การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์

TORQUE-SPEED CHARACTERISTICS EVALUATION OF 1 PHASE INDUCTION MOTOR USING AN ACCELERATION METHOD

เจตนิพัทธ์ เชิญสุข

JETNIPAT CHAROENSOOK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2436-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์

TORQUE-SPEED CHARACTERISTICS EVALUATION OF 1 PHASE INDUCTION MOTOR USING AN ACCELERATION METHOD

T061655

เจตนิพัทธ์ เจริญสุข

JETNIPAT CHAREONSOOK

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 61655
วัน,เดือน,ปี 19 ก.ค. 2549

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2436-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TORQUE-SPEED CHARACTERISTICS EVALUATION OF 1 PHASE INDUCTION MOTOR USING AN ACCELERATION METHOD

JETNIPAT CHAREONSOOK

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
2006

ISBN 974-15-2436-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์

TORQUE-SPEED CHARACTERISTICS EVALUATION OF 1 PHASE INDUCTION MOTOR USING AN ACCELERATION METHOD

นักศึกษา นายเจตนิพัทธ์ เจริญสุข

รหัสประจำตัว 47060204

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.พิชิต ลำยอง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
รศ.นิทัศน์	กฤษณจินดา	
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	
รศ.ดร.อานันทวัฒน์	คุณากร	
รศ.พิชิต	ลำยอง	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 19 พฤษภาคม 2549 เวลา 11.30-13.30 น.

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

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๕.....**เดือน**...กรกฎาคม.....**พ.ศ**.....๒๕๔๗..

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	**การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์**
นักศึกษา	นายเจตนิพัทธ์ เจริญสุข
รหัสนักศึกษา	47060204
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.พิชิต ล้ายอง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส ตลอดย่านความเร็วตั้งแต่มอเตอร์หยุดนิ่งจนกระทั่งความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส โดยอาศัยวิธีการเร่งความเร็ว ซึ่งระบุไว้ใน IEEE standard 114-2001 [1] โดยเทคนิคการเพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วด้วยวิธีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่มอเตอร์โดยคัปปลิ้งล้อช่วยแรงเข้ากับเพลาของมอเตอร์โดยตรง ซึ่งได้ทำการทดสอบกับสปลิตเฟสมอเตอร์และคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ โดยผลการทดสอบจะแสดงผลของแรงบิดและกระแสไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่างๆ ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างสปลิตเฟสมอเตอร์และคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ โดยผลที่ได้สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ ที่เหมาะสมในการเลือกใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Torque-Speed Characteristics Evaluation of 1 Phase Induction Motor Using an Acceleration Method
Student	Mr. Jetnipat Chareonsook
Student ID.	47060204
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Pichit Lumyong

ABSTRACT

This thesis presents a method to evaluate torque-speed characteristics of single phase induction motors from a standstill to a speed near a synchronous speed using an acceleration method. This method is specified in IEEE standard 114-2001 [1]. A technique to increase a starting time using a flywheel direct coupled to the shaft of single phase induction motors is proposed. The split phase motors and the capacitor start motors are tested. The test results are shown in the form of torque and current at various speeds. Results of tested from the split phase motors and the capacitor start motors are compared. Finally, the appropriate selection of torque-speed characteristics for the operation is illustrated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ. พิชิต ลำยอง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ และคอยอำนวยความสะดวกแก่ข้าพเจ้าและงานวิจัยนี้ตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้อง Lab Machines ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ รวมถึงร่วมกันทดสอบให้ได้ข้อมูลต่างๆมากมาย แล้วคอยให้กำลังใจและร่วมสังสรรค์เสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ โดยเฉพาะค่าใช้จ่ายต่างๆมากมายจนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เจตนิพัทธ์ เจริญสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....VIII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....1

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....2

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....2

1.6 ขอบเขตการวิจัย.....3

1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....5

2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....5

2.1.1 หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....5

2.1.2 สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....7

2.1.3 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทางในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....7

2.2 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....10

2.2.1 มอเตอร์แบบแยกเฟส (Split Phase Motor) 10

2.2.2 มอเตอร์ชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Start Motor) 11

2.3 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....11

2.3.1 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น.....12

2.3.2 การสั่นของสนามแม่เหล็ก (แรงเคลื่อนแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็ก) 12

2.3.3 การเกิดสลิปของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส. 17

3.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ และการคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....17

3.1.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ และมุมต่างเฟสของ Split Phase Motor.....17

