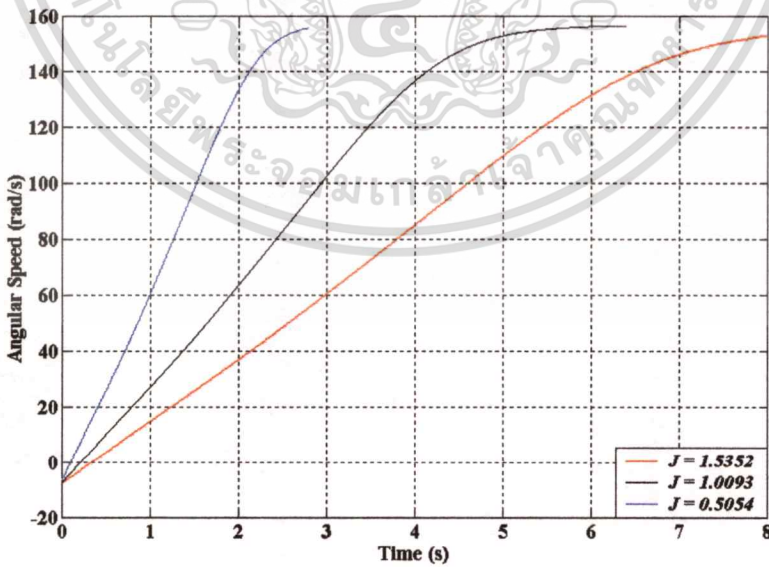


รูปที่ 5.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด $1.5352 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (บน) และค่า error ภายหลังจากทำ curve fitting (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

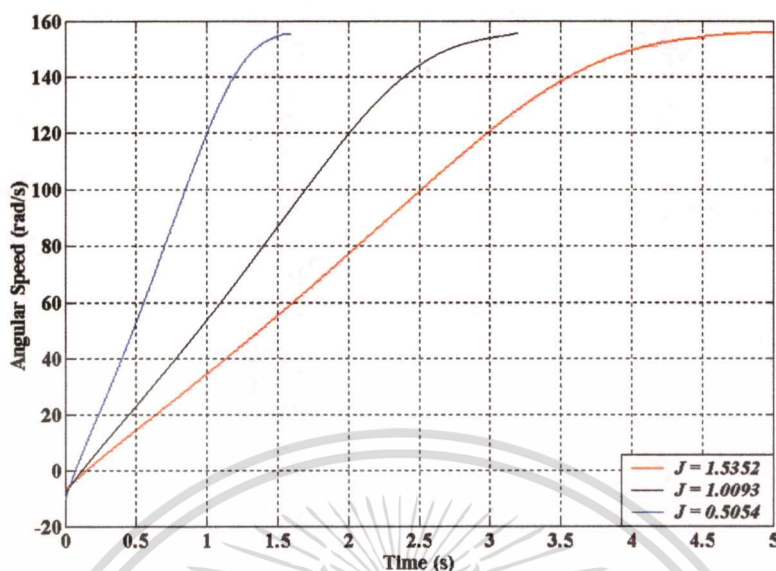


รูปที่ 5.42 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า



รูปที่ 5.43 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.44 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

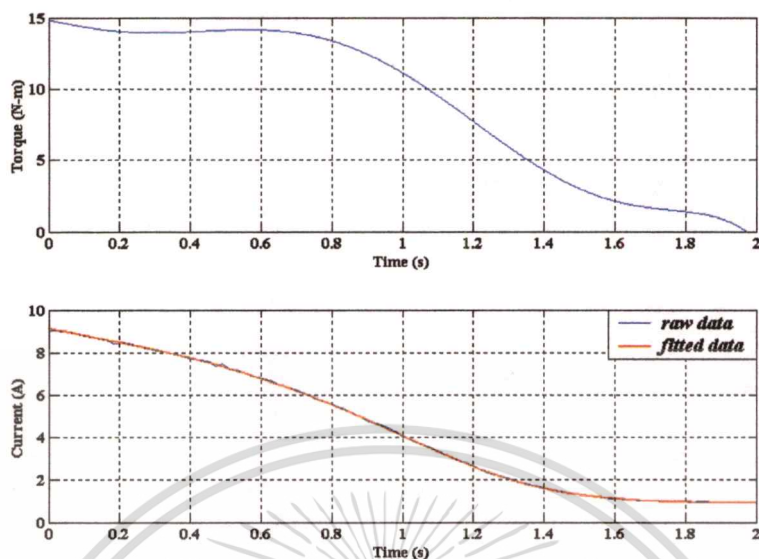
จากรูปที่ 5.42 ถึงรูปที่ 5.44 เป็นการแสดงผลของสมการที่ 3.6 ซึ่งเป็นสมการที่แสดงให้เห็นถึงผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

5.4.2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-เวลาเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-เวลา

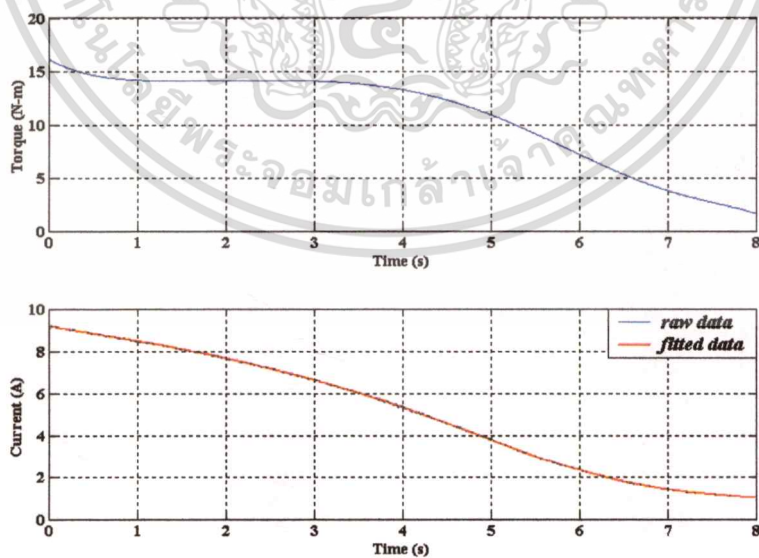
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบค่าของแรงบิดและกระแสในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงบิดของมอเตอร์ ณ เวลาในการเร่งความเร็วต่างๆกัน

นอกจากนี้การนำเสนอข้อมูลของแรงบิด-เวลาแล้วนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลของกระแส-เวลาจะแสดงให้เห็นค่าแรงบิด ณ เวลาหนึ่งเปรียบเทียบกับค่ากระแสและแรงบิด ณ เวลานั้นๆ ซึ่งวิศวกรหรือผู้ใช้งานมอเตอร์สามารถนำไปพิจารณาในการเลือกวิธีการสตาร์ทมอเตอร์ว่าควรจะใช้วิธีใดในการสตาร์ทเพื่อไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อมอเตอร์

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-เวลาและความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-เวลาของมอเตอร์ขนาด 1, 3, และ 5 แรงม้าแสดงดังรูปที่ 5.45 ถึงรูปที่ 5.53

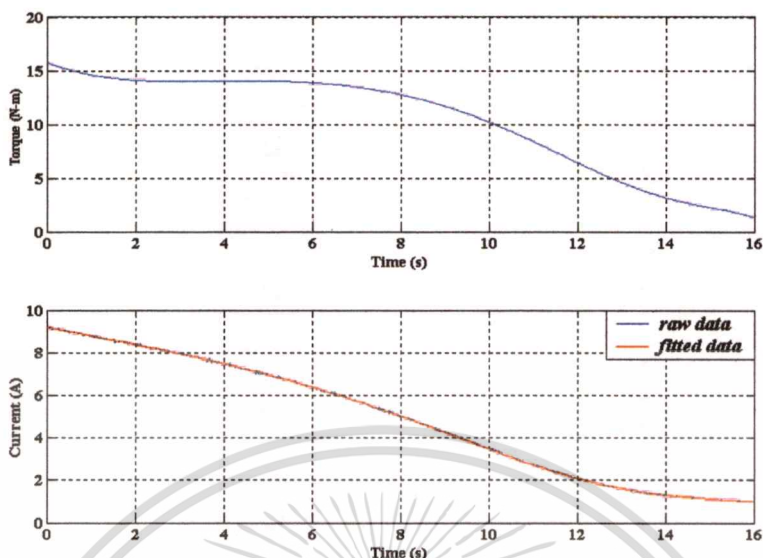


รูปที่ 5.45 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0994 kg-m^2

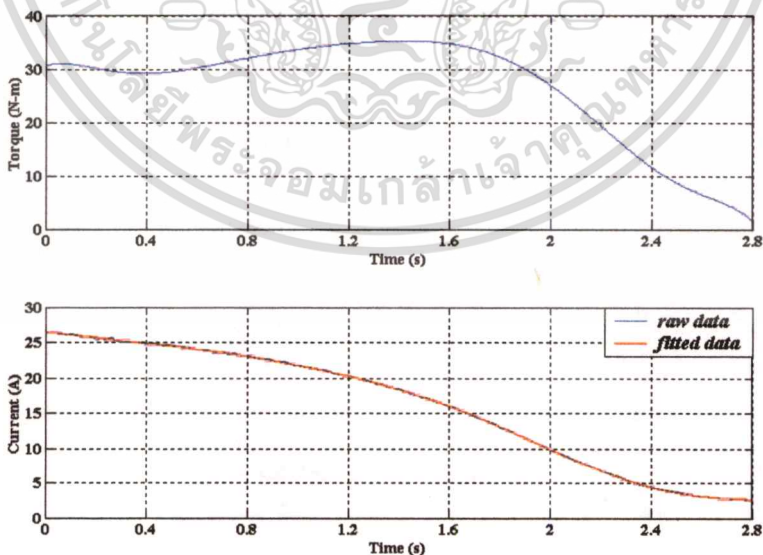


รูปที่ 5.46 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

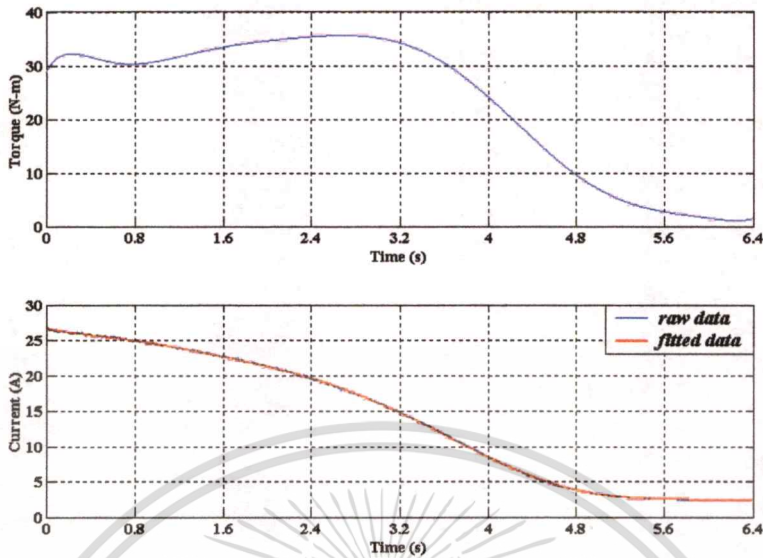


รูปที่ 5.47 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m^2

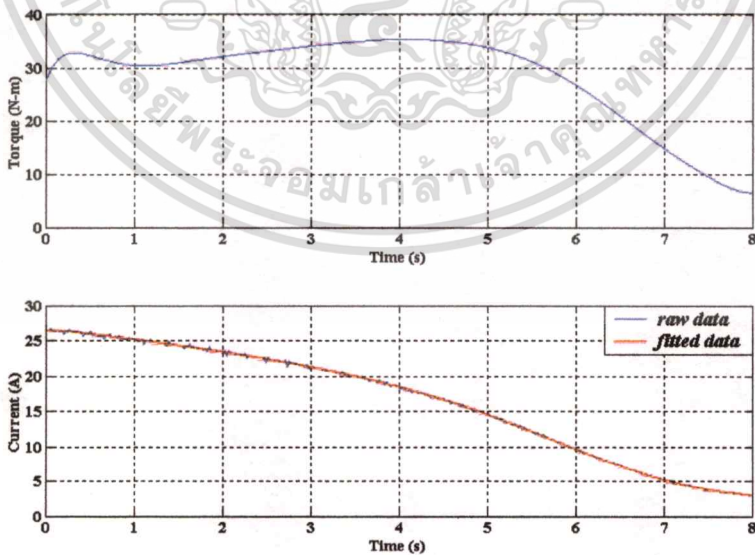


รูปที่ 5.48 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

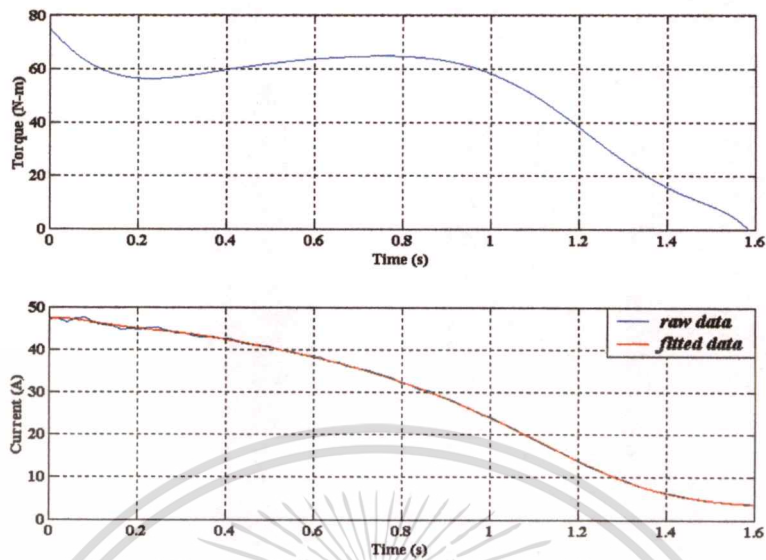


รูปที่ 5.49 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m^2

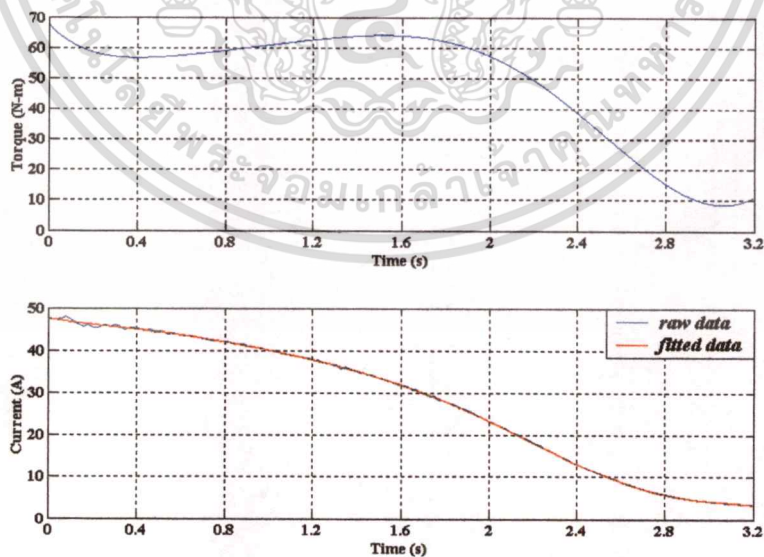


รูปที่ 5.50 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

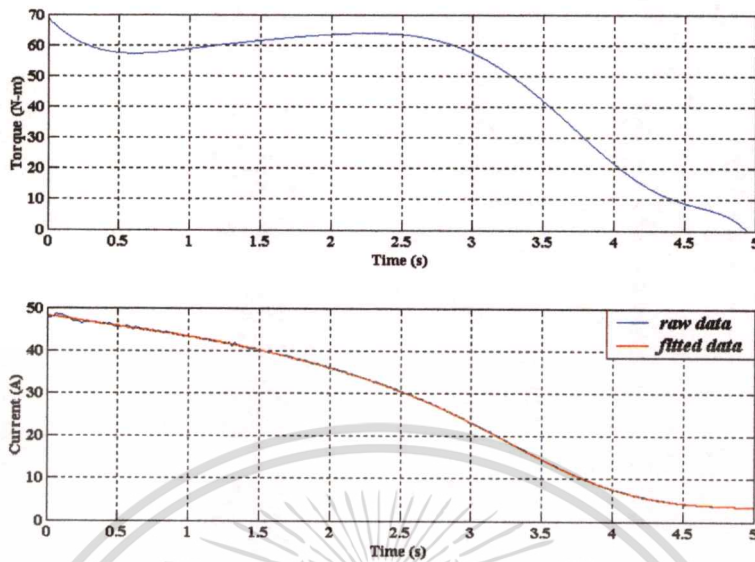


รูปที่ 5.51 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.5054 kg-m^2



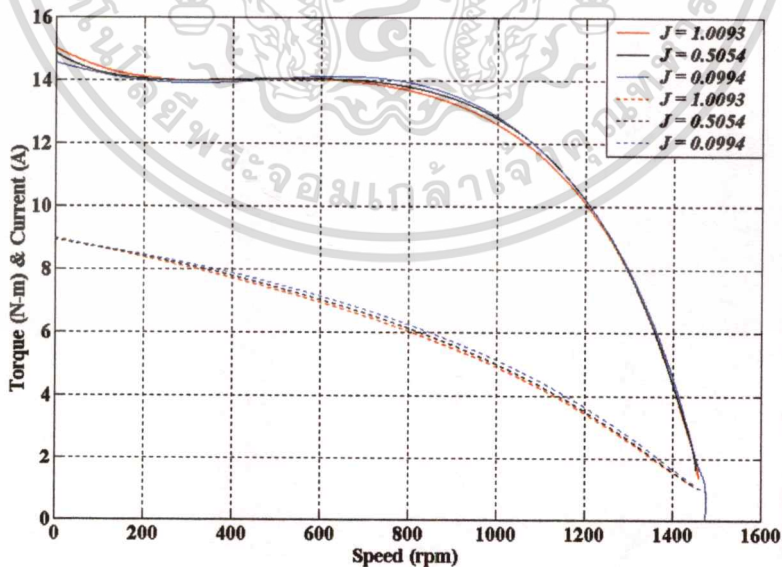
รูปที่ 5.52 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



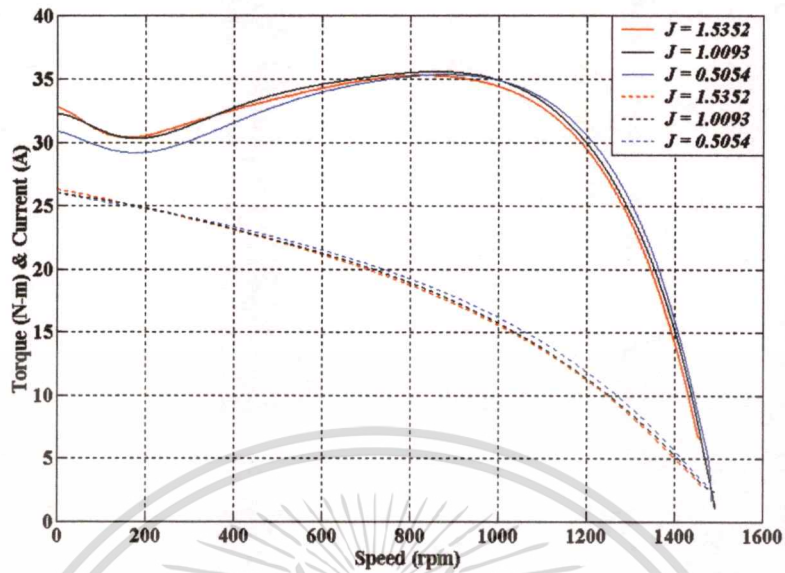
รูปที่ 5.53 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด และ กระแสของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m^2

5.4.2.5 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

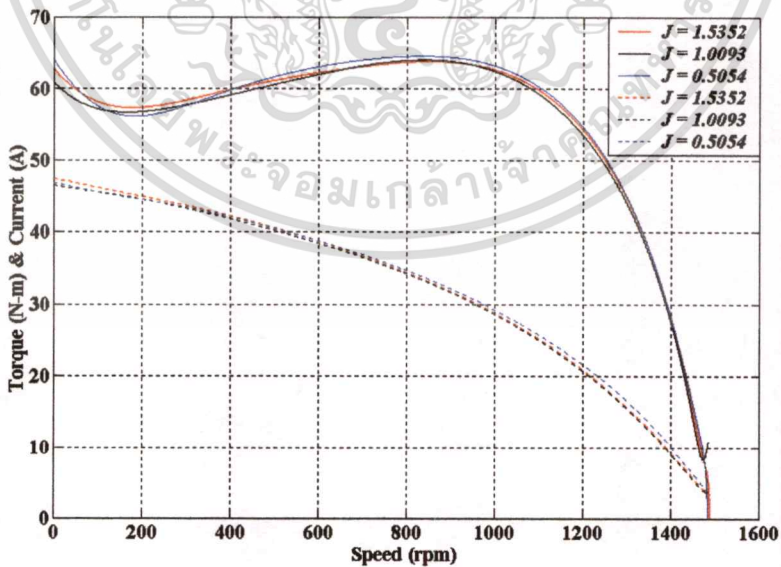


รูปที่ 5.54 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.55 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับ โมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ



รูปที่ 5.56 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับ โมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

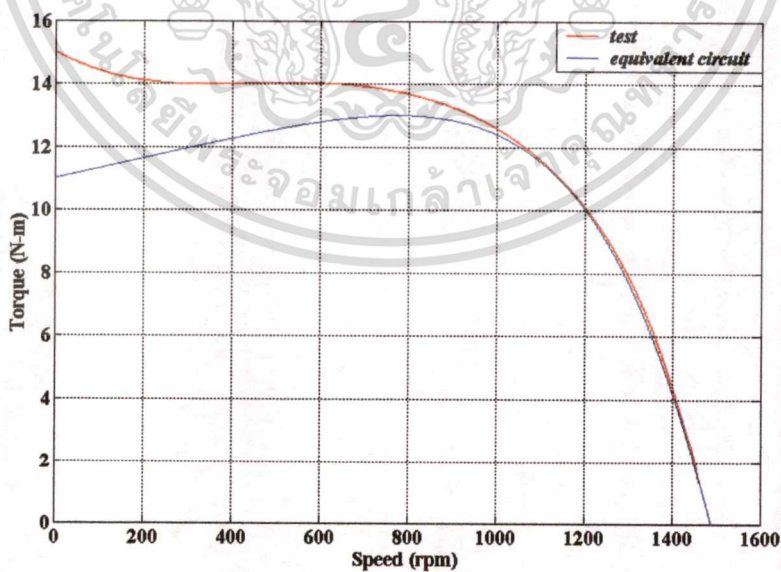
5.4.2.6 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ได้จากการคำนวณจากวงจรสมมูลย์และจากการทดลอง

ในหัวข้อนี้นำเสนอกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วและกราฟที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วงจรสมมูลย์ ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลย์แสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

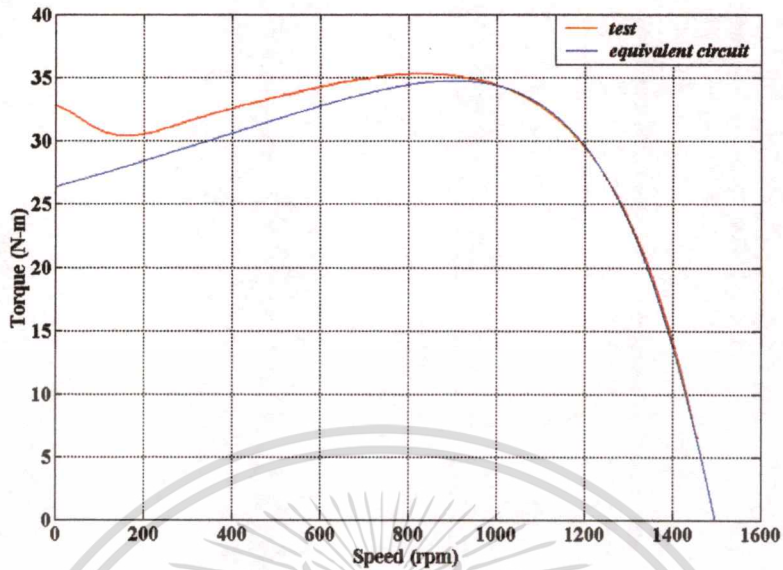
พารามิเตอร์ (Ω)	1Hp	3Hp	5Hp
R_1	10.5000	3.7800	2.0540
X_1	9.8056	3.8575	2.0896
R_2	10.1322	3.2899	1.9645
X_2	9.8056	3.8575	2.0896
R_c	2366.2	625.0	400.0
X_m	216.6351	81.1024	55.2515

จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 5.4 เมื่อนำมาคำนวณหากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและทำการเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการทดลองจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.57 ถึงรูปที่ 5.59

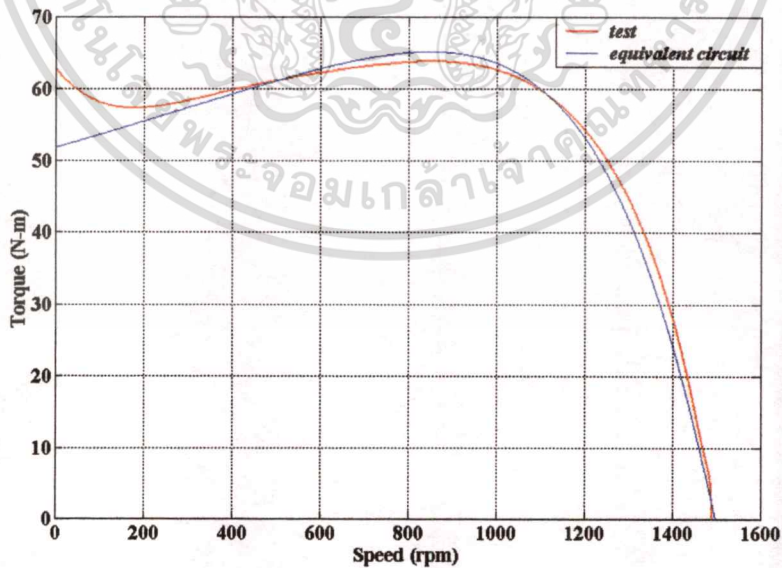


รูปที่ 5.57 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า
ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



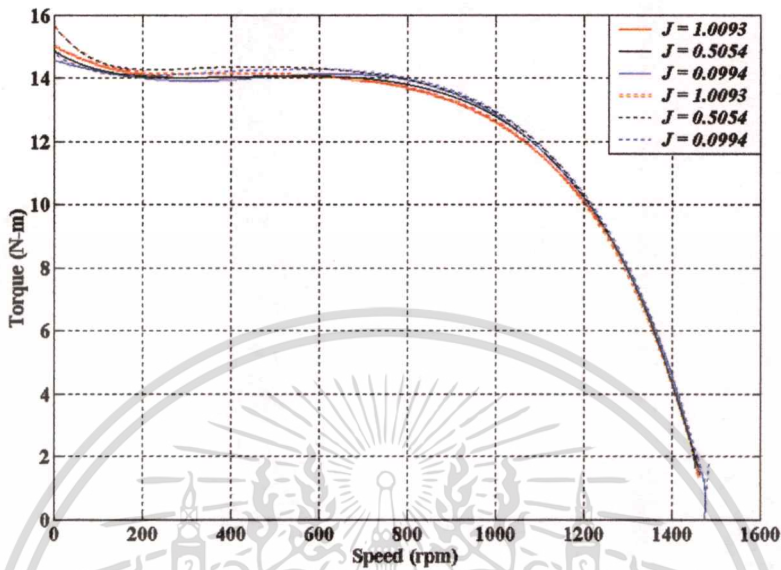
รูปที่ 5.58 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมูลย์



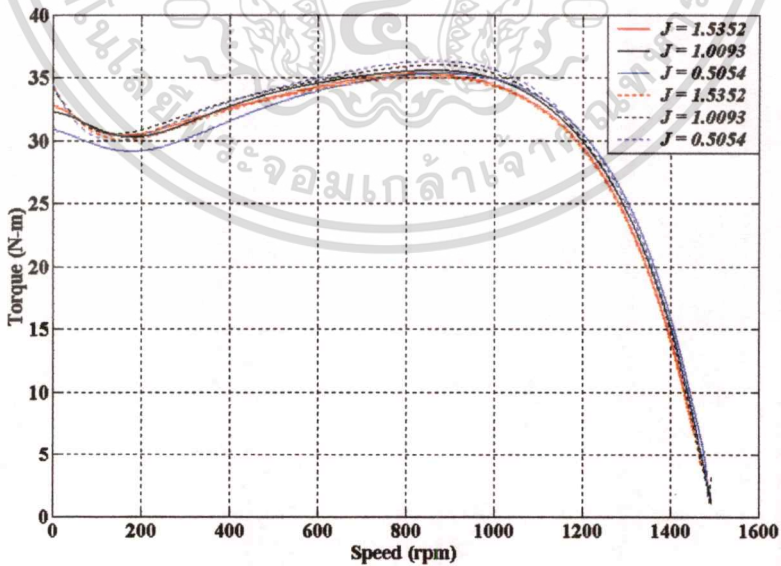
รูปที่ 5.59 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2.7 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ได้จากการสตาร์ทในสถานะเริ่มต้นที่แตกต่างกัน

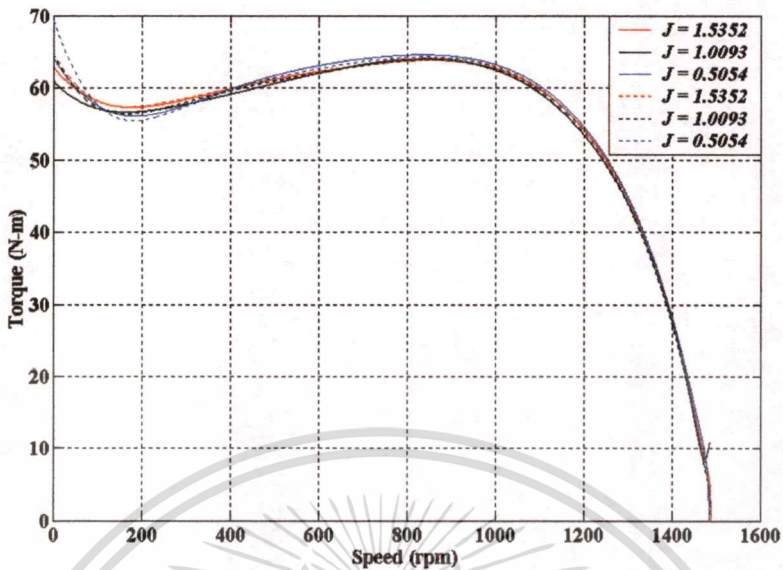


รูปที่ 5.60 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า
ที่ได้จากการสตาร์ทในสถานะเริ่มต้นต่างกันคือโรเตอร์หมุนกลับทิศ(เส้นทึบ) และ
โรเตอร์หยุดนิ่ง(เส้นประ)



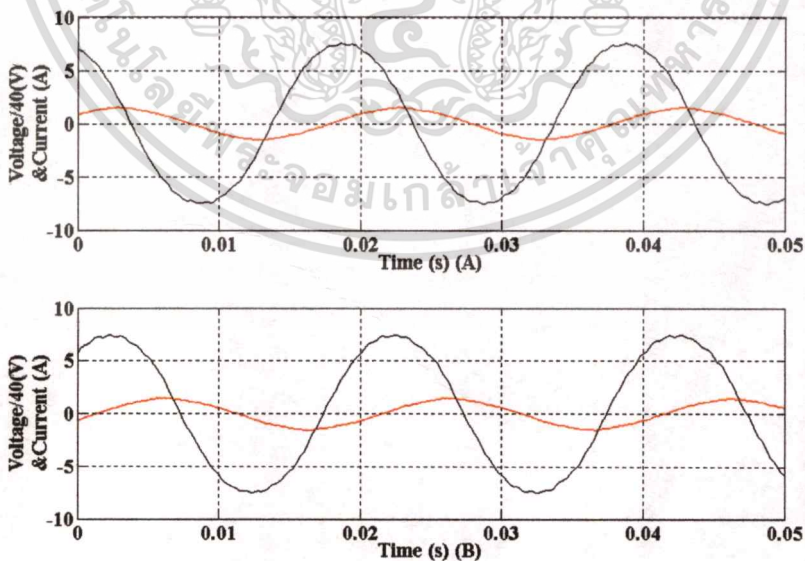
รูปที่ 5.61 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า
ที่ได้จากการสตาร์ทในสถานะเริ่มต้นต่างกันคือโรเตอร์หมุนกลับทิศ(เส้นทึบ) และ
โรเตอร์หยุดนิ่ง(เส้นประ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



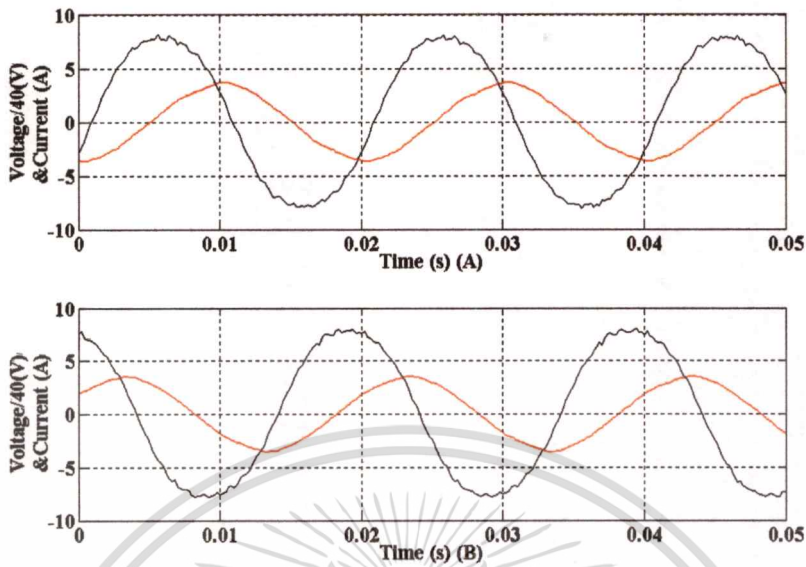
รูปที่ 5.62 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ได้จากการสตาร์ทในสถานะเริ่มต้นต่างกันคือ โรเตอร์หมุนกลับทิศ(เส้นทึบ) และ โรเตอร์หยุดนิ่ง(เส้นประ)

5.4.2.8 กราฟแรงดันและกระแสของมอเตอร์ในสถานะคงตัวเมื่อทำการทดสอบ โดยไม่คับปลิ่งล้อช่วยแรงและกรณีที่ทำกรคับปลิ่งล้อช่วยแรง

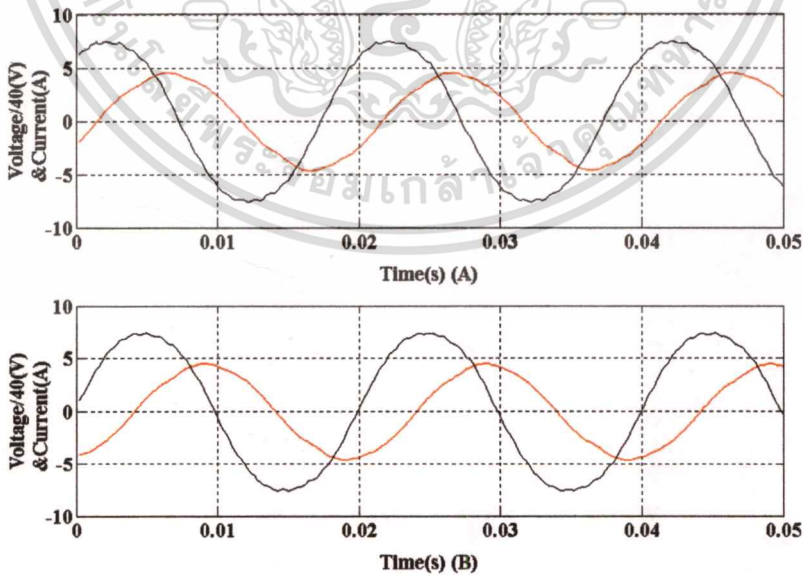


รูปที่ 5.63 กราฟแรงดัน(สี่ค่า) และกระแสของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าในกรณีที่ไม่ทำการคับปลิ่งกับล้อช่วยแรง (A) และกรณีที่ทำกรคับปลิ่งกับล้อช่วยแรงขนาด 1.0093 kg-m² (B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



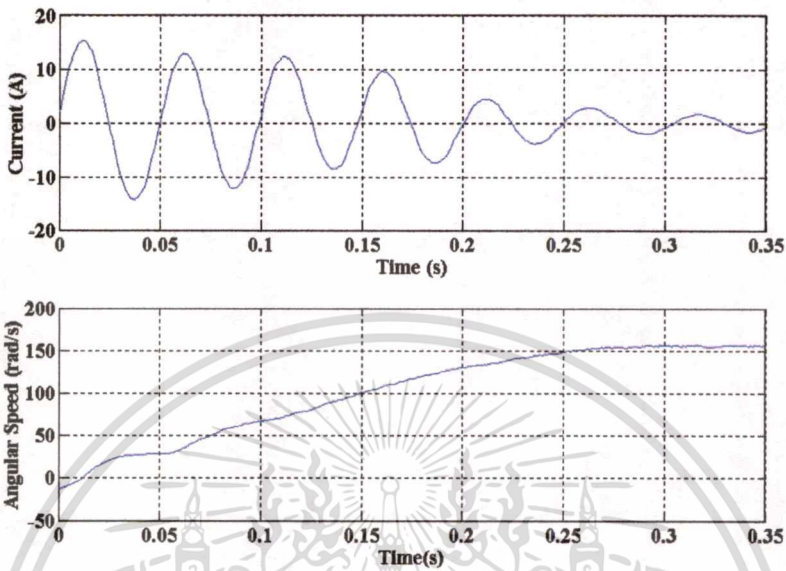
รูปที่ 5.64 กราฟแรงดัน(สีดำ) และกระแสของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าในกรณีที่ ไม่ทำการคัปปลิ้ง กับล้อช่วยแรง (A) และกรณีที่ทำการคัปปลิ้งกับล้อช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m^2 (B)



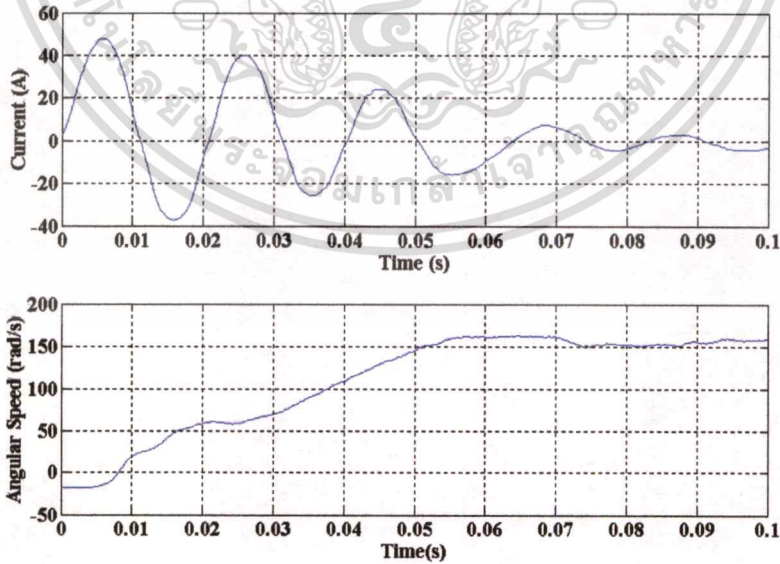
รูปที่ 5.65 กราฟแรงดัน(สีดำ) และกระแสของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าในกรณีที่ ไม่ทำการคัปปลิ้ง กับล้อช่วยแรง (A) และกรณีที่ทำการคัปปลิ้งกับล้อช่วยแรงขนาด 1.5352 kg-m^2 (B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2.9 กราฟกระแสและอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วโดยไม่มีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์

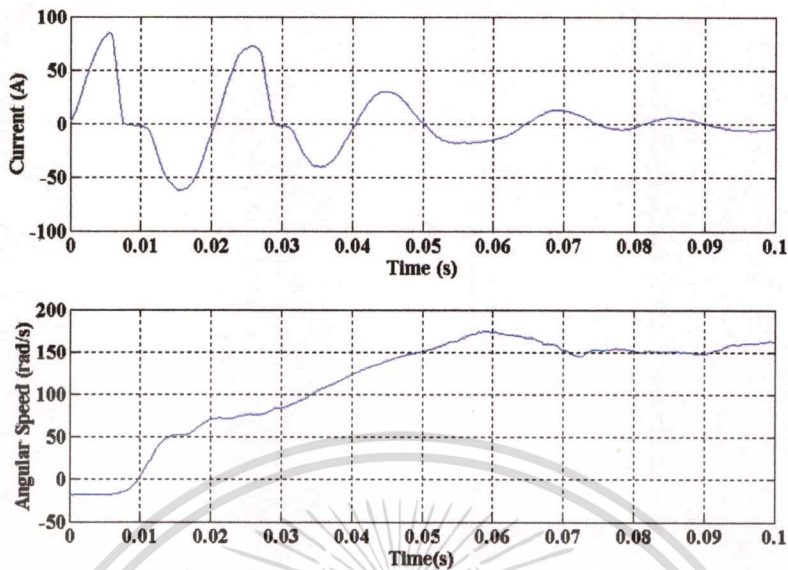


รูปที่ 5.66 กระแสและอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ขณะเร่งความเร็วเมื่อไม่มีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์



รูปที่ 5.67 กระแสและอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ขณะเร่งความเร็วเมื่อไม่มีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.68 กระแสและอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ขณะเร่งความเร็วเมื่อไม่มีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์

จากผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) เพื่อทำการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบดังแสดงในรูปที่ 5.54 ถึงรูปที่ 5.56 โดยในการทดสอบได้ทำการเปลี่ยนขนาดของล้อช่วยแรงให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่างๆกันซึ่งผลปรากฏว่า กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยไม่ทำให้กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงเท่าใดนัก และเมื่อนำกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองมาทำการพล็อตเปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ในตารางที่ 5.4 จะได้ผลแสดงดังรูปที่ 5.57 ถึงรูปที่ 5.59 จากผลการเปรียบเทียบพบว่าในย่านความเร็วพิกัด ค่าแรงบิดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ค่าจะแตกต่างกันมากในส่วนของแรงบิดตอนเริ่มหมุน (breakaway torque หรือ starting torque)

สาเหตุที่ทำให้กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับศูนย์จนถึงระดับความเร็วที่ให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีความแตกต่างกันเป็นอย่างมากนั้นเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

1. เนื่องมาจากวงจรสมมูลย์ที่ใช้ในการคำนวณนั้นไม่ได้แสดงผลของ skin effect จากทางด้านของโรเตอร์

2. ผลของการอิ่มตัว (saturation effect) ในมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะส่งผลกระทบต่อ leakage inductance ในวงจรสมมูลซึ่งทำให้ค่า leakage inductance เกิดสถานะ nonlinear และขณะเดียวกันการอิ่มตัวก็ทำให้กระแสขณะสตาร์ทสูงด้วย
3. วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการอธิบายสมรรถนะ (performance) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในย่านการทำงานปกติของมอเตอร์เท่านั้นดังที่ปรากฏในรูปที่ 5.57 ถึงรูปที่ 5.59

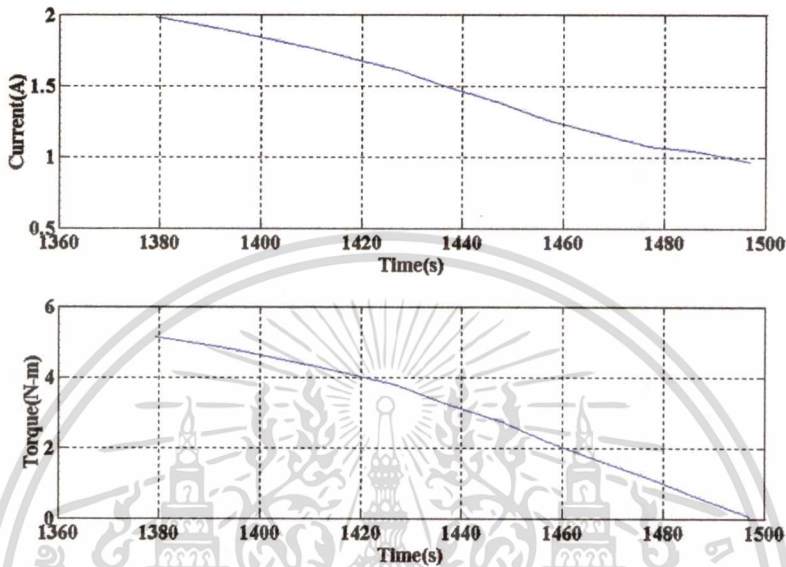
ในส่วนของการทดสอบเพื่อศึกษาความแตกต่างของสถานะเริ่มต้นของมอเตอร์ในขณะสตาร์ทโดยกำหนดสถานะเริ่มต้นของมอเตอร์ให้แตกต่างกัน 2 แบบคือสตาร์ทมอเตอร์ในสถานะที่โรเตอร์หมุนกลับทิศก่อนการสตาร์ทและกรณีที่โรเตอร์หยุดนิ่งก่อนการสตาร์ทโดยวิธีการดังกล่าวได้ระบุไว้ใน IEEE standard 112-1996 [1] ว่าในกรณีที่แรงเสียดทานของโรเตอร์มีค่าสูงหรือต้องการข้อมูลที่ย่านความเร็วศูนย์ที่แม่นยำนั้น จำเป็นต้องทำให้โรเตอร์หมุนกลับทิศก่อนการที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.60 ถึงรูปที่ 5.62 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการทดสอบที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากัน เมื่อทำการสตาร์ทจากสถานะที่โรเตอร์หยุดนิ่งจะให้ค่าแรงบิดขณะสตาร์ทหรือที่ความเร็วรอบเท่ากับศูนย์สูงกว่ากรณีที่สตาร์ทในสถานะที่โรเตอร์หมุนกลับทิศ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากแรงเสียดทานสถิตของระบบหรือเนื่องจากผลของการทำ curve fitting

ในส่วนของการทดสอบที่สถานะคงตัวนั้นให้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.63-5.65 ซึ่งจากรูปพบว่าค่าขณะกระแสและมุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสที่บันทึกได้นั้นแตกต่างกันน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์นั้นไม่เป็นการเพิ่มภาระให้แก่มอเตอร์

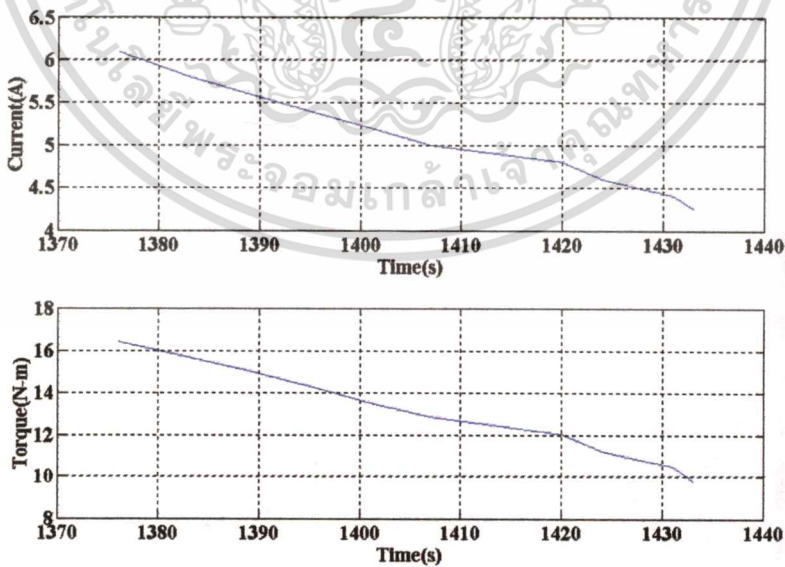
ในการเลือกค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เหมาะสมนั้นสามารถพิจารณาจากรูปที่ 5.66-5.68 ซึ่งเป็นกราฟของข้อมูลดิบของกระแส-เวลาและอัตราเร็วเชิงมุม-เวลาโดยจากรูปทั้ง 3 รูป พบว่าถ้าไม่ทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์แล้วจะทำให้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์สั้นมาก จากรูปทั้ง 3 รูปพบว่าช่วงเวลาในการเกิดสถานะทรานเซียนต์นั้นจะอยู่ในช่วงประมาณ 3-4 cycle ของสัญญาณกระแส และเมื่อพิจารณาจากกราฟของอัตราเร็วเชิงมุม-เวลาพบว่ากราฟที่ได้มีความบิดเบี้ยวสูงมากอันเนื่องมาจากผลของทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าซึ่งยากที่จะใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการหาแนวโน้มของ curve ได้ ดังนั้นในการเลือกขนาดของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบควรเลือกให้มีขนาดอย่างน้อยทำให้เวลาในการเร่งความเร็วมากกว่าระยะเวลาในการเกิดสถานะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าพอสมควร

5.4.3 การทดสอบภาระ (Load Test)

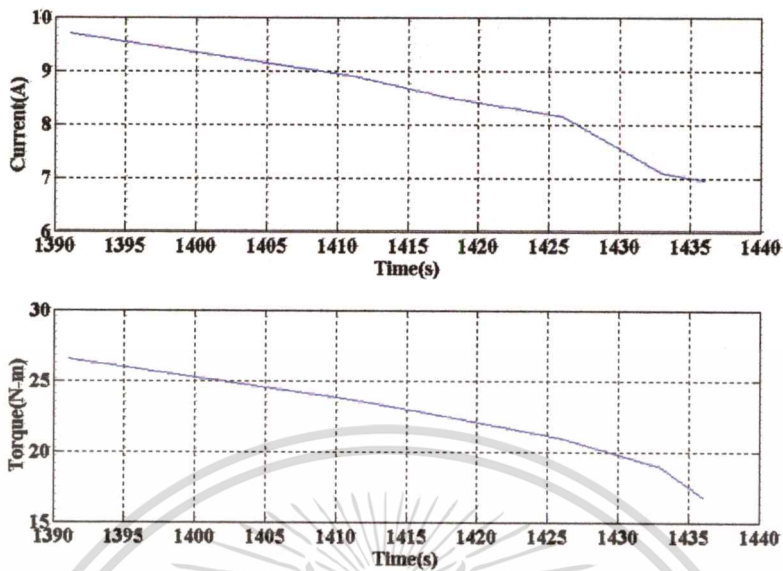
ในการทดสอบภาระนั้นได้ทำการทดสอบตามรูปที่ 5.7 และนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการคำนวณหาค่าแรงบิดตามสมการที่ 5.1 ซึ่งได้ผลแสดงในรูปของกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบดังแสดงในรูปที่ 5.69 ถึงรูปที่ 5.71



รูปที่ 5.69 กราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบ(บน) และกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ (ล่าง) ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบภาระ

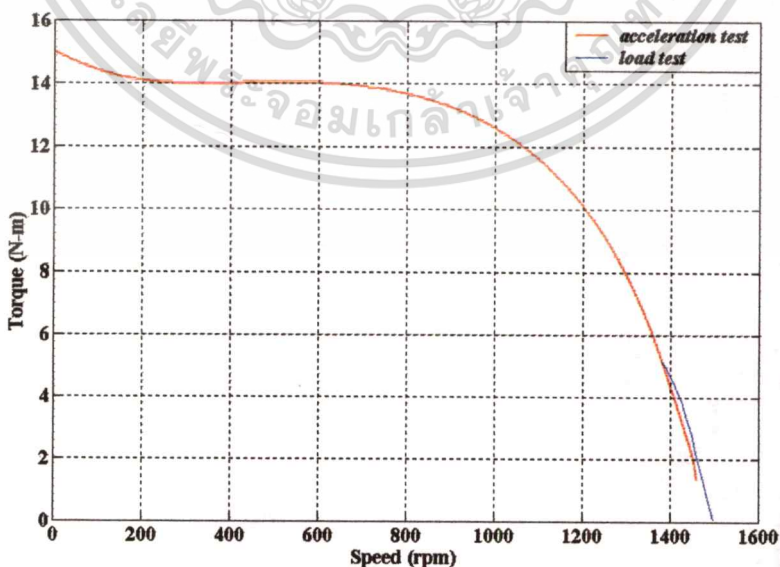


รูปที่ 5.70 กราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบ(บน) และกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ (ล่าง) ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบภาระ



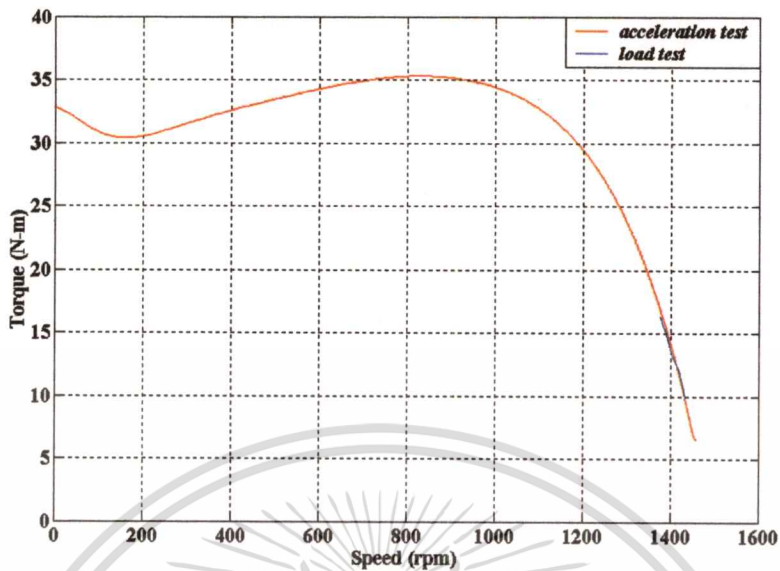
รูปที่ 5.71 กราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบ(บน) และกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ (ล่าง) ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบภาระ

เมื่อนำกราฟที่ได้จากการทดสอบภาระมาทำการพล็อตร่วมกับกราฟที่ได้จากการทดสอบ ด้วยวิธีเร่งความเร็วซึ่งจะได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.72 ถึงรูปที่ 5.74

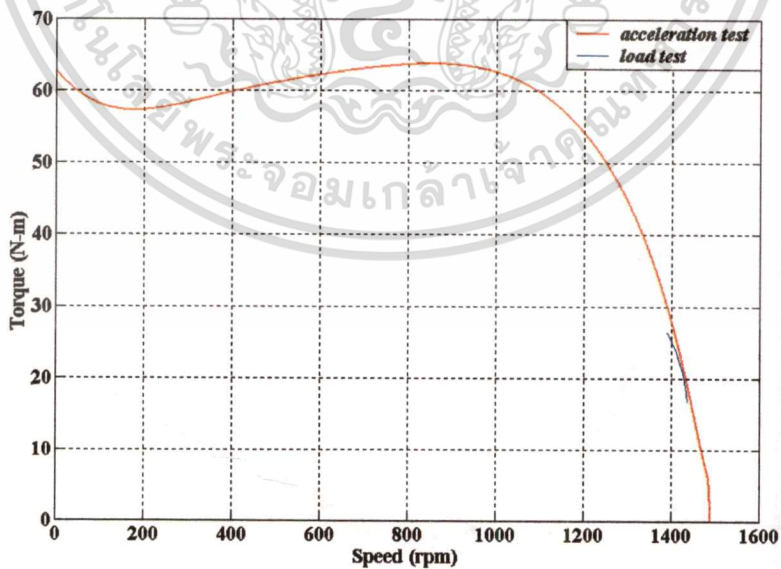


รูปที่ 5.72 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.73 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า



รูปที่ 5.74 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า

จากการเปรียบเทียบจะพบว่าค่าแรงบิดที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

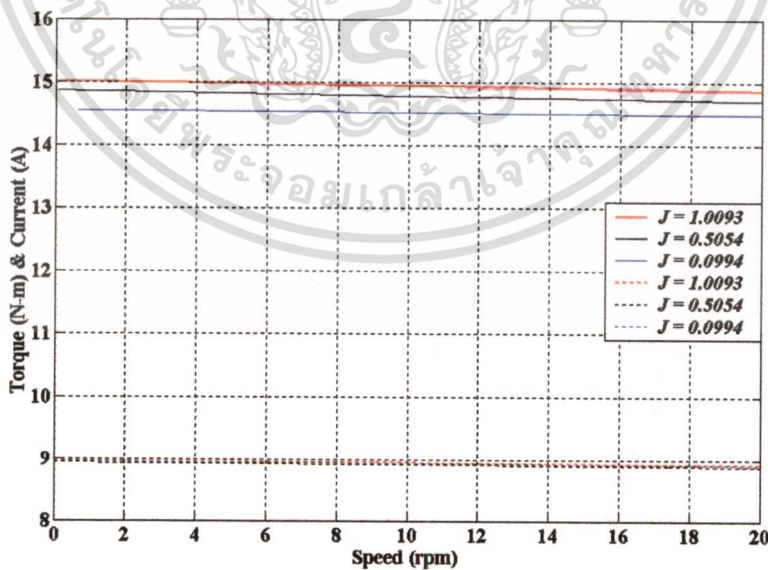
5.4.4 การทดสอบล๊อคโรเตอร์ (Locked Rotor Test)

ในการทดสอบล๊อคโรเตอร์นั้นได้ทำการทดสอบตามรูปที่ 5.8 โดยผลที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณตามสมการที่ 5.2 ได้ผลของกระแสและแรงบิดดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่ากระแสและแรงบิดของมอเตอร์ขณะล๊อคโรเตอร์ที่พิกัดแรงดัน

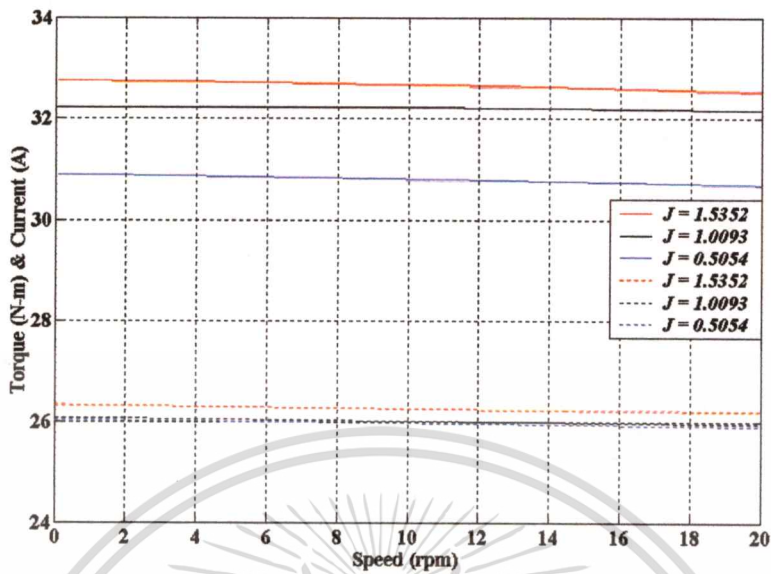
ขนาดมอเตอร์ (Hp)	กระแส (A)	แรงบิด (N-m)
1	9.6743	14.85
3	28.1575	33.92
5	48.0950	64.22

จากผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วได้ทำการชุมผลการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวให้อยู่ในย่านความเร็วรอบศูนย์เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.75 ถึงรูปที่ 5.77

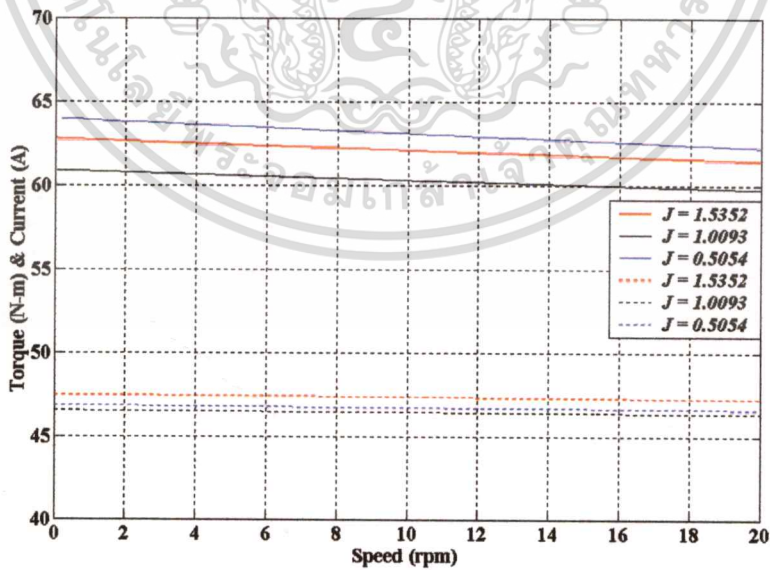


รูปที่ 5.75 ค่าแรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.76 ค่าแรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า



รูปที่ 5.77 ค่าแรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำรูปที่ 5.75-5.77 ซึ่งเป็นกราฟแรงบิด-ความเร็วรอบและกระแส-ความเร็วรอบในย่านความเร็วรอบเท่ากับศูนย์ มาพิจารณาพร้อมกับค่าที่ได้จากตารางที่ 5.5 พบว่าผลที่ได้จากรูปทั้ง 3 นั้น เกาะกลุ่มอยู่รอบๆค่าที่แสดงในตารางที่ 5.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดสอบหาคูณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบด้วยการเพิ่ม โมเมนต์ความเฉื่อยและทำการหมุน โรเตอร์กลับทิศก่อนการสตาร์ทให้ผลของแรงบิดขณะสตาร์ท (starting torque) ใกล้เคียงค่าที่วัดได้จริงมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการทดสอบควรหมุน โรเตอร์กลับทิศก่อนการสตาร์ท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุป

การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับทดสอบเพื่อทำการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งอ้างอิงตาม IEEE standard 112-1996 [1] ในการทดสอบได้ทำการเพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ซึ่งวิธีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์นั้นกระทำโดยการนำล้อช่วยแรงเข้ามาคัปปลิง (coupling) กับเพลลาของมอเตอร์ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งผลการทดลองได้แสดงไว้ในบทที่ 5