3.1.2 คุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ และมุมต่างเฟสของ Capacitor Start Motor.....18

3.2 การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....19

3.2.1 สมการแรงบิดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในสภาวะ Dynamic.....19

3.2.2 การเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....20

3.3 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้ในการทดสอบ.....20

3.4 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่โรเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด....21

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....23

4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....23

4.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส (Single Phase Induction Motor).....23

4.1.2 DC Tachogenerator.....25

4.1.3 ล้อช่วยแรง (Flywheel) 26

4.1.4 Analyzing Recorder.....27

4.1.5 แท่นทดสอบวิธีเร่งความเร็วสำหรับมอเตอร์.....28

4.1.6 แท่นทดสอบวิธี Load Test สำหรับมอเตอร์.....28

4.2 วิธีการทดสอบ.....29

4.2.1 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration Test) 29

4.2.2 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation Test) 30

4.2.3 การทดสอบภาระของมอเตอร์ (Load Test) 30

4.3 ผลการทดสอบ.....30

4.3.1 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation Test).....30

4.3.2 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration Test).....36

4.3.3 การทดสอบภาระของมอเตอร์ (Load Test).....76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.3.4 การทดสอบแรงบิดขณะเริ่มหมุนโดยวิธียึดโรเตอร์ (Lock rotor test).....81

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....83

บรรณานุกรม.....85

ภาคผนวก.....87

ภาคผนวก ก. 88

ภาคผนวก ข. 103

ประวัติผู้เขียน.....109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 พิกัดต่าง ๆ ของมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ 24

4.2 พิกัดต่าง ๆ ของมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ.....24

4.3 มวลของล้อช่วยแรงและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ.....26

4.4 มวลของล้อช่วยแรงและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ.....26

4.5 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของมอเตอร์ ขนาด 1/2 แรงม้า.....35

4.6 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของมอเตอร์ ขนาด 1/4 แรงม้า.....35

4.7 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า.....76

4.8 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า.....77

4.9 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า.....77

4.10 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า.....78

4.11 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test ของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า.....78

4.12 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า.....79

4.13 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test ของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า.....79

4.14 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า.....80

4.15 ผลการทดสอบแรงบิดขณะเริ่มหมุนด้วยวิธีเร่งความเร็วกับ Lock rotor test.....81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....5

2.2 สนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง.....8

2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดขดลวดแยก.....11

2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ.....11

2.5 การสั่น (หรือการกระเพื่อม) ของสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กหมุน.....12

2.6 ภาพตัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....14

2.7 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง.....14

2.8 วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์.....15

2.9 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว ค่าจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว
จากการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง.....16

3.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบและมุมต่างเฟสของ Split Phase Motor 18

3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบและมุมต่างเฟสของ Capacitor Start Motor.....18

3.3 ลักษณะของล้อช่วยแรง.....21

4.1 มอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ.....23

4.2 มอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ.....24

4.3 DC Tachogenerator ที่ใช้ในการทดสอบ.....25

4.4 ล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ.....27

4.5 Analyzing Recorder ที่ใช้ในการทดสอบ.....27

4.6 แท่นสำหรับทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....28

4.7 แท่นสำหรับการทดสอบภาระของมอเตอร์.....28

4.8 ไดอะแกรมการต่อวงจรสำหรับทดสอบมอเตอร์.....29

4.9 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2.....31

4.10 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2.....31

4.11 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2.....32

4.12 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2.....32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.13 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2.....33
4.14 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2.....33
4.15 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2.....34
4.16 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2.....34
4.17 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน.....37
4.18 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อที่การทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน.....38
4.19 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน.....39
4.20 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน.....40
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05973 kg-m^2.....40
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2.....41
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2.....41
4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05973 kg-m^2.....42
4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2.....42
4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า
เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2.....43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2 43

4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.04598 kg-m^2 44

4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2 44

4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2 45

4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.04598 kg-m^2 45

4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2 46

4.33 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออกและเฟสเซอร์ของรูปคลื่น 48

4.34 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออกและเฟสเซอร์ของรูปคลื่น 49

4.35 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออกและเฟสเซอร์ของรูปคลื่น 51

4.36 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออกและเฟสเซอร์ของรูปคลื่น 52

4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของ มอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรง ขนาด 0.07926 kg-m^2 53

4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของ มอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรง ขนาด 0.09339 kg-m^2 54