ในการทดลองได้ทำการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก (squirrel cage) ขนาด 1, 3, และ 5 แรงม้า ซึ่งเป็นมอเตอร์ประเภท totally enclosed fan cooled (TEFC) ในส่วนการทดสอบได้แบ่งการทดสอบมอเตอร์ออกเป็นสี่วิธีได้แก่ 1.การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) 2.การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration test) 3.การทดสอบภาระ (load test) และ 4.การทดสอบล๊อคโรเตอร์ (locked rotor test) จากผลการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) นั้นผลที่ได้จากการทดสอบคือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของระบบที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.3 ส่วนผลการทดสอบที่น่าเสนอในรูปแบบกราฟซึ่งแสดงในรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.20 เป็นการนำเสนอข้อมูลของความเร็วรอบในขณะที่ความเร็วของมอเตอร์ลดลงโดยนำเสนอในรูปแบบข้อมูลดิบและข้อมูลที่ผ่านการใช้วิธี curve fitting เพื่อปรับแต่ง curve แล้ว พร้อมด้วยค่า error ที่ได้จากการทำ curve fitting ซึ่งในการพิจารณาผลการทดลองในรูปแบบดังกล่าวเป็นการพิจารณาหาแนวโน้มที่เหมาะสมของ curve เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดในตารางที่ 5.3

ในการทดสอบมอเตอร์ด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) ผลที่ได้ก็นำเสนอออกมาในรูปแบบต่างๆ ได้แก่

รูปคลื่นของกระแสในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.21 ถึงรูปที่ 5.23 โดยทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ค่ากระแสของมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัวจะพบว่าเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสูงขึ้น เวลาที่กระแสใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวก็ยาวนานขึ้น

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่า rms ของกระแสและเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.24 ถึงรูปที่ 5.32 ซึ่งข้อมูลส่วนนี้เป็นการนำรูปคลื่นของกระแสมาคำนวณหาค่า rms โดยอาศัยสมการที่ 4.1 มาทำการคำนวณแล้วนำข้อมูลที่ได้ออกมาทำการพล็อตเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็ว ข้อมูลส่วนนี้ต้องอาศัยกระบวนการทางสถิติมาทำการหาแนวโน้มของค่า rms ของกระแสโดยใช้วิธี least square regression มาใช้ในการหาสมการของแนวโน้มของข้อมูลดังกล่าว

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ ข้อมูลส่วนนี้ได้แบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนของผลการทดลองในรูปที่ 5.33 ถึงรูปที่ 5.41 เป็นการนำเสนอผลของการใช้ least square regression มาใช้ในการหาสมการแนวโน้มของความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งสมการแนวโน้มที่ได้จะใช้ในการคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามสมการที่ 3.7 ต่อไป ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 5.42 ถึงรูปที่ 5.44 เป็นการนำเสนอผลของการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งผลที่ได้พบว่าเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามซึ่งเป็นการสนับสนุนสมการที่ 3.6

ข้อมูลแรงบิดและกระแสของมอเตอร์เปรียบเทียบกับเวลา ข้อมูลส่วนนี้เป็นการนำข้อมูลของแรงบิดมาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูล rms ของกระแส ณ เวลาเดียวกันซึ่งข้อมูลในลักษณะนี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดโดยเปรียบเทียบกับค่ากระแสของมอเตอร์ ณ เวลาต่างๆกัน

กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ และกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ข้อมูลชุดนี้ได้ทำการพล็อตลงบนแกนเดียวกัน โดยทำการทดสอบกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่างๆกันเพื่อเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่อกราฟคุณลักษณะทั้งสอง ซึ่งจากผลที่ได้พบว่ากราฟคุณลักษณะทั้งสองประเภทเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกันจะให้ผลการทดสอบที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อนำกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองมาทำการพล็อตเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.57 ถึงรูปที่ 5.59 จากผลการทดลองที่ได้พบว่าแนวโน้มของกราฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในย่านความเร็วเข้าใกล้ความเร็วเชิงโครนัสจนถึงความเร็วที่ให้ค่าแรงบิดสูงสุดเท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาย่านความเร็วตั้งแต่ศูนย์จนถึงความเร็วที่ให้ค่าแรงบิดสูงสุดจะพบว่าค่าแรงบิดที่ได้มีค่าที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งเมื่อพิจารณาที่วงจรสมมูลย์พบว่าวงจรสมมูลย์ที่ใช้ในการคำนวณกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบนั้นไม่ได้รวมผลของ skin effect ที่เกิดบนโรเตอร์, การเกิดการอิ่มตัวในมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งทำให้ค่ากระแสขณะสตาร์ทของมอเตอร์มีค่าสูง ขณะเดียวกันก็ทำให้ค่า leakage inductance ของมอเตอร์มีสภาพเป็น nonlinear ด้วย, และที่สำคัญคือวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นได้ถูกออกแบบมาเพื่อนำมาอธิบาย performance ของมอเตอร์ในช่วงย่านการทำงานปกติของมอเตอร์เท่านั้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวเมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับผลการทดสอบล้อโรเตอร์ของมอเตอร์จะพบว่ากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว โดยอาศัยเทคนิคการเพิ่ม โมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์มีความน่าเชื่อถือมากกว่าการใช้กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์

ในส่วนของผลการทดลองตามรูปที่ 5.60 ถึงรูปที่ 5.62 ซึ่งแสดงการสตาร์ทมอเตอร์ด้วยการหมุนโรเตอร์กลับทิศก่อนการสตาร์ทและกรณีที่โรเตอร์หยุดนิ่งก่อนการสตาร์ทนั้นให้ผลอย่างชัดเจนว่ากรณีที่สตาร์ทมอเตอร์ในสถานะที่โรเตอร์หยุดนิ่งนั้นให้ค่าแรงบิดขณะสตาร์ทสูงกว่ากรณีหมุนโรเตอร์กลับทิศก่อนการสตาร์ท เมื่อนำผลการทดสอบดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบล๊อคโรเตอร์ที่พิกัดแรงดันดังแสดงในตารางที่ 5.5 แล้วพบว่าค่าแรงบิดขณะสตาร์ทที่ได้จากกรณีที่หมุนโรเตอร์กลับทิศก่อนการสตาร์ทนั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกว่ากรณีที่สตาร์ทมอเตอร์ในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง ซึ่งเป็นการยืนยันว่ากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วให้ค่าแรงบิดขณะสตาร์ทที่ถูกต้องกว่ากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์

ในส่วนของคุณสมบัติของมอเตอร์ในย่านความเร็วพิกัดดังแสดงในรูปที่ 5.69 ถึงรูปที่ 5.71 ซึ่งได้จากการทดสอบภาระของมอเตอร์นั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.72 ถึงรูปที่ 5.74 พบว่ามีความใกล้เคียงกันมากและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือได้ของผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วในย่านความเร็วพิกัด

ในส่วนของผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เพิ่มขึ้นที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะคงตัวนั้นจากรูปที่ 5.63 ถึงรูปที่ 5.65 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทดสอบในกรณีที่ไม่มี的增加ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยมาเปรียบเทียบกับกรณีที่เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์จะเห็นว่าขนาดกระแสและมุมเฟสไม่แตกต่างกันซึ่งแสดงว่าการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ในสถานะคงตัวแต่อย่างใด

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.66 ถึงรูปที่ 5.68 ซึ่งเป็นรูปของกระแสและอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ในช่วงเร่งความเร็วในกรณีที่ไม่มี的增加ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ซึ่งจะพบว่าเวลาที่ใช้ในการสตาร์ทสั้นมากและจากรูปของอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์พบว่าสัญญาณความเร็วของมอเตอร์นั้นมีความบิดเบี้ยวสูงมากไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้ในการหาคุณลักษณะแรงบิดความเร็วรอบ และเมื่อพิจารณาที่กระแสพบว่าช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์นั้นอยู่ในช่วงประมาณ 3-4 cycle ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เหมาะสมควรจะทำให้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ยาวนานกว่าระยะเวลาในการเกิดสถานะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าพอสมควรรวมไปถึงการใช้เทคนิคการหมุนโรเตอร์กลับทิศก่อนการสตาร์ทเข้าช่วยเพื่อลดผลกระทบจากสถานะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าด้วย

ในส่วนของการที่จะเลือกค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดใหญ่เท่าไรนั้นควรพิจารณาจากปัจจัยหลายอย่างได้แก่เวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ซึ่งถ้าหากว่ามอเตอร์ใช้เวลาในการเร่งความเร็วนานมากจะทำให้กระแสที่มอเตอร์มีค่าสูงอยู่นาน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นภายในมอเตอร์ส่งผลให้ขดลวดและโรเตอร์เกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อนได้ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นอีกคือขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบ, ขนาดของเพลทที่ใช้รับน้ำหนักของล้อยช่วยแรง และราคาของล้อยช่วยแรงที่จะใช้ในการทดสอบซึ่งต้องนำมาใช้ประกอบการตัดสินใจด้วย

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้นำเสนอมาในวิทยานิพนธ์นี้พบว่า การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็วโดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยนั้นเป็นวิธีที่สะดวกมากและใช้เวลาในการทำการทดสอบที่สั้น มีค่าใช้จ่ายต่ำ ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอ นั้นไม่จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่สูงมากในการทำการทดสอบซึ่งเหมาะสำหรับการทดสอบสำหรับวิศวกรโรงงานหรือผู้ใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสทั่วไป



เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Standard 112-1996, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.
- [2] IEC Standard 34-2 1982 Part 2: Method for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicle).
- [3] Richard H. Engleman, William H. Middendorf. **Handbook of Electric Motors**. The United State of America : Marcel Dekker, Inc. 1995.
- [4] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, Stephen D. Umans. **Electric Machinery**. 5th Edition. London : McGraw Hill. 1992.
- [5] Gopal K. Dubey. **Fundamental of Electrical drives**. New Delhi, Madras, Bombay, Calcutta : Narosa Publishing House. 1995.
- [6] Philip L Alger. **Induction Machine their Behavior and Uses**. 2nd Edition Complete revise and update. Switzerland : Gordon and Breach Publishers. 1995
- [7] M.G.Say. **Alternating Current Machines**. 5th Edition. Singapore : Longman Singapore Publishers Pte Ltd. 1983.
- [8] Werner Leonhard. **Control of Electrical Drives**. 2nd Edition. Germany : Springer-Verleg Berlin Heidenberg. 1996.
- [9] Peter Vas. **Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machine** The United States of America : Oxford University Press. 1993.
- [10] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale. **Numerical Methods for Engineer with Programming and software Application**. 3rd Edition, McGraw-Hill. 1998.
- [11] Lawrence L Lapin. **Probability and Statistics for Modern Engineering**. 2nd Edition The United states of america : PWS-KENT Publishing Company. 1990.
- [12] David G. Kleinbaum, Lawrence L. Kupper, Kieth E. Muller and, Azhar Nizam. **Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods**. 3rd Edition The United states of America : Duxbury Press. 1998.
- [13] Syephen B. Vardeman. **Statistics for Engineering Problem Solving**. The United States of America : PWS Publishing Company. 1994
- [14] B.Szabados, J.H. Dableh, R.D. Findlay, G.M. Obermayer and, R.E. Draper. "Measurement of the Torque-Speed Characteristics of Induction Motors Using An Improved New Digital

- Approach". IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol.5, No.3 November 1990. pp.565-571.
- [15] J.H. Dymond, Raymond Ong and, Peter G. McKenna. "Locked-Rotor and Acceleration Testing of Large Induction Machines-Methods, Problems, and Interpretation of Results". IEEE Transactions on Industry Applications. Vol.36, No.4 July/August 2000. Pp.958-964.
- [16] Robbie F. McElveen, Michael K. Toney. "Starting High-Inertia Loads". IEEE Transactions on Industry Applications. Vol.37, No.1 January/February 2001. pp.137-144.
- [17] วรชาติ แซ่ก๊ก, พิชิต ลำยอง. "เทคนิคในการหาคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย" วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2544. หน้า 122-127
- [18] วรชาติ แซ่ก๊ก, พิชิต ลำยอง. "การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยวิธีการเร่งความเร็ว" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24), สกล. 22-23 พฤศจิกายน 2544 หน้า 199-204





ภาคผนวก ก
สถิติเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 การวัดแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูลและการวัดการกระจายของข้อมูล

วิชาสถิติสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือสถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics) และสถิติเชิงอนุมาน (inference statistics) โดยสถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics) เป็นระเบียบวิธีทางสถิติที่กล่าวถึงการรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลจาก “กลุ่มที่ต้องการศึกษา” โดยการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบต่างๆ ซึ่งรูปแบบที่ใช้นำเสนอมากที่สุดคือ 1. การวัดแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล และ 2. การวัดการกระจายของข้อมูล

ก.1.1 การวัดแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล

ในการวัดแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูลที่มีอยู่ 3 วิธีคือการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (mean), การหาค่ามัธยฐาน (median), และการหาค่าฐานนิยม (mode) วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือการใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (\bar{y}) ซึ่งสมการในการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตนี้แสดงดังสมการที่ ก1

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad (ก1)$$

โดยที่ n = จำนวนจุดข้อมูล

y_i = ขนาดข้อมูลในแต่ละจุดข้อมูล

$\sum y_i$ = ผลรวมข้อมูลจาก 1 ถึง n

ก.1.2 การวัดการกระจายของข้อมูล

ในการวัดการกระจายของข้อมูลวิธีที่นิยมใช้คือการหาค่าความคลาดเคลื่อน (standard error) หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ดังแสดงในสมการที่ ก2

$$s_y = \sqrt{\frac{S_r}{n-1}} \quad (ก2)$$

จากสมการที่ ก3 ค่า S_r แทนค่าผลรวมของผลต่างกำลังสองระหว่างค่าต่างๆของข้อมูลและค่าเฉลี่ยของข้อมูลดังสมการที่ ก3

$$S_r = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (ก3)$$

จากสมการที่ ก2 เป็นการอธิบายการเบี่ยงเบนออกจากค่ากลางของกลุ่มข้อมูลถ้าข้อมูลมีการกระจายตัวมากค่า S_r จะมีค่าสูง แต่ถ้าข้อมูลมีการกระจายตัวต่ำ S_r จะมีค่าต่ำ นอกจากการนำเสนอผลการคำนวณเป็นเอกสารที่ส่งมอบให้แล้ว ยังมีข้อควรระวังในการนำผลการคำนวณไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายของข้อมูลด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแล้วยังมีวิธีการแสดงการกระจายของข้อมูลอีก รูปแบบหนึ่งคือ การหาค่าความแปรปรวน (variance) ซึ่งมีค่าเท่ากับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานยกกำลังสอง ดังสมการที่ ก4

$$s_y^2 = \frac{S_t}{n-1} \quad (\text{ก4})$$

ก.1.2 ระดับความเป็นอิสระ (Degree of Freedom)

จากสมการที่ ก2 และ ก4 ตัวหารของสมการทั้งสองเรียกว่าระดับความเป็นอิสระ (degree of freedom) ซึ่งจะพบว่าค่าของ S_t และ s_y จะขึ้นอยู่กับระดับความเป็นอิสระ $n-1$ เหตุผลที่ระดับความเป็นอิสระเท่ากับ $n-1$ เนื่องจากในการคำนวณหาการกระจายตัวของข้อมูลรอบๆ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลใดๆ ซึ่งมีจำนวน n จะต้องใช้ตัวแปรเป็นจำนวน 1 แปรเพื่อใช้แทนค่าเฉลี่ย ซึ่งทำให้มีตัวแปรที่เป็นอิสระเหลือเพียง $n-1$ ตัว ส่วนในกรณีที่ทำกรหาการกระจายตัวของข้อมูลใดๆ รอบเส้นตรงหรือเส้นโค้งพหุนามที่แทนแนวโน้มของข้อมูลนั้นๆ ค่าระดับความเป็นอิสระของข้อมูลนั้นๆ จะมีค่าเท่ากับ $n - (m + 1)$ โดยที่ m แทนเลขชี้กำลังสูงสุดของเส้นตรงหรือเส้นโค้งนั้นๆ

ก.2 การอนุมานเชิงสถิติ (inference statistics)

การอนุมานเชิงสถิติเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลรูปแบบหนึ่ง โดยเป็นการศึกษาตัวอย่างของประชากรเพียงหนึ่งตัวอย่างเพื่อนำมาพิจารณาหรือสรุปว่าแนวโน้มของประชากรเป็นอย่างไร ซึ่งกรณีที่ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีอนุมานเชิงสถิติก็คือเมื่อมีความแปรปรวนในประชากร และมีการสุ่มตัวอย่างจากประชากรเป้าหมาย หลักการในการอนุมานเชิงสถิตินั้นแบ่งออกเป็นสองอย่าง คือ การประมาณค่า (estimation) และการทดสอบสมมติฐาน (hypothesis test) ในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการอนุมานเชิงสถิตินี้ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องอาศัยความเข้าใจรูปแบบการแจกแจงของกลุ่มตัวอย่างก่อน ซึ่งการแจกแจงที่สำคัญได้แก่การแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) การแจกแจงปกติมาตรฐาน (standard normal distribution) การแจกแจงแบบ T (T distribution) การแจกแจงแบบไคสแควร์ (chi-square distribution) และการแจกแจงแบบ F (F distribution)

ก.2.1 การแจกแจงข้อมูล (Sampling Distribution)

ก.2.1.1 การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

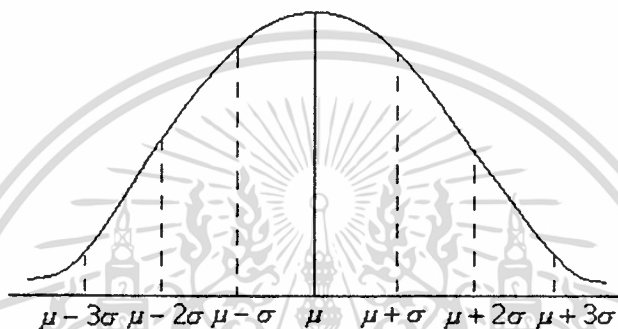
ลักษณะการแจกแจงความน่าจะเป็นของข้อมูลแบบปกตินี้จะมีรูปแบบเป็น โค้งระฆังคว่ำหรือโค้งปกติ ตัวแปรสุ่มซึ่งเป็นตัวแปรซึ่งสุ่มได้จากประชากรทั้งหมด ซึ่งถ้าตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ เรียกว่า ตัวแปรสุ่มปกติ (normal random variable) โดยถ้าค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานของตัวแปรสุ่มปกติมีค่าเท่ากับ μ และ σ^2 แล้ว ฟังก์ชันการแจกแจงของ X เขียนแทนด้วย $n(x; \mu, \sigma^2)$ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$n(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (ก5)$$

โดยที่ $-\infty < x < \infty$ โดยเส้นโค้งสมการที่ ก5 แสดงดังรูปที่ ก1



รูปที่ ก1 เส้นโค้งปกติ

คุณสมบัติของเส้นโค้งปกตินั้นแสดงดังต่อไปนี้

- ค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าฐานนิยมของเส้นโค้งอยู่ที่ $x = \mu$ (ตำแหน่งที่เส้นโค้งปกติสูงที่สุด)
- โค้งปกติจะสมมาตรกับแกนตั้งที่ลากผ่าน μ
- โค้งปกติจะมีจุดเปลี่ยนเว้าที่ $x = \mu \pm \sigma$ โดยที่ σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นโค้ง
- ปลายทั้งสองของเส้นโค้งจะบรรจบแกน x ที่ $-\infty$ และ $+\infty$
- พื้นที่ทั้งหมดใต้เส้นโค้งเหนือแกน x เท่ากับ 1
- ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มปกติ X มีค่าเท่ากับ μ และความแปรปรวนมีค่าเท่ากับ σ^2

ก.2.1.2 การแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน (Standard Normal Distribution)

เนื่องจากการในกลุ่มประชากรหนึ่งๆจะมีตัวแปรสุ่มหลายชุดซึ่งแต่ละชุดมีค่ากลางและความแปรปรวนไม่เท่ากันดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงต้องมีการแปลงรูปการแจกแจงให้อยู่ในรูปมาตรฐานที่สามารถอธิบายการแจกแจงของตัวแปรสุ่มชุดต่างๆได้ซึ่งก็คือการแจกแจงแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน โดยเส้นโค้งของการแจกแจงแบบปกติมาตรฐานจะมีค่ากลางเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1 ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปสมการดังสมการที่ ก6

$$\psi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}Z^2} \quad (\text{ก6})$$

โดยที่ $\psi(Z)$ = สมการเส้นโค้งหรือฟังก์ชันความหนาแน่นของ Z

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

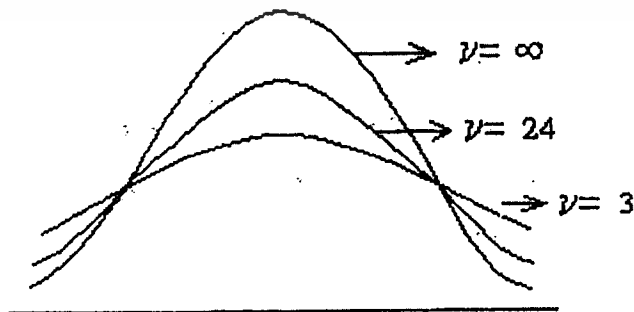
การแปลงค่า x ให้อยู่ในรูปของ z เรียกว่าการทำให้อยู่ในรูปปกติ(normalized)