4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของ มอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรง ขนาด 0.05972 kg-m^2 54

4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของ มอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรง ขนาด 0.07926 kg-m^2 55

4.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของ มอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรง ขนาด 0.09339 kg-m^2 55

4.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของ มอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรง ขนาด 0.0325 kg-m^2 56

4.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของ มอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรง ขนาด 0.04598 kg-m^2 56

4.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของ มอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรง ขนาด 0.0523 kg-m^2 57

4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของ มอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรง ขนาด 0.0325 kg-m^2 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.04598 kg-m^2 58
4.48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2 58
4.49 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า 59
4.50 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้า 59
4.51 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า 60
4.52 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้า 60
4.53 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2 62
4.54 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนา 0.07926 kg-m^2 63
4.55 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2 64
4.56 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2 65
4.57 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2 66
4.58 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2 67
4.59 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.60 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.04598 kg-m^2.....69

4.61 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2.....70

4.62 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2.....71

4.63 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.04598 kg-m^2.....72

4.64 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2.....73

4.65 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อย ค่าต่าง ๆ.....74

4.66 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อย ค่าต่าง ๆ.....74

4.67 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อย ค่าต่าง ๆ.....75

4.68 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อย ค่าต่าง ๆ.....75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปกติแล้วอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในครัวเรือน ส่วนใหญ่จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสเป็นเครื่องต้นกำลัง ซึ่งการนำไปใช้งานนั้นจึงต้องพิจารณาคุณสมบัติ และความเหมาะสมของลักษณะงานที่แตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่มีการใช้อย่างกว้างขวางมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น Split phase motors และ Capacitor start motors ซึ่งวิศวกรหรือผู้ที่ใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสจำเป็นต้องทราบคุณลักษณะต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างชัดเจนจึงจะสามารถเลือกใช้มอเตอร์ได้ถูกต้องกับขนาดและประเภทของงาน คุณลักษณะที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำคือ คุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ (torque – speed characteristics)

วิธีการในการหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมีหลายวิธีเช่น การคำนวณจากวงจรสมมูลย์ (equivalent circuit) หรือทำการวัดค่าแรงบิดโดยตรงแล้วนำค่าแรงบิดที่ทำการวัดได้ นำมาพล็อตกับข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบที่ต่างๆกัน เป็นต้น วิธีการแต่ละอย่างต่างก็มีข้อดีและข้อเสียในตัวมันเอง ดังนั้นวิศวกรหรือผู้ที่ใช้งานมอเตอร์จึงต้องใช้วิจารณญาณในการเลือกใช้วิธีการทดสอบ เพื่อความสะดวกและความเหมาะสมกับประเภทของงาน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิธีการที่ใช้ในการหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้มีการระบุไว้ในIEEE standard 114-2001 มีด้วยกัน 4 วิธีคือ 1.วิธีการวัดค่าเอาท์พุท (output measurement) 2.วิธีการเร่งความเร็ว (acceleration) 3. วิธีการวัดค่าอินพุท (input measurement) และ 4. วิธีวัดค่าโดยตรง (direct measurement)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ (torque – speed characteristics) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยวิธีการเร่งความเร็ว (acceleration) ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่สามารถหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสได้ตลอดย่านความเร็วของมอเตอร์ตั้งแต่หยุดนิ่ง จนกระทั่งความเร็วเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยใช้เวลาในการบันทึกข้อมูลที่สั้นมาก แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวิธีดังกล่าวคือ ผลกระทบจากสภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient), สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าและทางกล (noise) ที่ส่งผลกระทบต่อข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณ ด้วยเหตุนี้จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องมีการนำเทคนิคทางด้านวิศวกรรม และ วิธีการทางสถิติมาช่วยในการกำจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าว เพื่อให้ได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือและสามารถนำไปประกอบการใช้งานจริงได้ เทคนิคที่จะทำให้บรรลุจุดประสงค์ของงานวิจัยคือ อาศัยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ (torque – speed characteristics) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็วนั้น จำเป็นต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของสภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าไม่กระทบต่อข้อมูลความเร็วของมอเตอร์ ในช่วงเวลาที่เร่งความเร็ว ดังนั้นวิธีการที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบจากสภาวะทรานเซียนต์ดังกล่าว จึงต้องทำให้ช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ยาวนานพอ ที่จะทำให้สภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าหมดไป ซึ่งการที่จะเพิ่มเวลาในการเร่งความเร็วนั้นจำเป็นต้องทำให้ค่าคงตัวเวลาทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ (torque – speed characteristics) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) เป็นการทดสอบโดยการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีสตาร์ทตรง (direct on – line starting) แล้วทำการบันทึกข้อมูลแรงดัน, กระแสความเร็วรอบ และเวลาของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว ในการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอ ที่จะทำให้ผลของสภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) จากมอเตอร์หรือเครื่องมือวัดซึ่งจะส่งผลกระทบต่อข้อมูลต่าง ๆ ที่ทำการบันทึกนั้นหมดไป ดังนั้นแนวคิดที่ใช้ในการวิจัยคือการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์โดยการนำล้อช่วยแรง (fly wheel) มาทำการคัปปลิ้ง (coupling)เข้ากับเพลาของมอเตอร์เพื่อทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์สูงขึ้น ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นด้วย

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

การใส่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจากภายนอกเพิ่มให้กับโรเตอร์ เพื่อเพิ่มช่วงเวลาการเร่งความเร็วของมอเตอร์ เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์หาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส และจะยังพัฒนาเทคนิคในการวัดความเร็วของมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงขึ้นมากกว่าเดิม รวมถึงจะทำการล็อคโรเตอร์ก่อนบันทึกความเร็วเพื่อตัดสภาวะทรานเซียนทางไฟฟ้าเพื่อความแม่นยำในการทดสอบ

เทคนิคเดิมที่มีการใช้กันอยู่มีความยุ่งยาก เพราะการหาแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นต้องบันทึกความเร็วในช่วง Dynamic เช่น วิธี Brake Torque ซึ่งจะบันทึกแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เป็นช่วง และพล็อตกราฟตามแนวโน้ม ซึ่งการทดสอบต้องมีการส่งกำลังผ่านสายพานหรือการคัปปลิ้งต่างๆจึงทำให้ค่าแรงบิดที่บันทึกได้มีค่าผิดพลาดสูง ดังนั้นเมื่อเทียบกับเทคนิคของงานวิจัยนี้ซึ่งคำนวณหาแรงบิดจากอัตราเร่งของมอเตอร์ เทคนิคที่นำเสนอนี้จึงเป็นวิธีที่หาแรงบิดได้ถูกต้องกว่าและใช้เวลาในการทดสอบน้อยรวมถึงค่าใช้จ่ายถูกกว่าแบบเดิมที่ใช้กันอยู่

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยคือนำเสนอเทคนิค และกระบวนการในการหาคุณลักษณะแรงบิด–ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส โดยทำการทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ขนาด 1/2 และ 1/4 แรงม้า 2 ชนิดคือ Split phase motors และ Capacitor – start motors ในการทดสอบได้ทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ให้มีขนาดต่าง ๆ กัน 3 ขนาด แล้วใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการทำให้ข้อมูลมีความเหมาะสม ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์หาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ เพื่อความเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ จากนั้นนำผลกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็วเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบภาระ (load test) และผลที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากวงจรสมมูลย์ มาเปรียบเทียบศึกษาว่าวงจรสมมูลย์ที่ใช้นั้นมีความเหมาะสมถูกต้องเพียงใด เพื่อเป้าหมายในการศึกษาค้นคว้าและปรับปรุงให้วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมีความสมบูรณ์ถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการวิจัยโดยมีการกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆ เป็นลำดับดังต่อไปนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส จากนั้นก็อธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสและนำเสนอวงจรสมมูลย์เพื่อใช้ในการคำนวณหาคุณลักษณะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ (torque – speed characteristics) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยนำเสนอการหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบด้วยวิธีเร่งความเร็วโดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ซึ่งวิธีอ้างอิงตาม IEEE standard 114-2001 จากนั้นเป็นการออกแบบล้อช่วยแรงเพื่อใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส และนำเสนอการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์

บทที่ 4 เป็นการนำเสนอการทดลองและผลการทดลอง โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อคือ การทดสอบหน่วงความเร็ว (retardation test), การทดสอบการเร่งความเร็ว (acceleration test), การทดสอบภาระ (load test) และการทดสอบพารามิเตอร์ (parameter test)

บทที่ 5 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายก็จะเป็นการสรุปการทำงาน ผลที่ได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้ แนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้เพิ่มเติม และแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้