ก.2.1.3 การแจกแจงแบบ T (T-Distribution)

การแจกแจง T เป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มต่อเนื่องที่มีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่แสดงได้ด้วยเส้นโค้งเรียบเหนือแกน T ตั้งต้นจาก $-\infty$ ถึง $+\infty$ เส้นโค้งจะเป็นเส้นโค้งสมมาตรที่ $t = 0$ และมีลักษณะคล้ายกับเส้นโค้งปกติมาตรฐาน ต่างกันที่การกระจายของตัวแปรสุ่ม Z ดังนั้นก็จะมีรูปร่างของการแจกแจง T ที่แตกต่างกันออกไปตามขนาดของ n ดังนั้น n จึงเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งของการแจกแจง T โดยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นหรือ สมการของการแจกแจง T เป็นดังสมการที่ ก7 โดยเส้นโค้งสมการที่ ก7 แสดงดังรูปที่ ก2

$$f(t) = \frac{k}{(1+t^2/\nu)^{(\nu+1)/2}} \quad (\text{ก7})$$

โดยที่ t เป็นค่าสังเกตของตัวแปรสุ่ม
 ν เป็นระดับความเป็นอิสระ



รูปที่ ก2 เส้นโค้งการแจกแจง T ที่ระดับความเป็นอิสระต่างๆ

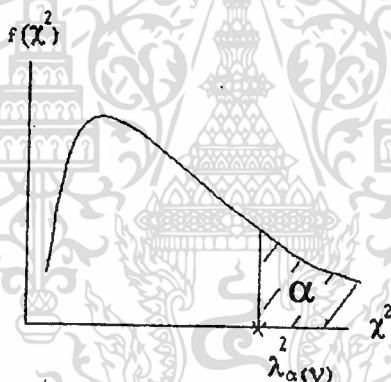
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.1.4 การแจกแจงแบบไคสแควร์ (Chi-Square Distribution)

การแจกแจงแบบไคสแควร์เป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม X^2 โดยใช้สัญลักษณ์ว่า χ^2 ซึ่งเป็นการคำนวณความแปรปรวนจากตัวแปรสุ่ม \bar{X} โดยการแจกแจงตัวแปรสุ่ม S^2 ไม่ได้มีการประยุกต์ใช้มากเท่ากับตัวแปรสุ่ม \bar{X} เราจึงสนใจการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม X^2 มากกว่าตัวแปรสุ่ม S^2 ดังสมการที่ ก8

$$X^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} \quad (\text{ก8})$$

เนื่องจากค่าของ χ^2 จะเป็นบวกเสมอ (จากสมการ ก8) ดังนั้นกราฟของเส้นโค้งการแจกแจงไคสแควร์จึงไม่สมมาตรที่ $\chi^2 = 0$ ซึ่งแตกต่างกับการแจกแจงปกติและการแจกแจง T โดยเส้นโค้งการแจกแจงไคสแควร์แสดงดังรูปที่ ก3



รูปที่ ก3 เส้น โค้งการแจกแจง chi square

ตัวแปรสุ่มไคสแควร์มีความน่าจะเป็นดังสมการที่ ก9

$$f(x^2) = k(x^2)^{\frac{v}{2}-1} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (\text{ก9})$$

- โดยที่ $e = 2.71828$
 $v =$ ระดับความเป็นอิสระ
 $k =$ ค่าคงที่ขึ้นกับระดับความเป็นอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

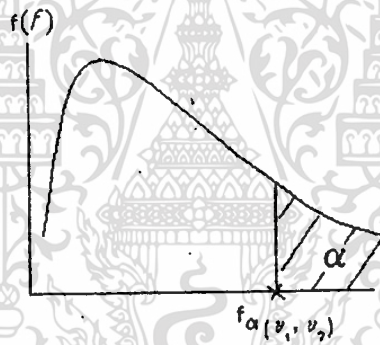
ก.2.1.5 การแจกแจงแบบ F (*F* Distribution)

การแจกแจง *F* เกิดจากอัตราส่วนของการแจกแจงไคสแควร์ของตัวแปรสุ่มสองตัวที่เป็นอิสระต่อกัน แต่ละตัวหารด้วยระดับความเป็นอิสระของตัวเอง ดังนั้น ถ้าให้ *f* เป็นค่าที่เกิดจากตัวแปรสุ่ม *F* จะได้สมการที่ ก10

$$f = \frac{\chi_1^2 / \nu_1}{\chi_2^2 / \nu_2} = \frac{S_1^2 / \sigma_1^2}{S_2^2 / \sigma_2^2} = \frac{S_1^2 \sigma_2^2}{S_2^2 \sigma_1^2} \quad (\text{ก10})$$

โดยที่ *f* คือค่าของการแจกแจง *F* ที่มีระดับความเป็นอิสระเท่ากับ ν_1 และ ν_2

การแจกแจง *F* จึงขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์สองตัวคือ ν_1 และ ν_2 และขึ้นอยู่กับลำดับที่ของระดับความเป็นอิสระ ν_1 และ ν_2 ด้วย เส้นโค้งการแจกแจง *F* แสดงดังรูปที่ ก4



รูปที่ ก4 เส้นโค้งการแจกแจง *F*

สมการเส้นโค้งหรือความน่าจะเป็นของการแจกแจง *F* เป็นดังสมการที่ ก11

$$f(f) = k f^{(\nu_1/2)-1} \left(1 + \frac{\nu_1 f}{\nu_2}\right)^{-(\nu_1+\nu_2)/2} \quad (\text{ก11})$$

โดยที่ *f* มีค่ามากกว่า 0

ก.2.2 การประมาณค่า (Estimation)

ค่าลักษณะเฉพาะที่สำคัญบางค่า เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าสัดส่วน และค่าความแปรปรวนแปรจากประชากร มีประโยชน์มากสำหรับการเปรียบเทียบ และตัดสินใจในการบริหารงาน เป็นค่าจริงที่บางครั้งเราไม่ทราบค่าเนื่องจากไม่สามารถเก็บข้อมูลจากทุกหน่วยในประชากรได้ ดังนั้นในทางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิบัติจึงใช้วิธีสุ่มเลือกตัวอย่างขนาด n มากลุ่มหนึ่ง คำนวณค่าลักษณะเฉพาะตัวที่ต้องการทราบ แล้วอนุมานหรือประมาณพารามิเตอร์สำหรับประชากรนั้น

การประมาณค่าพารามิเตอร์ในประชากร ค่าจากตัวประมาณค่าที่คำนวณได้จากสิ่งตัวอย่าง ทำได้ 2 วิธีคือ การประมาณแบบจุดและการประมาณค่าแบบช่วง

ก.2.2.1 การประมาณค่าแบบจุด (Point Estimation)

การประมาณค่าเฉลี่ยของประชากร เราอาจใช้ค่าใด ๆ ที่อาจหาได้จากข้อมูลเป็นค่าโดยประมาณของค่าเฉลี่ยประชากร เช่น ค่าเฉลี่ยของข้อมูล ค่าแรกของข้อมูล เป็นต้น ค่าประมาณเหล่านี้มีค่าเป็นค่าเดียวซึ่งใช้ประมาณค่าเฉลี่ยของประชากร ค่าโดยประมาณเหล่านี้เรียกว่า ค่าประมาณแบบจุด และตัวแปรแบบสุ่มที่ใช้สำหรับการหาค่าโดยประมาณเหล่านี้ก็เรียกว่า ตัวประมาณค่าแบบจุด

การที่มีตัวแปรสุ่มที่สามารถใช้เป็นตัวประมาณค่าของพารามิเตอร์ได้มากมาย จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้ตัวประมาณค่าที่ให้ค่าใกล้เคียงที่สุดกับค่าพารามิเตอร์ โดยคุณสมบัติทางสถิติที่สามารถใช้ในการเลือกตัวประมาณค่าที่เหมาะสมก็คือ ความไม่ลำเอียง (unbiasedness) ความแปรปรวนน้อยที่สุด (minimum variance) ความเสมอต้นเสมอปลาย (consistency) และประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (relative efficiency)

ก.2.2.2 การประมาณค่าแบบช่วง (Interval Estimation)

เนื่องจากการประมาณค่าแบบจุดเป็นการประมาณค่าที่ให้ผลไม่ค่อยดีนัก เพราะเป็นการยากที่เราจะได้ค่าโดยประมาณจากตัวประมาณค่า เท่ากับพารามิเตอร์ที่มันประมาณ การประมาณค่าแบบช่วงจึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ ค่าโดยประมาณแบบช่วงจะอยู่ในลักษณะ (L, U) โดยที่ L หมายถึงค่าต่ำสุดที่เชื่อว่าอาจจะเท่ากับค่าของพารามิเตอร์ และ U หมายถึงค่าสูงสุดที่เชื่อว่าอาจจะเท่ากับค่าของพารามิเตอร์ ทั้ง L และ U เป็นฟังก์ชันของตัวอย่างซึ่งใช้เป็นตัวแทนของประชากร เนื่องจากตัวแปรของตัวอย่างเป็นตัวแปรแบบสุ่ม ดังนั้นทั้ง L และ U จึงเป็นตัวแปรแบบสุ่มด้วย ค่าของ L และ U จึงมีค่าต่าง ๆ แล้วแต่กลุ่มของตัวอย่าง ค่าของ L และ U ที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 ไม่จำเป็นจะต้องเท่ากับค่า L และ U ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างในการทดลองครั้งอื่น ๆ จากการที่ L และ U เป็นตัวแปรสุ่มเราจำเป็นที่จะต้องกำหนดค่าความน่าจะเป็นสำหรับความเชื่อมั่นที่มีต่อค่าโดยประมาณของพารามิเตอร์

ถ้าให้ θ คือพารามิเตอร์ที่เราต้องการจะประมาณค่าช่วงของตัวประมาณค่า (L, U) กำหนดความน่าจะเป็นที่ทำให้ $L < \theta < U$ เท่ากับ $1 - \alpha$ เราจะได้ว่า ช่วงระหว่าง L กับ U ก็คือช่วงความเชื่อมั่น ส่วนความน่าจะเป็น $1 - \alpha$ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น (confidence coefficient) หรือระดับความเชื่อมั่น (confidence level) ซึ่งมีสมการทางสถิติดังสมการที่ ก12

$$P(L \leq \theta \leq U) = 1 - \alpha \quad (\text{ก12})$$

โดยสมการดังกล่าวสามารถตีความได้ว่า ค่าใด ๆ ระหว่าง L กับ U จะต้องมีค่าหนึ่งซึ่งเท่ากับค่าของพารามิเตอร์ θ ด้วยความเชื่อมั่น $100(1 - \alpha)\%$

ก.2.3 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test)

สมมติฐานทางสถิติ คือ ข้อสมมุติหรือข้อกำหนดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของประชากรหนึ่งชุดหรือมากกว่า ซึ่งอาจจะจริงหรือไม่จริงก็ได้ เราไม่มีโอกาสทราบอย่างมั่นใจว่าข้อสมมติฐานที่เราสร้างขึ้นนั้นจะถูกหรือผิด จนกว่าเราจะได้รับรู้ประชากรทั้งหมด ซึ่งทำไม่ได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นเราจึงจะใช้วิธีสุ่มเลือกตัวอย่างจากประชากรที่สนใจแทนแล้วใช้ข้อมูลนั้นมาวิเคราะห์ และตัดสินใจว่าสมมติฐานนั้นถูกต้องหรือไม่ถูกต้อง ถ้าข้อสรุปจากสิ่งตัวอย่างไม่สอดคล้องกับสมมติฐาน ก็นำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐาน ถ้าข้อสรุปจากสิ่งตัวอย่างสอดคล้องกับสมมติฐาน เราก็ยอมรับสมมติฐานนั้น การยอมรับสมมติฐาน ย่อมมีความหมายว่าไม่มีเหตุผลเพียงพอที่จะเชื่อเป็นอย่างอื่น

ก.2.3.1 การทดสอบทางเดียวและสองทาง

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติเกี่ยวกับพารามิเตอร์ใดๆ ที่มีสมมติฐานทางเลือกเป็นสมการ เช่น

$$H_0 : \theta = \theta_0$$

$$H_1 : \theta > \theta_0$$

หรือ

$$H_0 : \theta = \theta_0$$

$$H_1 : \theta < \theta_0$$

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบสมมติฐานทางเดียว (one-tailed test, one-side test) เกิดขึ้นเมื่อมีบริเวณวิกฤต สำหรับสมมติฐานทางเลือก $H_1 : \theta > \theta_0$ อยู่ทางด้านขวาของเส้นโค้งแจกแจงและบริเวณวิกฤตสำหรับสมมติฐานทางเลือก $H_1 : \theta < \theta_0$ อยู่ทางด้านซ้ายของเส้นโค้งการแจกแจง หากการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ใด ๆ มีสมมติฐานทางเลือกดังนี้

$$H_0 : \theta = \theta_0$$

$$H_1 : \theta \neq \theta_0$$

การทดสอบสมมติฐานนี้เป็นแบบการทดสอบสองทาง (two-side test) สมมติฐานทางเลือกนี้จะหมายถึง $\theta < \theta_0$ หรือ $\theta > \theta_0$ ดังนั้นจะมีบริเวณวิกฤตอยู่ทั้งสองข้างทั้งซ้ายและขวาของเส้นโค้งการแจกแจง

ก.2.3.2 วิธีการทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ มีวิธีคล้ายกับการประมาณค่าโดยเราจะสร้าง ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ $100(1-\alpha)\%$ และยอมรับสมมติฐานที่น่าจะเป็นจริง $H_0: \theta = \theta_0$ ถ้า θ_0 อยู่ในช่วงดังกล่าว แต่ถ้า θ_0 ตกอยู่นอกช่วง เราจะปฏิเสธสมมติฐานที่น่าจะเป็นจริง และยอมรับสมมติฐานทางเลือกแทน โดยมีหลักการทั่วไปดังนี้

1. ตั้งสมมติฐานที่น่าจะเป็นจริง และสมมติฐานทางเลือก คือ H_0 และ H_1
2. กำหนดระดับนัยสำคัญ คือ α
3. กำหนดตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสม ซึ่งในที่นี้ใช้ การแจกแจงแบบ F ดังแสดงในสมการที่ ก13 และ ก14

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (\text{ก13})$$

$$df = n_1 - 1, n_2 - 1 \quad (\text{ก14})$$

4. กำหนดบริเวณวิกฤตและบริเวณของการยอมรับ
5. คำนวณค่าสถิติจากข้อมูลที่ได้มาจากสิ่งตัวอย่างกลุ่มขนาด n โดยใช้สมการการคำนวณจากตัวสถิติในข้อ 3
6. นำข้อมูลที่นำมาทำการตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐาน หากข้อมูลอยู่ภายในเกณฑ์การยอมรับให้ยอมรับสมมติฐาน แต่หากข้อมูลอยู่นอกเกณฑ์การยอมรับให้ปฏิเสธสมมติฐานนั้น

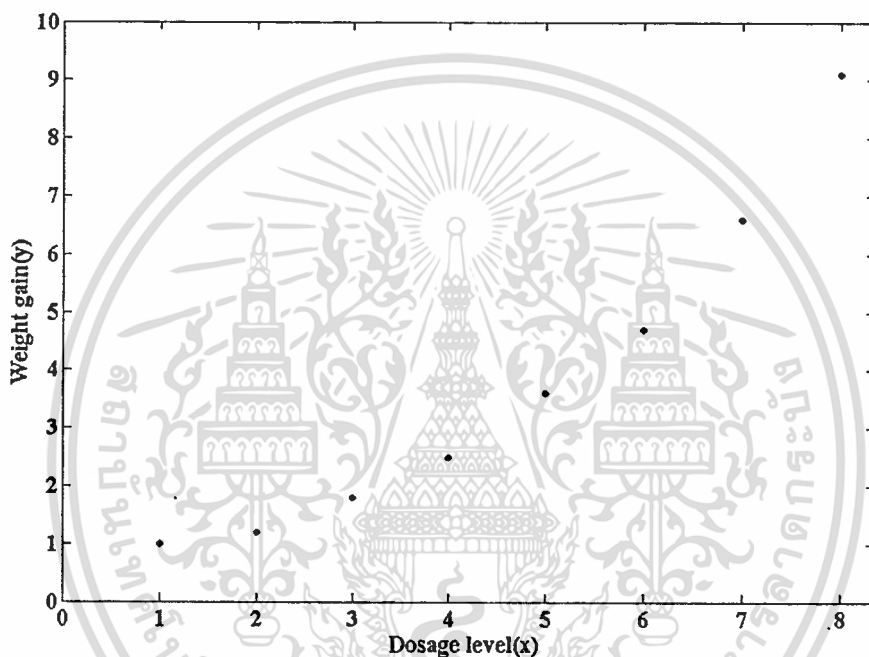
ก.3 ตัวอย่างการใช้การทดสอบสมมติฐานเพื่อทำการหาค่าเลขชี้กำลังสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับแนวโน้มของข้อมูล

ตัวอย่างที่น่าเสนอนี้เป็นตัวอย่างการทดสอบสมมติฐานเพื่อการหาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองที่ใช้แสดงแนวโน้มของข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยาที่ให้กับสัตว์ทดลองกับน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นของสัตว์ทดลองในห้องเลี้ยงแห่งนี้[12] ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดให้ตัวแปรต้นคือปริมาณยาที่ให้แก่สัตว์ (X) และตัวแปรตามคือน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของสัตว์ทดลอง (Y) มีหน่วยเป็นเคคากรัม (dag) โดยในการทดลองได้ทำการกำหนดระดับยาไว้ 8 ระดับ และสัตว์ที่ใช้ในการ

ทดลองมีเพศเดียวกัน, อายุเท่ากัน และมีขนาดเท่ากันซึ่งข้อมูลได้มาจากการบันทึกภายหลังจากให้ยาไปแล้ว 2 สัปดาห์ โดยข้อมูลแสดงดังตารางที่ ก1

ตารางที่ ก1 นำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นของสัตว์ทดลองภายหลังจากให้ยาเป็นเวลา 2 สัปดาห์

Dosage level(X)	1	2	3	4	5	6	7	8
Weight gain(Y) (dag)	1	1.2	1.8	2.5	3.6	4.7	6.6	9.1



รูปที่ ก5 Scatter Diagram ของข้อมูลความสัมพันธ์ของการเพิ่มน้ำหนักของสัตว์ทดลองกับปริมาณยาที่ให้

ในการพิจารณาข้อมูลดังกล่าวต้องสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยขั้นแรกเป็นการพิจารณาว่าสมการเส้นตรงมีนัยสำคัญในการที่จะแทนความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสอง โดยการรวมค่า $\text{regression } x^2 | x$ sum of square เข้ากับค่า residual sum of square และใช้ least square regression ทำการหาสมการเส้นตรงจะได้สมการ

$$\hat{y} = -1.20 + 1.11x \quad (\text{ก15})$$

จากสมการที่ ก15 เมื่อทำการหาค่า r^2 ของสมการดังกล่าวจะได้ค่า r^2 เท่ากับ 0.9118

เมื่อพิจารณาตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ตารางดังแสดงในตารางที่ ก2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก2 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยสำหรับการฟิต curve ด้วยแบบจำลองที่มีสมการเป็นเส้นตรง

Source	d.f.	SS	MS	F
Regression (X)	1	52.04	52.04	62.5
Residual	6	5.03	0.84	
Total (corrected)	7	57.07		

จากค่า F ในตารางที่ ก2 มีค่าเท่ากับ 62.053 ซึ่งมากกว่า $F_{1,6,0.999} = 35.51 (P < 0.001)$ ซึ่งแสดงว่าสมการเส้นตรงมีนัยสำคัญดังนั้นสมมติฐานหลักที่กล่าวว่าการถดถอยแบบเส้นตรงไม่มีนัยสำคัญจึงตกไป

ขั้นตอนต่อมาคือทำการทดสอบว่า ถ้าเพิ่มพจน์ x^2 เข้าไปในแบบจำลองเพื่อทำการปรับปรุงการทำนายแนวโน้มของข้อมูล ซึ่งเมื่อใช้ least square regression ทำการหาสมการจะได้สมการ

$$\hat{y} = 1.35 - 0.41x + 0.17x^2 \quad (ก16)$$

จากสมการที่ ก16 เมื่อทำการหาค่า r^2 ของสมการดังกล่าวจะได้ค่า r^2 เท่ากับ 0.997 และเมื่อทำตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ตารางที่ ก3

ตารางที่ ก3 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยสำหรับการฟิต curve ด้วยแบบจำลองที่มีสมการเป็นพาราโบลา

Source	d.f.	SS	MS	F
Regression (X)	1	52.04	52.04	61.95
Regression ($X^2 X$)	1	4.83	4.83	120.75
Residual	5	0.20	0.04	
Total (corrected)	7	57.07		