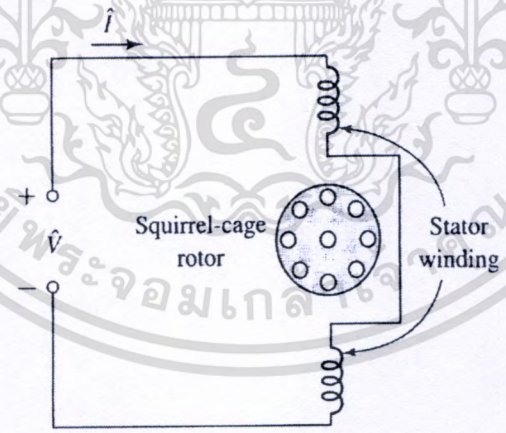
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย และพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส 2 ชนิด คือ 1. Split phase motor 2. Capacitor start motor ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการหมุนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และพื้นฐานของแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษา และประเมินสมรถนะแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

สำหรับโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสได้แสดงรูปที่ 2.1 จากโครงสร้างดังกล่าวนั้นมีผลทำให้ไม่เกิดแรงบิดเริ่มต้น ดังนั้นมอเตอร์จึงไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้ อย่างไรก็ตามถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนไปได้นั้นจำเป็นต้องมีวิธีการช่วยเพื่อให้เริ่มต้นหมุน และ สำหรับการพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ในรายงานนี้ได้นำทฤษฎีสนามแม่เหล็กคู่เพื่ออ้างอิงในการวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของมอเตอร์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

2.1.1 หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทกระตุ้นเดี่ยว (single excited) ซึ่งอาศัยการป้อนพลังงานเข้าทางสเตเตอร์ พลังงานดังกล่าวจะถูกส่งไปยังโรเตอร์โดยอาศัยการเหนี่ยวนำเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ผ่านช่องว่างอากาศ (air gap) ระหว่างมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการป้อนแรงดันให้แก่สเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ช่องว่างอากาศซึ่งสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ดังสมการ

$$N_s = \frac{120f}{P} \tag{2.1}$$

โดยที่ N_s = ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)

f = ความถี่ของแหล่งจ่าย (Hz)

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์

ในกรณีที่มีการป้อนแรงดันให้แก่สเตเตอร์และทำการล็อคโรเตอร์ให้อยู่กับที่จะเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในโรเตอร์ตามหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งความถี่ของแรงดันและกระแสทางด้าน โรเตอร์มีค่าเท่ากับทางด้านสเตเตอร์ ระดับของแรงดันและกระแสของโรเตอร์จะแปรตามอัตราส่วนรอบ (turn ratio) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ในสภาวะนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีสภาพเหมือนหม้อแปลงที่มีการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ (secondary) แต่หากว่ามีการขับโรเตอร์ของมอเตอร์ให้หมุนในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุนจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้นจึงไม่เกิดกระแสไหลในมอเตอร์ทำให้ไม่เกิดแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic torque) แต่ถ้าโรเตอร์ที่หมุนที่ความเร็วใดๆในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนและมีค่าน้อยกว่าความเร็วซิงโครนัส จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ซึ่งความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสและความเร็วรอบของโรเตอร์เรียกว่าสลิป (slip) ในการอธิบายค่าสลิปจะแสดงอยู่ในรูปสมการของเปอร์ยูนิตสลิป (per-unit slip) ดังสมการที่

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \tag{2.2}$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \tag{2.3}$$

โดยที่ ω_s = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (rad/s)

ω_r = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rad/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบใดๆที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ดังได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับ sf แรงบิดที่เกิดขึ้นในกรณีที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบใดๆเรียกว่าแรงบิดอะซิงโครนัส (asynchronous torque)

2.1.2 สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่วยนำหนึ่งเฟส

สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในหนึ่งขั้วแม่เหล็กจะมีขดลวดเพียงหนึ่งชุดเท่านั้น เมื่อมีขดลวดเพียงชุดเดียวสนามแม่เหล็กแทนที่จะหมุนเช่นเดียวกับมอเตอร์สองเฟสและมอเตอร์สามเฟส แต่จะกลับขั้วจากขั้วเหนือ N เป็นขั้วใต้ S และกลับจากขั้วใต้เป็นขั้วเหนือกลับไปกลับมาเท่านั้น จะทำให้โรเตอร์สั่นและไม่หมุนด้วย