จากการทดสอบโดยใช้ตัวทดสอบสถิติ F statistic ด้วยวิธี partial F test

$$F = \frac{(\text{Extra sum of square due to adding } X^2) / 1}{\text{MS residual (second order model)}} \quad (ก17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \frac{4.83}{0.04} = 120.75 \quad (ก18)$$

เมื่อนำค่าจากสมการที่ ก18 มาพิจารณากับตารางการกระจายแบบ F พบว่าค่า $F = 120.75$ มีค่ามากกว่าค่า $F_{1,5,0.999} = 47.18 (P < 0.001)$ แสดงว่าการเพิ่ม X^2 ลงในแบบจำลอง ยังทำให้สมการถดถอยมีนัยสำคัญอยู่ และเมื่อพิจารณาร่วมกับค่า r^2 พบว่าค่า r^2 เพิ่มขึ้น 0.85 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่มีดีกรีของโพลีโนเมียลเท่ากับ 2 นั้นเหมาะสมกว่าการใช้แบบจำลองที่เป็นสมการเส้นตรง

ในขั้นตอนต่อมาเป็นการพิจารณาว่าถ้ามีการเพิ่ม X^3 ลงไปในสมการของแบบจำลองจะมีผลอย่างไร ซึ่งขั้นตอนเป็นดังการเพิ่ม X^2 ลงในสมการเส้นตรง ซึ่งได้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ ก4

ตารางที่ ก4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยสำหรับการฟิต curve ด้วยแบบจำลองที่มีสมการเป็น โพลีโนเมียลดีกรี 3

Source	d.f.	SS	MS	F
Regression (X)	1	52.04	52.04	
Regression ($X^2 X$)	1	4.83	4.83	
Regression ($X^3 X, X^2$)	1	0.14	0.14	10.00
Residual	4	0.0058	0.00144	
Total (corrected)	7	57.07		

จากตารางที่ ก4 ค่า F ที่ได้มีค่ามากกว่า $F_{1,4,0.95} = 7.71$ แต่มีค่าน้อยกว่า $F_{1,4,0.975} = 12.22$ ซึ่งจะได้ค่าความน่าจะเป็น $.025 < P < 0.05$ ซึ่งทำให้สมมติฐานหลักตกไปเมื่อค่าความน่าจะเป็น 0.05 แต่ยอมรับเมื่อค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.025 และเมื่อพิจารณาค่า r^2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.999 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากกรณีที่เป็นสมการกำลังสองเพียง 0.997 แล้วนับว่าน้อยมาก ประกอบกับ scatter diagram ของข้อมูลใกล้เคียงกับสมการพาราโบลามากกว่าและสมการพาราโบลามีความซับซ้อนน้อยกว่า กล่าวคือมีพารามิเตอร์น้อยกว่านั่นเอง ดังนั้นสมการแบบจำลองที่เหมาะสมกับข้อมูลในตารางที่ ก1 คือสมการ โพลีโนเมียลดังสมการที่ ก19

$$\hat{y} = 1.35 - 0.41x + 0.17x^2 \quad (ก19)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 โมเมนต์ของความเฉื่อย

นิยามของโมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia (J)) ของวัตถุแข็งเกร็งรอบแกนคือ ผลรวมของผลคูณของมวลอนุภาค (m_i) กับกำลังสองของระยะที่อนุภาคอยู่ห่างจากแกนหมุน (R_i^2) แสดงดังสมการที่ ข1

$$J = \sum_{i=1}^n m_i R_i^2 \quad (\text{ข1})$$

เนื่องจากวัตถุแข็งเกร็งประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมาก หากวัตถุแข็งเกร็งมีความหนาแน่น ρ เมื่อปริมาตรน้อยยิ่ง (infinitesimal volume (dV)) จะมีมวลน้อยยิ่ง (infinitesimal mass (dm)) จะได้ดังสมการที่ ข2

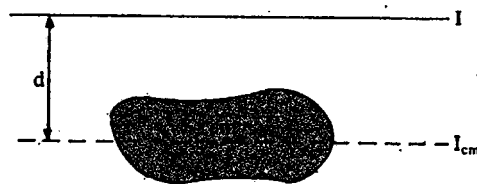
$$dm = \rho dV \quad (\text{ข2})$$

เมื่อนำสมการที่ ข2 มาพิจารณาค่าความสัมพันธ์เมื่อ infinitesimal mass อยู่ห่างจากแกนหมุนเท่ากับ r จะเป็นดังสมการที่ ข3

$$J = \sum_{i=1}^n m_i R_i^2 = \int r^2 dm = \int \rho r^2 dV \quad (\text{ข3})$$

ข.1.1 ทฤษฎีบทแกนขนาน

ทฤษฎีบทแกนขนานมีเนื้อหา ดังนี้ โมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นวัตถุรอบแกนที่ตั้งฉากกับแผ่นวัตถุและจุดตรึงบนแผ่นวัตถุ (J) เท่ากับผลบวกของโมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นวัตถุรอบแกนที่ตั้งฉากและเส้นผ่านศูนย์กลางมวลของแผ่นวัตถุ (J_{CM}) กับ โมเมนต์ความเฉื่อยของศูนย์กลางมวลรอบแกนที่ตั้งฉากและผ่านจุดตรึง (O) บนแผ่นวัตถุดังกล่าว (Md^2) รายละเอียดแสดงในรูปที่ ข1



รูปที่ ข1 การย้ายแกนของโมเมนต์ความเฉื่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

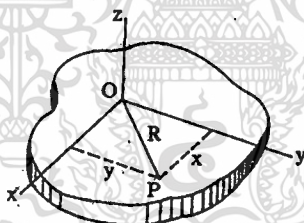
จากทฤษฎีบทนี้จะกล่าวได้ว่า โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนหนึ่ง (J_o) เท่ากับผลบวกของ โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนที่ขนานกับแกนนั้นและเส้นผ่านศูนย์กลางมวล (J_{CM}) กับผลคูณของมวลวัตถุกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างแกนทั้งสองนั้น (Md^2) โดยสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ตามสมการที่ ข4

$$J_o = J_{CM} + Md^2 \quad (ข4)$$

ข.1.2 ทฤษฎีบทแกนตั้งฉาก

ทฤษฎีบทแกนตั้งฉากมีเนื้อหาดังนี้ โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุเกร็งบางรอบแกนที่ตั้งฉากกับระนาบของแผ่น (J_z) เท่ากับผลบวกของ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนอีก 2 อัน ซึ่งอยู่ในระนาบเดียวกัน ตั้งฉากกันและตัดตั้งฉากกับแกนเดิม ($J_x + J_y$) รายละเอียดแสดงในรูปที่ ข2 โดยสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ตามสมการที่ ข5

$$J_z = J_x + J_y \quad (ข5)$$



รูปที่ ข2 แผ่นวัตถุแข็งเกร็งบนระนาบ xy

ข.1.3 รัศมีไจเรชั่น

รัศมีไจเรชั่น (radius of gyration, k) เป็นค่าสมมติของระยะทางจากตำแหน่งที่คิดว่ามวลทั้งหมดรวมกันอยู่ถึงแกนหมุน โดยรัศมีไจเรชั่นเป็นดังสมการที่ข6

$$k = \left(\frac{J}{M}\right)^{1/2} \text{ หรือ } J = Mk^2 \quad (ข6)$$

ข.1.4 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรูปทรงกระบอกกลวง

ค่ากำลังสองของรัศมีไจเรชั่นของวัตถุทรงกระบอกคือ $\frac{R_1^2 + R_2^2}{2}$ ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกกลวงที่ผ่านจุดศูนย์กลาง (C) และตั้งฉากกับระนาบของวงแหวนเป็นไปตามสมการที่ ข7

$$J = J_{CM} M \frac{R_1^2 + R_2^2}{2} \quad (ข7)$$

จากทฤษฎีแกนขนานจะได้โมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกกลวงรอบแกนที่ขอบและขนานกับแกน เป็นดังสมการที่

$$J_o = J_{CM} + MR^2 = M \frac{R_1^2 + R_2^2}{2} + MR^2 \quad (ข8)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1 สมการที่ใช้แทนแนวโน้มของค่า rms ของกระแสและอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว

จากผลการทดลองในบทที่ 5 ได้นำเสนอผลการทดลองหาค่าคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ และคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบในรูปแบบของกราฟซึ่งก่อนที่จะได้กราฟดังกล่าวจำเป็นต้องทำการหาสมการแนวโน้มของความเร็วรอบและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเพื่อใช้สำหรับการคำนวณซึ่งสมการที่ได้แสดงดังตารางที่ ค1,ค2 และ ค3

ตารางที่ ค1 การทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า

ขนาดโมเมนต์ ความเฉื่อย	กระแส	อัตราเร็วเชิงมุม
0.0994	10	7
0.5054	8	8
1.0093	9	9

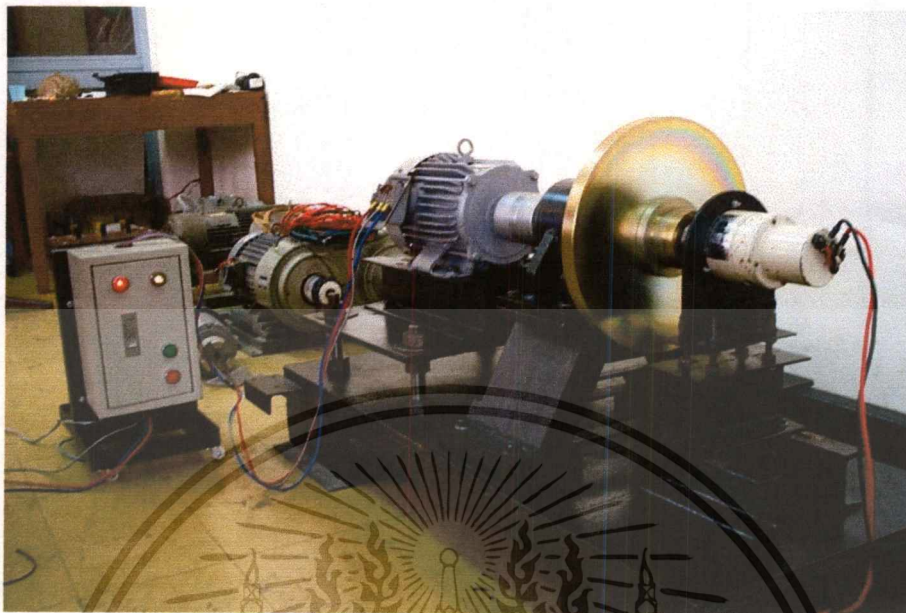
ตารางที่ ค2 การทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า

ขนาดโมเมนต์ ความเฉื่อย	กระแส	อัตราเร็วเชิงมุม
0.5054	9	9
1.0093	8	12
1.5352	8	12

ตารางที่ ค3 การทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

ขนาดโมเมนต์ ความเฉื่อย	กระแส	อัตราเร็วเชิงมุม
0.5054	10	7
1.0093	8	8
1.5352	9	9

ค.2 รูปการทดสอบต่างๆ

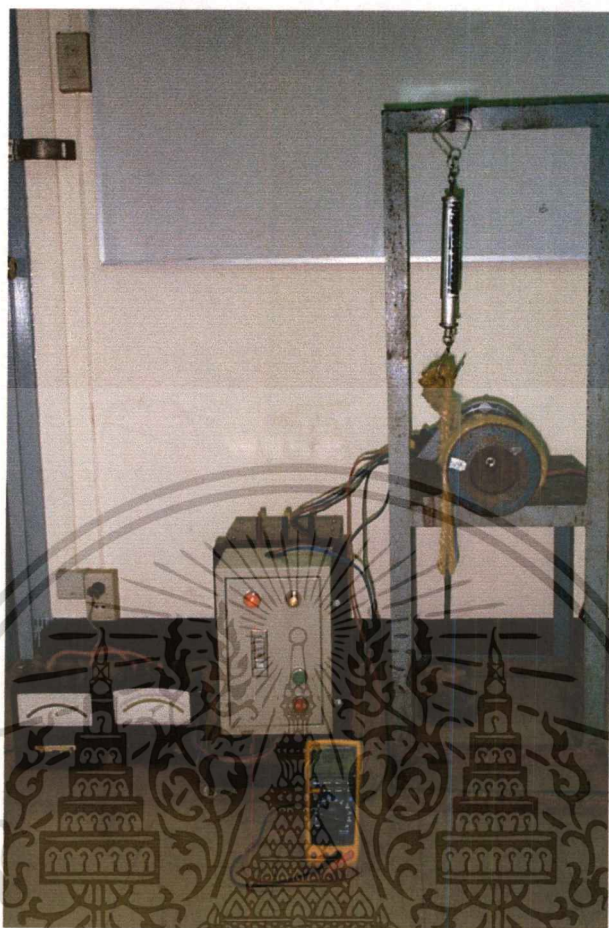


รูปที่ ค1 การทดสอบเร่งความเร็ว (acceleration test) และการทดสอบหน่วงความเร็ว (retardation test)



รูปที่ ค2 การทดสอบล๊อคโรเตอร์ (locked rotor test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค3 การทดสอบภาระของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (load test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.	การเพิ่มประสิทธิภาพบอร์ดประมวลผลสัญญาณ TMS320C3x DSP Starter Kit ชูลิทธิ ประดับเพชร มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ สุรพันธ์ ยิ้มมัน	1
2.	การออกแบบตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัชซีฟไอ+ดี สำหรับกระบวนการเชิงเส้นที่อยู่ในช่วง อรรถพล ก็นทเวก จงกล จามวิวิทย์ สุธี ผู้เจริญชนะชัย	7
3.	ระบบการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ PLC ควบคุม บัณฑิต มงคลวรผล เชื้อ นกอบุ กอบชัย เดชหาญ	13
4.	การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นหนึ่งมิติโดยวิธีผลต่างสลับเนื่อง สมชาติ พนาเกษม สรายุทธ วิศวแสงสุข สุรศักดิ์ เนียมเจริญ โยอิชิ ยาซุมุระ วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง	19
5.	เครื่องตรวจจับขนาดสูงสุดแบบทันทีสำหรับสัญญาณรูปไซน์ระบบ 3 เฟส วรรณภา ยาดำ วิวัฒน์ กิรานนท์ จริยา เลิศจรสอรามดี วิภา แสงพิสิทธิ์	24
6.	วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่โดยใช้วงจรสายพานกระแสแบบสองเอาต์พุต ประจวบ ปวรางกูร วิวัฒน์ กิรานนท์	30
7.	วงจรกรองความถี่ชนิดไบควอดที่มีสามอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต วิจิตรา เพ็ชรกิจ วิวัฒน์ กิรานนท์ จริยา เลิศจรสอรามดี อัจฉรวรรณ เนืองนิตย์	35
8.	อุปกรณ์แปลงสัญญาณเชิงเลขหลายรูปแบบให้เป็นสัญญาณเสียงเชิงอุปมาน เอกชัย พรหมมาส กอบชัย เดชหาญ	41
9.	วงจรถ่ายสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบแกว่งเต็มคลื่นโดยใช้วงจรมิกซ์เจอร์ชนิด BiCMOS ศิริวัฒน์ ลิ้มใหญ่ชัย กอบชัย เดชหาญ วิษณุ กอพนัคนิพนธ์	47
10.	วงจรถองความถี่ต่ำผ่านใช้แหล่งจ่ายแรงดันและกำลังงานต่ำที่จับได้โดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ มนตรี คำเงิน กอบชัย เดชหาญ	52
11.	วงจรถองความถี่แบนด์พาสที่มีแถบความถี่ศูนย์กลางหยุดที่ 60Hz โดยใช้วงจรถักโดเมน มนตรี คำเงิน กอบชัย เดชหาญ	57
12.	การวิเคราะห์และแนวทางปรับปรุงปัญหากราฟฟิคของโทรศัพท์พื้นฐานพกพา วรรณฤดี เดชะสุวรรณ กอบชัย เดชหาญ	62
13.	วิเคราะห์ระบบในการเชื่อมต่อ ATM Virtual เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในเครือข่ายชนิด ATM รุทธิรงค์ สุนกุล กอบชัย เดชหาญ	68
14.	การวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้ารหัส FEC ในระบบ ATM ไร้สายที่ใช้การเข้าถึงแบบ CDMA ศิริกานต์ ชูเชิด สุวิมล สิทธิชีวภาค เกียรติกร วงศ์โรจน์กรณ์	74
15.	การแบ่งกลุ่มภาพแบบมัลติชันแนลโดยใช้เทคนิค PCA-FCM สมจิต นาดิ กอบชัย เดชหาญ	80
16.	การทำงานอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายเมื่อกระแสไหลดัดไม่เป็นเชิงเส้น อัฐวุฒิ วงศ์ใหญ่ สุลี บรรจงจิตร นัทศน์ กฤษณจินดา บุญเลิศ สือเจย	86
17.	การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลตเพื่อหาตำแหน่งฟอลต์ในสายส่ง พงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง พุฒิชจร บุญมี สุลี บรรจงจิตร นัทศน์ กฤษณจินดา	92
18.	การวิเคราะห์คุณสมบัติแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ปัญญา มาลีวัตร มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ สุลี บรรจงจิตร นัทศน์ กฤษณจินดา บุญเลิศ สือเจย	98
19.	การศึกษากระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจากเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และผลกระทบต่อกระแสในสายนำตรอล สุกัญญา จรุงเกียรติกำจร ศิริวัฒน์ ไพธเวทกุล ชุตินันท์ อู่ยายโสม อิศระ วงษ์ศิลป์ วสันต์ อู่ยายโสม	104
20.	การดำเนินงานอย่างประหยัดในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธีการทำออปติมิไลเซชัน พรเทพ ปัญญาแก้ว ศิริวัฒน์ ไพธเวทกุล	110
21.	การวัดค่าดีเอสอาร์บางส่วนในชุดคาปาซิเตอร์แรงดันต่ำ จงรักษ์ บุญเสียง พรหมศักดิ์ อภิรติกุล กนกพล นาคะวิวัฒน์ ศุภวุฒิ คัมภิรานนท์	116
22.	เทคนิคในการหาคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย วราชาติ แซ่กิก พิชิต ล้ายอง	122
23.	การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซีโดยประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับสมการเรชิตวล สิบลพศ์ สุวรรณภูมิ ศิริวัฒน์ ไพธเวทกุล	128
24.	การศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมตายที่มีต่อความเค้นดึงระหว่างทำการดึงลดขนาดลวดด้วยวิธีทดลอง สมชัย นเรศจรูโสภณ ธนิต แดงศรี	134

เทคนิคในการหาคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของ มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย

A Technique to Evaluate the Torque-Speed Characteristics of an Induction Motor Using an Acceleration Method by Increasing the Moment of Inertia

วรชาติ แซ่ก๊ก พิชิต ถ้ายก

ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เหมาะสมกับงานต่าง ๆ นั้น ผู้ใช้จำเป็นต้องทราบถึงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ก่อน ซึ่งวิธีการทดสอบหาคุณลักษณะดังกล่าวนี้มีหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบโดยใช้ dynamometer , วิธีการวัดกำลังไฟฟ้าเข้าที่ทุกขงมอเตอร์ และวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์ (acceleration method) เป็นต้น บทความฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์ (acceleration method) ซึ่งวิธีดังกล่าวได้มีระบุไว้ในมาตรฐาน IEEE std 112-1996[1] โดยค่าแรงบิดของมอเตอร์สามารถคำนวณจากข้อมูลความเร็วของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากหยุดนิ่งจนกระทั่งความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส ในการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) หดไป ดังนั้นบทความฉบับนี้จึงนำเสนอเทคนิคในการเพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการคับปลิง (coupling) วัตถุทรงกระบอกเข้ากับเพลลาของมอเตอร์เพื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำต่างขนาดได้ถูกนำมาทำการทดสอบโดยอาศัยวิธีการของ acceleration method และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีดังกล่าวสามารถให้คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม

Abstract

The torque-speed relationship is an important characteristic of an induction motor. In order to select the proper motor for an application, the torque-speed characteristic must be measured. There are many methods to evaluate the torque-speed characteristic e.g. dynamometer, output power measurement, and acceleration method etc. This paper presents a method to evaluate the torque-speed characteristic of an induction motor using an acceleration method. This method is specified in IEEE standard std. 112-1996. The value of the torque is calculated from the speed of the induction motor from a standstill to a speed near the synchronous speed. For this method, a long accelerating time is required to avoid effect of an electrical transient. As a result a technique

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

to increase the accelerating time by coupling a cylindrical object to the shaft of the motor is proposed. Using such a method, the moment of inertia of the motor can be increased. Tests are performed on various sizes of the induction motor, and it is found that the acceleration method is able to predict the torque-speed curve of the motor reasonable.

1. บทนำ

ในการใช้งานมอเตอร์ให้เหมาะสมกับงานนั้น ผู้ใช้จำเป็นต้องทราบถึงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำก่อนซึ่งวิธีการที่จะได้มาซึ่งคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบนั้นมีหลายวิธียกตัวอย่างเช่น จากมาตรฐาน IEEE sdt 112-1996 [1] ได้ระบุวิธีการในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำไว้ 4 วิธี ได้แก่ 1. วิธีการวัดค่าเอาต์พุต (output measurement) 2. วิธีการเร่งความเร็ว (acceleration) 3. วิธีการวัดค่าอินพุต (input measurement) และ 4. วิธีวัดค่าโดยตรง (direct measurement) เนื่องจากว่าวิธีการหาค่าแรงบิดวิธีที่ 1 และ 4 นั้นต้องใช้เวลาในการทำการทดสอบมากเนื่องจากในการวัดข้อมูลแต่ละครั้งต้องให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าคงที่ ส่วนวิธีที่ 3 ต้องอาศัยการประมาณค่าความสูญเสียที่สเตเตอร์ เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าดังกล่าวได้โดยตรง [1] ส่วนในบทความฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการในการหาค่าคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการเร่งความเร็ว (acceleration method) ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลแรงบิดของมอเตอร์นั้นหมดไป ซึ่งเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์

วิธีการดังกล่าวนี้ได้มีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมซึ่งในโรงงานดังกล่าวต้องใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ [3][6] แต่ในกรณีที่มอเตอร์ที่นำมาใช้งานมีขนาดต่ำกว่า 10 แรงม้า ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์มีค่าต่ำ ดังนั้นช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์จึงสั้นซึ่งจะทำให้กราฟแรง

บิดได้รับผลกระทบจากสภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) ทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลมาใช้คำนวณหาค่าแรงบิดได้ดังนั้นเพื่อกำจัดผลดังกล่าวไปจำเป็นต้องยืดช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ให้นานขึ้นโดยใช้เทคนิคการคัปปลิง (coupling) วัตถุทรงกระบอกเข้ากับเพลาของมอเตอร์เพื่อเป็นการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์

ข้อดีของการทดสอบด้วยวิธีนี้คือ ระยะเวลาในการทดสอบแต่ละครั้งน้อยเนื่องจากการทดสอบแต่ละครั้งอาศัยช่วงเวลาในการสาร์ทที่สามารเก็บมูลของมอเตอร์ได้ตลอดย่านความเร็วตั้งแต่หยุดนิ่งจนกระทั่งความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส นอกจากนี้ยังทำให้ค่าใช้จ่ายในการทำการทดสอบมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ

2. การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1 หลักการในการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและการคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอาศัยการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็วของมอเตอร์ (acceleration method) ซึ่งวิธีดังกล่าวกระทำโดยการสาร์ทมอเตอร์ที่สภาวะไร้อภาระ (no-load) ด้วยวิธีสาร์ทตรง (direct start) แล้วทำการบันทึกข้อมูลความเร็วรอบ, แรงดัน, กระแสและเวลาในการเร่งความเร็วในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากหยุดนิ่งจนความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัสจากนั้นนำข้อมูลความเร็วรอบที่บันทึกได้

คำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณหาแรงบิดนั้นเป็นไปตามสมการที่ 1

$$T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} - T_l \quad (1)$$

T_m = แรงบิดเร่งของมอเตอร์ (N·m)

T_l = แรงบิดภาระของมอเตอร์ (N·m)

J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ (kg·m²)

ω_r = ความเร็วของโรเตอร์ (rad/s)

เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วเป็นการทดสอบที่สภาวะไร้ภาระ (noload) ดังนั้นจากสมการที่ 1 เทอมของแรงบิดภาระ T_l จึงถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นสมการที่ 1 เหลือเพียง

$$T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2)$$

2.2 เทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เนื่องจากการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยวิธีนี้ ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์จำเป็นต้องมีช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) จากมอเตอร์และเครื่องมือวัดซึ่งจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลแรงบิดของมอเตอร์นั้นหมดไป [1] ดังนั้นจำเป็นต้องทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์นั้นแสดงดังสมการที่ 3 [2]

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{1}{T_m - T_l} d\omega \quad (3)$$

t = เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์จาก ω_1 ไปสู่ ω_2

J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (kg·m²)

T_m = แรงบิดของมอเตอร์ (N·m)

T_l = แรงบิดของภาระ (N·m)

เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วนี้จะทำการทดสอบที่สภาวะไร้ภาระ (noload) ดังนั้นค่าแรงบิดของภาระของมอเตอร์ในสมการที่ 3 จึง

กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 และจากสมการที่ 3 เมื่อทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (J) ให้แก่มอเตอร์จะทำให้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์มีค่ามากขึ้น ดังนั้นในการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำกระทำได้โดยการคัปปลิง (coupling) วัตถุทรงกระบอกเข้ากับเพลาของมอเตอร์ ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ภายหลังจากเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์แล้วนั้นแสดงดังสมการที่ 4

$$T_m = (J + J_1) \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

J_1 = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เพิ่มให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (kg·m²)

2.3 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้สำหรับการทดสอบ

จากหัวข้อ 2.2 ได้กำหนดรูปร่างของวัตถุที่ใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์โดยให้เป็นรูปทรงกระบอกซึ่งแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปทรงของวัตถุที่ใช้สำหรับเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์สมการที่ใช้คำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรูปทรงดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 5 [6]

$$J_1 = \frac{1}{2} m r^2 \quad (5)$$

m = มวลของวัตถุทรงกระบอก (kg.)

r = รัศมีของทรงกระบอก (m.)

l = ความหนาของทรงกระบอก (m.)

2.4 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ผู้ทำการทดสอบจำเป็นต้องทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์เสียก่อน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์นั้นสามารถคำนวณได้จากแบบของมอเตอร์ แต่ในกรณีที่ไม่มีแบบก็สามารถหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ได้จากการทดสอบโดยการสครัทมอเตอร์ 2 ครั้งโดยในแต่ละครั้งต้องทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ไม่เท่ากันให้แก่มอเตอร์ จากนั้นก็ทำการบันทึกข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์ทำการเร่งความเร็วแล้วนำข้อมูลความเร็วที่บันทึกได้มาคำนวณตามสมการที่ 6

$$J = \frac{J_2 p \omega_2 - J_1 p \omega_1}{p \omega_1 - p \omega_2} \quad (6)$$

J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

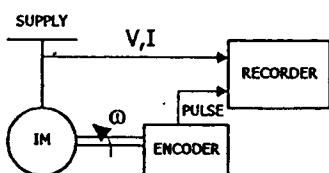
J_1, J_2 = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เพิ่มเข้าไปในการสครัทครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

p = d/dt

3. การทดลองและผลการทดลอง

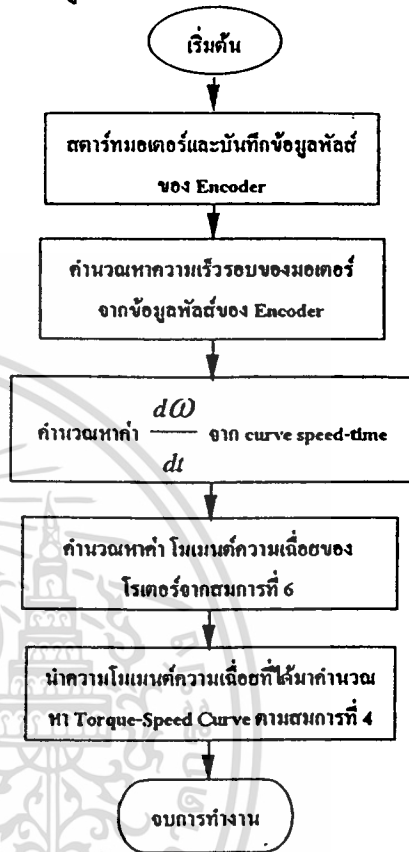
3.1 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ขนาด 1 แรงม้า และ 3 แรงม้า 4 ขั้ว พิกัดแรงดัน 380 โวลต์ ทำการต่อวงจรแบบสครัท เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเร็วของมอเตอร์เป็น incremental encoder ความละเอียด 1000 พัลส์/รอบ และใช้ Analyzing Recorder ของ YOKOGAWA รุ่น AR 1100A ทำการบันทึกข้อมูลความเร็วแรงดัน, กระแส ของมอเตอร์ และ ข้อมูลพัลส์ของ encoder



รูปที่ 2 บล็อกโคะแกรมแสดงการต่อวงจรทดสอบ

ในส่วนของขั้นตอนการทดลองได้แสดงใน flowchart รูปที่ 3



รูปที่ 3 flowchart แสดงขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

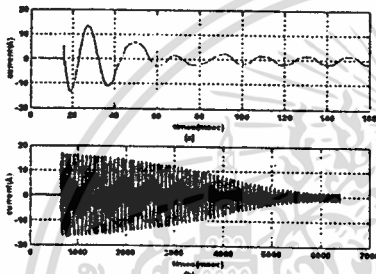
3.2 ผลการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ 2 ค่าคือขนาด 0.0810 และ 0.4841 kg-m² และจากการทดลองได้ทำการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์โดยอาศัยสมการที่ 6 ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

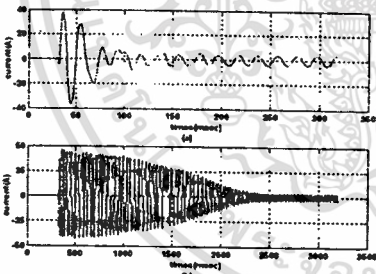
ขนาดมอเตอร์ (Hp)	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ (kg-m ²)
1	0.0047
3	0.0125

ตารางที่ 1 แสดงค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 และ 3 แรงม้า

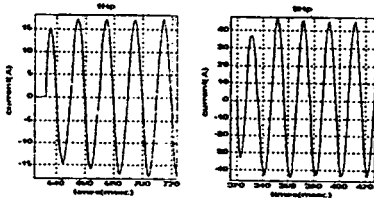
จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 และ 3 แรงม้าซึ่งได้ข้อมูลกระแสขณะสตาร์ทในกรณีที่ไม่มีภาระเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและเมื่อมีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 0.4841 kg-m²แสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ส่วนรูปที่ 6 เป็นภาพขยายของของกระแสในรูปที่ 4b และ 5b ในช่วง 5 cycle แรก ซึ่งเมื่อนำรูปที่ 6 มาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4a และ 5a พบว่าเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่โรเตอร์มีค่ามากขึ้นจะทำให้ความถี่ของกระแสเนื่องจากทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าผันแปรตามไป



รูปที่ 4 กราฟกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า (a) เมื่อไม่มีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (b)เมื่อมีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยแล้ว

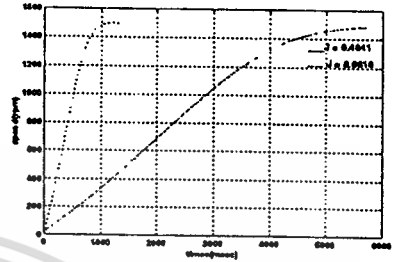


รูปที่ 5 กราฟกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า (a) เมื่อไม่มีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (b)เมื่อมีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยแล้ว

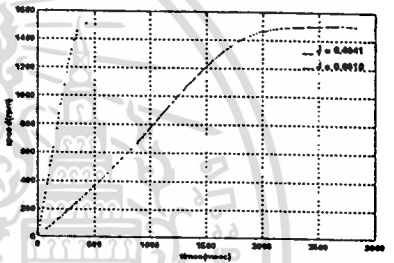


รูปที่ 6 ภาพขยายของรูป 4b และ 5b ใน 5cycle แรก จากการทดสอบที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกัน ได้กราฟความเร็วรอบซึ่งแสดงให้เห็นถึง

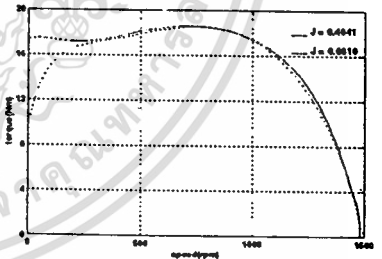
เวลาในการเร่งความเร็วที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 และเมื่อนำข้อมูลความเร็วรอบมาคำนวณหาแรงบิดจะได้กราฟแรงบิด-ความเร็วรอบดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10



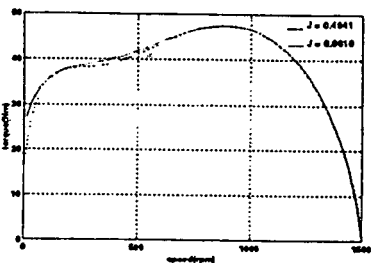
รูปที่ 7 กราฟความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่างกัน



รูปที่ 8 กราฟความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่างกัน



รูปที่ 9 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า



รูปที่ 10 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของข้อมูลกระแสและแรงบิดขณะลัดโรเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 1 และ 3 แรงม้า ที่พิกัดแรงดันแสดงดังตารางที่ 2

ขนาดมอเตอร์ (Hp)	กระแส (A)	แรงบิด (Nm)
1	11.85	17.04
3	30.82	32.67

ตารางที่ 2 แสดงค่ากระแส rms และแรงบิดของ

มอเตอร์ในสภาวะลัดโรเตอร์

เมื่อนำมาข้อมูลในตารางที่ 2 เปรียบเทียบกับค่า rms ของกระแสสครัทมอเตอร์ ณ เวลาที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 จะได้ว่ากระแสสครัทมอเตอร์ ณ เวลาที่ความเร็วเท่ากับ 0 จะมีค่าไม่เกินกระแสขณะลัดโรเตอร์

4. บทสรุป

การทดสอบหาค่าลักษณะของแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งนำเสนอในบทความฉบับนี้ได้ใช้วิธีการเร่งความเร็ว (acceleration method) โดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์เพื่อเพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ซึ่งภายหลังทำการทดสอบได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วที่นานขึ้นทำให้ผลของทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าที่ทำให้กระแสสครัทของมอเตอร์บิดเบี้ยวหมดไปดังแสดงในรูปที่ 6 ในส่วนของรูปที่ 7 และ 8 แสดงถึงผลของการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่มีต่อเวลาในการเร่งความเร็วซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3 จึงสรุปได้ว่าเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์แปรผันกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เพลของมอเตอร์ ในส่วนของผลการทดลองในรูปที่ 9 และ 10 ณ จุดที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 เมื่อพิจารณาร่วมกับข้อมูลแรงบิดในตารางที่ 2 พบว่าเกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการคัปปลิง (coupling) ทางกลและเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงบิดที่ได้จากการทดสอบด้วยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกันพบว่ากราฟแรงบิดทับกันไม่สนิทเนื่องมา

จากปัจจัยต่างๆเช่น อัตราการสุ่มข้อมูล (sampling rate) ที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัดและการประมาณค่า จากการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการทดลองนั้นน้อยมากเนื่องจากการบันทึกข้อมูลแต่ละครั้งจะได้ข้อมูลตลอดตั้งแต่สภาวะหยุดนิ่งจนกระทั่งความเร็วเข้าใกล้ความเร็วเชิงโรตัสซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสะดวกจากการทดสอบด้วยวิธีที่นำเสนอนี้

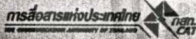
5. เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Standard 112-1996 IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generator.
- [2] W. Leonhard, "Control of electrical drives," 2nd Ed., Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1996.
- [3] J.H. Dymond., Raymond Ong and Peter McKenna "Locked Rotor and Acceleration Testing of Large Induction Machines-Method, Problems and Interpretation of the Results," IEEE Trans on Industry Application Vol.3 No.4 pp. 958-964 July/December, 2000.
- [4] J.H. Dymond, "Stall Time, Acceleration Time, Frequency of Starting : The Myths and the Facts," IEEE Trans on Industry Applications Vol. 29, No.1 pp.42-51 January/February 1993.
- [5] R.D. Findlay, B. Szabados, J.H. Dableh, G.M. Obermeyer, and R.E. Drape, "Measurement of the Torque-Speed Characteristic of Induction Motors Using an Improved New Digital Approach," IEEE Trans. on Energy Conversion. Vol.5, No. 3 pp.565-571, Sept, 1990.
- [6] J.L. Meriam, L.G. Kraige "Engineering mechanics," Volume 2 Dynamics 2nd edition pp.630, John Wiley & Sons 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



Volume 1

สาขาบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

22-23 พฤศจิกายน 2544

โทร : 0-2739-2359 โทรสาร : 0-2326-9065

<http://www.ladkrabang.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PW31	การทำออปติไมซ์เพาเวอร์ฟลว์ของระบบเอซี-ดีซีโดยใช้วิธีซีควเอนเชียลควอดราติกโปรแกรมมิ่ง Optimal Power Flow of AC-DC Systems Using Sequential Quadratic Programming Method พรเทพ ปัญญาแก้ว ศิริวิวัฒน์ โพรธิเวชกุล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	125 175
PW32	การคาดคะเนสัดส่วนของความสูญเสียเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย เขต 2 โดยวิธีเชิงเส้นกำลังสองน้อยที่สุด The Prediction of System Loss Contribution Caused by Generators in the System of EGAT Region 2 by Linear Least Square Method สุพรรณนิภา ยังก้อย จิตติพัฒน์ ตรียางกูรศรี สัมฤทธิ์ หังสะสุตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น	181
PW33	การจำลองและวิเคราะห์เสถียรภาพแบบชั่วคราวของระบบกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ Simulation and Analysis of Multimachine Electric Power System Transient Stability อศวิน นันทชัย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	187
PW34	Ferroresonance Overvoltages and its Mitigation In PEA Distribution Network Cunyi Yu Nit Petcharaks Preecha Sakarung Pradit Fuangfoo Arwut Takkabutra Dhurakijpundit University PEA Surge Protection Division Precise Co. Ltd.	193
PW-G		
PW35	การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์ Torque-Speed Characteristics Evaluation of 3 Phase Induction Motor Using an Acceleration Method วรชาติ แซ่ก๊ก พิชิต ล้ายอง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	199
PW36	การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส A Study of Effects of Harmonics on Performance of Three - Phase Induction Motor เฉลิมชัย กงมันประภากิจ พิชิต ล้ายอง ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	205
PW37	การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสภายใต้เงื่อนไขการเกิดฟอลต์หนึ่งเฟส Starting A Three Phase Induction Motor Under Single Phase Fault Condition พุทธพร เสวตสกุลานนท์ เปรมศักดิ์ ปรีชา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	211

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์ Torque-Speed Characteristics Evaluation of 3 Phase Induction Motor Using an Acceleration Method

วรชาติ แซ่ก๊ก และ พิชิต ล้ำของ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร/โทรสาร (02)326-7985 Email: waracharts@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยอาศัยวิธีการเร่งความเร็ว ซึ่งได้ระบุไว้ใน IEEE standard 112-1996 [1] โดยค่าแรงบิดของมอเตอร์สามารถคำนวณได้จากข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ในขณะที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากหยุดนิ่งจนกระทั่งความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส บทความฉบับนี้ได้นำเสนอเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วเพื่อลดผลกระทบจากทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าที่จะมีผลต่อข้อมูลความเร็วโดยการคับปลิงล้อช่วยแรงเข้ากับเพลาของมอเตอร์เพื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ ในการทดสอบได้ทำการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำต่างขนาดกัน ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการให้คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบได้อย่างเหมาะสม

Abstract

This paper presents a method to evaluate torque-speed characteristic of 3 phase induction motor using an acceleration method. This method is specified in IEEE standard 112-1996 [1]. The value of torque is calculated from the speed of the induction motor from a standstill to a speed near a synchronous speed. For this method, a long acceleration time is required to avoid effect of an electrical transient. As a result, a technique to increase the accelerating time by coupling a flywheel to the shaft of the motor is proposed. Using such a method, the moment of inertia of the motor can be increased. Tests are performed on various sizes of the induction motor, and it is found that the acceleration method is able to predict the torque-speed curve of the motor reasonable.

Keywords: torque-speed characteristic, induction motor

1. บทนำ

ในการทดสอบเพื่อทำการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นมียุทธวิธีดังเช่น ใน IEEE standard 112-1996 [1] ได้ระบุวิธีการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำไว้ 4 วิธี ได้แก่ 1. วิธีการวัดค่าเอาต์พุต (output measurement) 2. วิธีเร่งความเร็ว (acceleration) 3. วิธีการวัดค่าอินพุต (input measurement) และ 4. วิธีวัดค่าโดยตรง (direct measurement) เนื่องจากว่าวิธีการหาค่าแรงบิดวิธีที่ 1 และ 4 นั้นต้องใช้เวลาในการทำการทดสอบมากเนื่องจากในการวัดข้อมูลแต่ละครั้งต้องทำการวัดในขณะที่ความเร็วรอบของมอเตอร์คงที่ ส่วนวิธีที่ 3 ต้องอาศัยการประมาณค่าความสูญเสียที่สเตเตอร์เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าดังกล่าวได้โดยตรง ดังนั้นในบทความฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าซึ่งจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลแรงบิดของมอเตอร์นั้นหมดไป ซึ่งเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์ กรณีที่ทำการทดสอบกับมอเตอร์ขนาดเล็กนั้น ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์มีค่าต่ำ จึงทำให้ช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์สั้น ซึ่งจะทำให้ข้อมูลความเร็วได้รับผลกระทบจากสภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) ทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลความเร็วในขณะที่มอเตอร์เร่งความเร็วมาใช้คำนวณหาค่าแรงบิดได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบดังกล่าวไปจำเป็นต้องยืดช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ให้นานขึ้นโดยใช้เทคนิคการคับปลิง (coupling) ล้อช่วยแรงเข้ากับเพลาของมอเตอร์เพื่อเป็นการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบโดยการสครัททอมอเตอร์ด้วยวิธีสครัททอมจากสภาวะที่โรเตอร์หยุดนิ่งและในสภาวะที่โรเตอร์หมุนกลับทิศก่อนการสครัททอมอเตอร์ [7-8] เพื่อศึกษาความแตกต่างที่เกิดขึ้น

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 หลักการในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและ

การคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์ (acceleration method) [1] กระทำโดยการสตาร์ทมอเตอร์ในสภาวะไร้ภาระ (no-load) ด้วยวิธีสตาร์ทตรง (direct start) จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลแรงดัน, กระแส, ความเร็วรอบ, และเวลา ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากหยุดนิ่งจนกระทั่งความเร็วเข้าใกล้ความเร็วเชิง โครนัส จากนั้นนำข้อมูลความเร็วรอบที่บันทึกได้มาคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์

โดยปกติแล้วสมการแรงบิดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการเดินเครื่องมอเตอร์ในสภาวะพลวัต (dynamic) นั้นจะแสดงดังสมการที่ 1 [4]

$$T_m = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r + F\omega_r^2 + T_c + T_L \quad (1)$$

- T_m = แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)
- T_L = แรงบิดภาระ (N-m)
- T_c = แรงบิดเนื่องจาก coulomb friction (N-m)
- $D\omega_r$ = แรงบิดเนื่องจากความหนืด (viscous torque) (N-m)
- $F\omega_r^2$ = แรงบิดเนื่องจากแรงต้านของลม (windage torque) (N-m)
- J_m = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ (kg-m²)
- ω_r = ความเร็วเชิงมุมของ โรเตอร์ (rad/s)

เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นการทดสอบในสภาวะไร้ภาระ (no-load) ดังนั้นค่าแรงบิดภาระ (T_L) ในสมการที่ 1 จึงกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 และค่าแรงบิด $T_c + F\omega_r^2$ มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ $D\omega_r$ ดังนั้นสมการแรงบิดจึงเหลือเพียง

$$T_m = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad (2)$$

2.2 เทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์จำเป็นต้องมีช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) จากมอเตอร์และเครื่องมือวัดซึ่งจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลแรงบิดของมอเตอร์นั้นหมดไป [1] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์นั้นแสดงดังสมการที่ 3

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{1}{T_m - D\omega_r} d\omega \quad (3)$$

- t = เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ จาก ω_1 ไปสู่ ω_2
- J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (kg-m²)

จากสมการที่ 3 เมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (J) เพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์มีค่ามากขึ้น ซึ่งในการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นกระทำได้โดยอาศัยเทคนิคการคัปปลิง (coupling) ล้อช่วยแรง (flywheel) เข้ากับเพลลาของมอเตอร์ ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ภายหลังจากเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์แล้วนั้นแสดงดังสมการที่ 4

$$T_m = (J_m + J_1) \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad (4)$$

- J_1 = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงที่เพิ่มให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (kg-m²)

2.3 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้สำหรับทดสอบ

จากหัวข้อ 2.2 ได้กำหนดครุรูปของวัตถุที่ใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์โดยให้เป็นรูปแผ่นจานซึ่งแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปทรงของล้อช่วยแรงที่ใช้สำหรับเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์

สมการที่ใช้คำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของรูปทรงดังรูปที่ 1 แสดงดังสมการที่ 5 [3]

$$J_1 = \frac{\pi}{2} \rho (r_2^4 - r_1^4) \quad (5)$$

- ρ = ความหนาแน่นของเนื้อสารที่ใช้ทำล้อช่วยแรง (kg/m³)

r_1, r_2 = รัศมีภายในและภายนอกของทรงกระบอก (m.)

I = ความหนาของทรงกระบอก (m.)

2.4 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด (viscous friction coefficient) สามารถหาได้จากการคำนวณข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์กำลังลดความเร็วลงภายใต้การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) ซึ่งได้ระบุไว้ใน IEC Standard 34-2 [2] ซึ่งกระทำโดยการเดินเครื่องมอเตอร์ภายใต้สภาวะคงตัวโดยไร้ภาระที่พิกัดแรงดัน จากนั้นให้ทำการปลดแหล่งจ่ายออกแล้วทำการบันทึกข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์ลดลง ซึ่งหลังจากปลดแหล่งจ่ายออกแล้วค่าแรงบิดของมอเตอร์ (T_m) ตามสมการที่ 4 จะมีค่าเท่ากับ 0 จากนั้นทำการคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงความเร็วรอบมอเตอร์ระหว่าง 95%-105% ของความเร็วพิกัดโดยอาศัยสมการที่ 6 [5]

$$J_m \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r = 0 \quad (6)$$

$$(J_m + J_1) \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r = 0 \quad (7)$$

D = ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด

ω_r = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/s)

3. กระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 polynomial regression

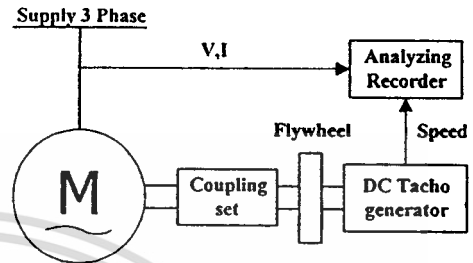
เนื่องจากข้อมูลความเร็วที่บันทึกได้นั้นมีการแกว่งมากเนื่องจากปัจจัยต่างๆเช่น การคัปปลิ่ง, สัญญาณรบกวนที่เกิดจาก DC tacho generator เป็นต้น ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลที่บันทึกได้มาทำการคำนวณหาแรงบิดได้ทันที ดังนั้นจึงต้องมีการทำให้ข้อมูลดังกล่าวเรียบก่อนโดยอาศัยวิธีการ polynomial regression เพื่อจัดข้อมูลให้อยู่ในรูปของ polynomial ดังสมการที่ 8 [6]

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (8)$$

4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 วิธีการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทรงกระบอก ขนาด 1, 3, และ 5 แรงม้า 4 ขั้ว พิกัดแรงดัน 380 โวลต์ ทำการต่อวงจรแบบสตาร์ ในการวัดความเร็วของมอเตอร์นั้นใช้ DC tacho generator แปลงความเร็วให้อยู่ในรูปของแรงดัน ในการบันทึกข้อมูลใช้ Analyzing Recorder ของ YOKOGAWA รุ่น AR 1100A ทำการบันทึกข้อมูลแรงดัน, กระแส, และความเร็ว ของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรทดสอบ

ขนาดของมวล, เส้นผ่านศูนย์กลาง, และขนาดของโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงที่ใช้สำหรับการทดสอบ ตามรูปที่ 2 นั้นแสดงอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย, เส้นผ่านศูนย์กลาง, และ มวลของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ .

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (kg·m ²)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	มวล (kg)
0.1	0.2687	10.7
0.5	0.4018	24.7
1.0	0.4778	35.1
1.5	0.5288	43.5

4.1.1 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration test)

ในการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration test) กระทำการทดสอบโดยการสตาร์ทมอเตอร์ด้วยวิธีสตาร์ทตรง จากสภาวะที่โรเตอร์หยุดนิ่งและในสภาวะที่โรเตอร์หมุนกลับทิศ โดยป้อนแรงดันไลน์พิกัด 380 โวลต์ ในการทดสอบแต่ละครั้งได้ทำการเปลี่ยนขนาดของล้อช่วยแรงให้มีค่าต่างๆเพื่อทดสอบหาความแตกต่างของกราฟแรงบิด-ความเร็วรอบเมื่อมีการเปลี่ยนค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ ในการบันทึกข้อมูลนั้นทำการบันทึกข้อมูลแรงดัน, กระแส, และความเร็วทันที

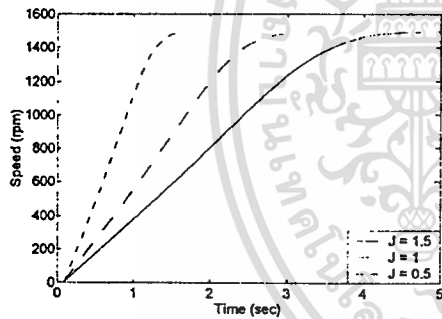
ที่ป้อนแรงดันให้แก่มอเตอร์จนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์เข้าใกล้ความเร็วเชิงโรตัสที่สภาวะคงตัว

4.1.2 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation test)

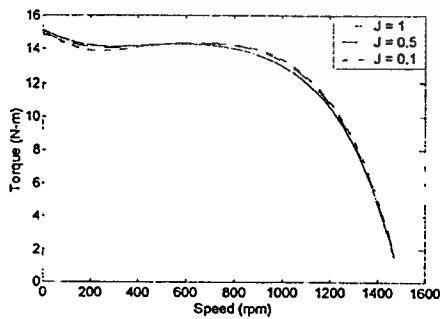
ในส่วนของการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation test) ทำการทดสอบโดยการเดินเครื่องมอเตอร์ในสภาวะไร้อภาระจนกระทั่งความเร็วคงที่ จากนั้นทำการปลดแหล่งจ่ายออกจากสเตเตอร์แล้วทำการบันทึกความเร็วของมอเตอร์ในช่วงที่มีการหน่วงความเร็ว ในการทดสอบแต่ละครั้งต้องทำการเปลี่ยนขนาดของล้อช่วยแรงที่ค้ำอยู่กับมอเตอร์ ในการบันทึกข้อมูลนั้นต้องทำการบันทึกข้อมูลความเร็วและข้อมูลกระแสของมอเตอร์ทันทีที่ปลดแหล่งจ่ายจากขั้วมอเตอร์

4.2 ผลการทดลอง

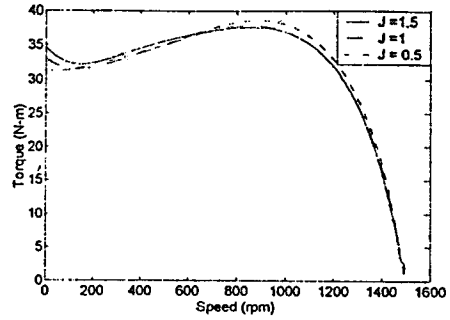
ในรูปที่ 3 นำเสนอผลของการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ รูปที่ 4, 5, และ 6 แสดงกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาด 1, 3, และ 5 แรงม้า ตามลำดับซึ่งได้จากการคำนวณข้อมูลความเร็วในขณะที่มอเตอร์เร่งความเร็ว โดยในการทดสอบได้ทำการเปลี่ยนขนาดของล้อช่วยแรงขนาดต่างๆเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างที่เกิดขึ้น



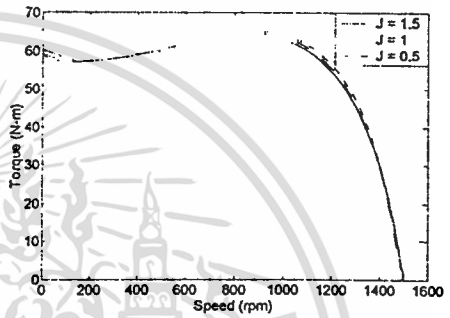
รูปที่ 3 กราฟความเร็วรอบ-เวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่างๆ



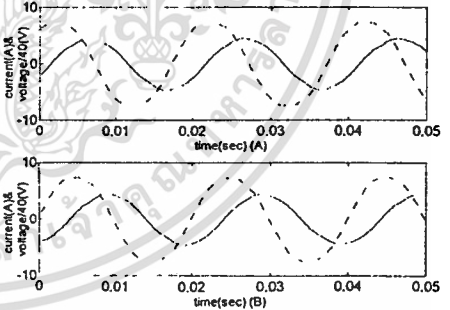
รูปที่ 4 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทดสอบกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ต่างกัน



รูปที่ 5 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทดสอบกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ต่างกัน



รูปที่ 6 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ต่างกัน



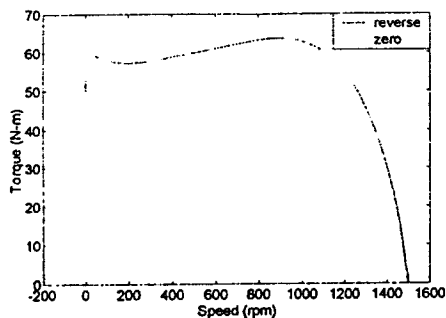
รูปที่ 7 กราฟแรงดัน (เส้นประ) และกระแสในกรณีที่ไม่ทำการค้ำปลีกับล้อช่วยแรง (A) เมื่อทำการค้ำปลีกับล้อช่วยแรงขนาด 1.5 kg-m² (B)

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์แล้วยังให้ผลของกระแสและมุมเฟสขณะสภาวะคงตัวใกล้เคียงกันมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ไม่เป็นการเพิ่มภาระให้แก่มอเตอร์

ส่วนรูปที่ 8 เป็นกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าเมื่อทำการสตาร์ทด้วยวิธีสตาร์ทตรงในขณะที่โร

เตอร์หยุดนิ่งและในขณะที่โรเตอร์หมุนกลับทิศซึ่งให้ผลที่แตกต่างกันชัดเจนในส่วนองแรงบิดขณะสตาร์ท

กับเพลลาของมอเตอร์เพื่อวัดค่าแรงบิด ในส่วนตารางที่ 3 เป็นค่าของพิทักแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาดต่างๆ ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณจากป้ายชื่อ (nameplate) ของมอเตอร์



รูปที่ 8 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ในการสตาร์ทจากสภาวะที่โรเตอร์หยุดนิ่งและหมุนกลับทิศ

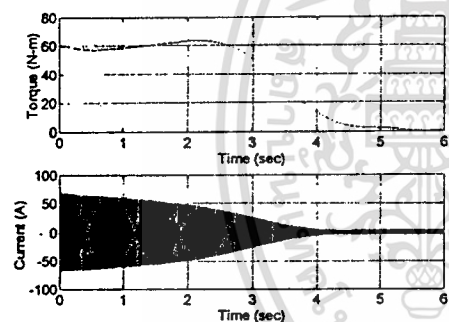
ตารางที่ 3 พิกัดความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์

ขนาดมอเตอร์ (Hp)	พิทักความเร็ว (rpm)	พิทักแรงบิด (N-m)
1	1400	5.0884
3	1420	15.0502
5	1420	25.0837

ในรูปที่ 9 เป็นการนำเสนอกราฟของแรงบิด-เวลาและกราฟของกระแส-เวลาของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 1.5 kg-m² ซึ่งแสดงให้เห็นค่าแรงบิด ณ กระแสขนาดต่างๆ

5. สรุป

การทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนียวานซึ่งนำเสนอในบทความฉบับนี้ ได้ใช้วิธีการเร่งความเร็ว (acceleration method) โดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์เพื่อเพิ่มช่วงระยะเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ซึ่งภายหลังทำการทดสอบได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์แล้วทำให้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์เหนียวานเพิ่มขึ้นจริงตามสมการที่ 3 และเมื่อนำข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ที่บันทึกได้ มาคำนวณหาค่าแรงบิดตามสมการที่ 4 แล้วทำการพล็อตกราฟที่คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4, 5, และ 6 ซึ่งผลที่ได้พบว่าการที่คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้เมื่อทำการเปลี่ยนค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เพิ่มให้แก่โรเตอร์นั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ในการคำนวณนั้น ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดนั้นได้จากการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) เมื่อพิจารณารูปที่ 7 ซึ่งเป็นกราฟของแรงดันและกระแสที่สภาวะคงตัวในกรณีที่ไม่มีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและกรณีที่มีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 1.5 kg-m² ให้แก่โรเตอร์ จากการพิจารณากราฟทั้ง 2 พบว่า กระแสและมุมเฟสที่ได้จากทั้ง 2 กรณีนั้นมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมากแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อกำลังของมอเตอร์



รูปที่ 9 กราฟแรงบิด-เวลา และกระแส-เวลา ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 1.5 kg-m²

ตารางที่ 2 ค่ากระแสและแรงบิดของมอเตอร์ขณะล๊อค โรเตอร์

ขนาดมอเตอร์ (Hp)	กระแส (A)	แรงบิด (N-m)
1	9.73	15.21
3	28.11	33.27
5	49.67	61.72

ในการทดสอบได้ทำการทดสอบสตาร์ทมอเตอร์จากสภาวะเริ่มต้นสองสภาวะ คือสภาวะที่โรเตอร์หยุดนิ่งและสภาวะที่โรเตอร์หมุนกลับทิศซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าค่าแรงบิดที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 นั้นแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเนื่องมาจากผลของแรงเสียดทานของดลับลูกปืนของมอเตอร์ และดลับลูกปืนของชุดเพลลาที่คัปปลิ้งกับมอเตอร์ ในขณะที่หยุดนิ่งและขณะเคลื่อนที่มีค่าไม่เท่ากันนั่นเอง ในส่วนของรูปที่ 9 เป็นการแสดงให้เห็นถึงข้อดีของการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งทำให้สามารถพล็อตกราฟของแรงบิด-เวลาเพื่อนำมา

ในส่วนองตารางที่ 2 เป็นค่าของกระแสและแรงบิดของมอเตอร์ที่สภาวะล๊อค โรเตอร์ของมอเตอร์ขนาดต่างๆที่ใช้ทดสอบโดยทำการล๊อคโรเตอร์ของมอเตอร์ที่แรงดันพิทักและทำการค่อแชนของแรงเข้า

เปรียบเทียบกับกราฟของกระแส-เวลา เพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งของค่าแรงบิด ณ ค่ากระแสค่าต่างๆ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ในส่วนของตารางที่ 2 และ 3 เป็นตารางที่ใช้สำหรับตรวจสอบความน่าเชื่อถือได้ของการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็ว ซึ่งเมื่อนำค่าจากตารางที่ 2 และ 3 มาทำการเปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้พบว่ามีค่าที่ได้จากกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากตารางมากและเมื่อพิจารณาร่วมกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งใช้เพียงเวลาในการเร่งความเร็วซึ่งน้อยมากแสดงให้เห็นว่าการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการเร่งความเร็วโดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์นั้นเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็วและเหมาะสมในการที่จะนำมาใช้ในการทดสอบวิธีหนึ่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Standard 112-1996, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.
- [2] IEC Standard 34-2 1982 Part 2: Method for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicle).
- [3] W. Leonhard "Control of Electrical Drives" 2nd Edition, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1996
- [4] Gopal K. Dubey "Fundamentals of Electrical drives" Narosa Publishing House, New Delhi, Madras, Bombay, Calcutta, 1995
- [5] Peter Vas "Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machine" Clarendon Press Oxford, 1993
- [6] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale "Numerical Methods for Engineers with Programming and Software Application" 3rd Edition, McGraw-Hill, 1998
- [7] J.H. Dymond, Raymond Ong, and Peter McKenna "Locked Rotor and Acceleration Testing of Large Induction Machines- Method, Problems, and Interpretation of the Results" *IEEE Trans on Industry Application*, Vol.3, No.4, pp. 958-964, July/December 2000
- [8] R.D. Findlay, B. Szabados, J.H. Dableh, G.M. Obermeyer, and R.E. Drape "Measurement of the Torque-Speed Characteristic of Induction Motors Using an Improved New Digital Approach" *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 5, No. 3, pp. 565-571, Sept. 1990.
- [9] วรชาติ แซ่ก๊ก, พิชิต ถ้ายอง "เทคนิคในการหาคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย" วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 เดือน มีนาคม 2544 หน้า 122-127

ประวัติผู้เขียนบทความ



นาย วรชาติ แซ่ก๊ก จบการศึกษา วศ.บ. ไฟฟ้าจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อ พ.ศ. 2542 ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยทำงานวิจัยในด้านการแปลงรูปพลังงาน, มอเตอร์เหนี่ยวนำ, คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



นาย พิชิต ถ้ายอง จบการศึกษา วศ.บ. ไฟฟ้า และ วศ.ม. ไฟฟ้าจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และหัวหน้าศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยในด้านการแปลงรูปพลังงาน, เครื่องจักรกลไฟฟ้า, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ประวัติผู้เขียน

นาย วรชาติ แซ่ก๊ก เกิดเมื่อวันที่ 14 มกราคม 2522 ที่จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2541 มีผลงานวิจัยทางวิชาการทางด้านการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ และได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ผลงานวิจัยทางวิชาการขณะกำลังศึกษามีดังนี้

1. “เทคนิคในการหาคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2544 หน้า 122-127
2. “การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยวิธีการเร่งความเร็ว” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, 2544