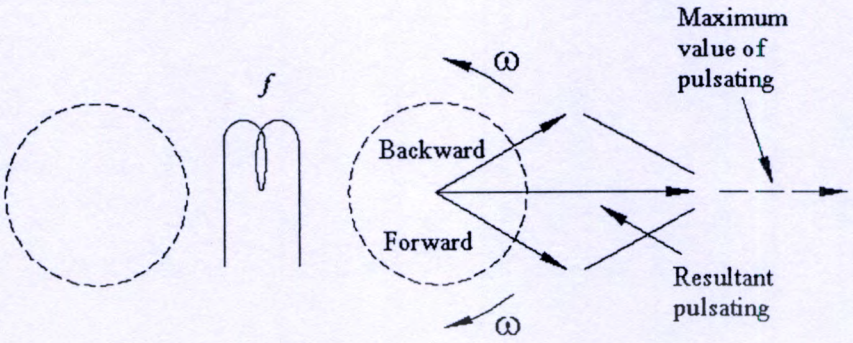
เพื่อที่จะให้โรเตอร์หมุนจำเป็นต้องทำให้สนามแม่เหล็กหมุนก่อน หลักการขั้นต้นโดยพันขดลวดเพิ่มเข้าไปที่สเตเตอร์อีกหนึ่งชุด เรียกขดลวดชุดนี้ว่า ขดลวดช่วยหมุน (auxiliary winding) และเรียกขดลวดชุดแรกว่า ขดลวดหลักหรือขดลวดเมน (main winding) ขดลวดหลักหรือขดลวดเมนนี้จะทำให้โรเตอร์หมุนอยู่ตลอดเวลา จึงเรียกว่าขดลวดรันหรือขดรัน (running winding) และขดลวดช่วยหมุนจะช่วยทำให้โรเตอร์เริ่มหมุนแล้วก็ปลดออก จึงเรียกขดลวดชุดนี้อีกอย่างหนึ่งว่า ขดลวดสตาร์ท หรือ ขดสตาร์ท (starting winding)

โดยการออกแบบให้ขดสตาร์ทมีค่าความต้านทานสูง ๆ และให้ขดรันมีค่าอินดั๊กแตนซ์สูงจะทำให้กระแสที่ไหลเข้าขดลวดทั้งสองมีมุมต่างเฟสกันเกือบ 90 องศาไฟฟ้า คือกระแสที่ไหลผ่านขดสตาร์ทจะมีเฟสเดียวกับแรงดันที่ป้อน ส่วนกระแสที่ไหลผ่านขดรันจะมีมุมต่างเฟสกับแรงดันที่ป้อน 90 องศาไฟฟ้า เมื่อขดสตาร์ทเกิดขั้วเหนือ N ไปแล้ว 90 องศาไฟฟ้า ขดรันก็จะเกิดขั้วเหนือ N ขึ้นมาบ้าง ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นโดยอาศัยหลักของมอเตอร์สองเฟสนั่นเอง เมื่อโรเตอร์หมุนได้ความเร็วตามพิกัดแล้ว ขดสตาร์ทจะถูกตัดออกด้วยสวิทช์อัตโนมัติ

2.1.3 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทางในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่วยนำหนึ่งเฟส

การกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียว ทำให้เกิดการกระเพื่อมของสนามแม่เหล็กดังกล่าวข้างต้นมาแล้ว ซึ่งการพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนั้นด้วยการแบ่งสนามแม่เหล็กหมุนออกเป็นสองส่วนที่มีทิศทางตรงข้ามกัน โดยที่แต่ละส่วนมีค่า mmf สูงสุดที่สเตเตอร์เท่ากับ 1/2 ของสนามแม่เหล็กหมุนทั้งหมดที่ความเร็วเชิงมุม คือ ω และองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กหมุนทั้งสองที่เกิดขึ้นตามแนวแกนของขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง

เมื่อพิจารณาขดลวดสเตเตอร์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทางเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กหมุนแต่ละส่วนทำให้เกิดแรงดันสมดุลขึ้นในขดลวดโรเตอร์ และผลลัพธ์ของกระแสโรเตอร์คือ ผลรวมของกระแสที่ไหลในบริเวณผิวรอบขดลวดโรเตอร์ (closed rotor winding) ที่กำหนดโดยแรงดันแต่ละส่วน ถ้าแบ่งวงจรสมมูลย์ของโรเตอร์ออกเป็นสองส่วนซึ่งตั้งฉากกัน และกำหนดให้กระแสที่ไหลในโรเตอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลังคือ I_f และ I_b ตามลำดับ ดังนั้นกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าที่เหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสสมดุลคือ

$$I_f \text{ (ไหลในคอยล์ d) และ } -jI_f \text{ (ไหลในคอยล์ q)}$$

สำหรับกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลังที่เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสสมดุลคือ

$$I_b \text{ (ไหลในคอยล์ d) และ } -jI_b \text{ (ไหลในคอยล์ q)}$$

ดังนั้นผลลัพธ์ของกระแสที่ไหลในคอยล์ d และ q คือ

$$\hat{I}_d = \hat{I}_f + \hat{I}_b \tag{2.4}$$

$$\hat{I}_q = j\left(\hat{I}_f - \hat{I}_b\right) \tag{2.5}$$

ดังนั้น

$$\hat{I}_f = \frac{1}{2}\left(I_d - jI_q\right) \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{I}_b = \frac{1}{2}\left(I_d + jI_q \right) \tag{2.7}$$

และกำลังในช่องอากาศที่กำหนดโดยสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลังคือ

$$P_{gf} = I_l^2 R_f \tag{2.8}$$

$$P_{gb} = I_l^2 R_b \tag{2.9}$$

สำหรับแรงบิดกำหนดได้ดังนี้คือ

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega_s} \tag{2.10}$$

$$T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_s} \tag{2.11}$$

และผลรวมของแรงบิดคือ

$$T = T_f - T_b = \frac{I_l^2}{\omega}\left(R_f - R_b \right) \tag{2.12}$$

สำหรับกำลังทางกลที่เกิดขึ้นกำหนดได้ดังนี้คือ

$$P_{mech} = T\omega_r = T\omega(1-s) \tag{2.13}$$

$$= I_l^2\left(R_f - R_b \right)(1-s) \tag{2.14}$$

$$= \left(P_{gf} - P_{gb} \right)(1-s) \tag{2.15}$$

และกำลังทางด้านเอาท์พุทคือ

$$P_{out} = P_{mech} - P_{rot} \tag{2.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ P_{rot} ประกอบด้วยการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลมบวกกับการสูญเสียที่แกนรวมเป็นการสูญเสียเนื่องจากการหมุน สนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศทั้งสองทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน ดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากทองแดงในโรเตอร์ $\left(I^2R\right)$ คือ ผลรวมเชิงตัวเลขของการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กแต่ละส่วน โดยที่การสูญเสียเนื่องจากทองแดงในโรเตอร์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลังกำหนดได้ดังนี้

$$P_{2f} = sP_{gf} \tag{2.17}$$

$$P_{2b} = (2-s)P_{gb} \tag{2.18}$$

และผลรวมของการสูญเสียเนื่องจากทองแดงในโรเตอร์คือ

$$P_2 = sP_{gf} + (2-s)P_{gb} \tag{2.19}$$

ผลรวมของกำลังในช่องอากาศ เนื่องจากองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศทั้งสองสามารถกำหนดได้ดังนี้คือ

$$P_g = P_{gf} + P_{gb} \tag{2.20}$$

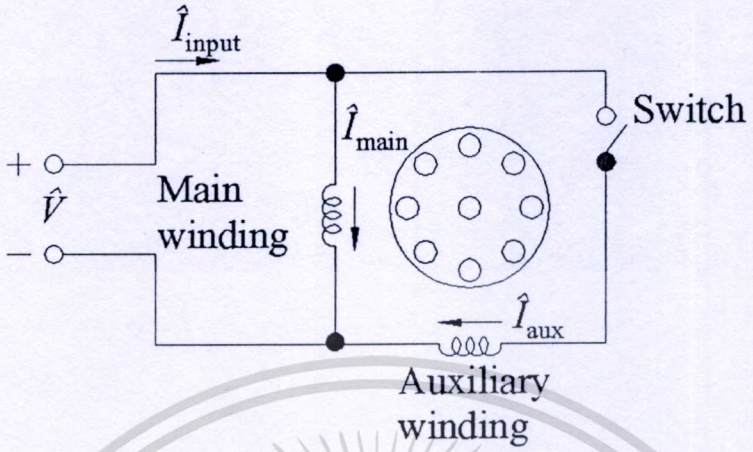
2.2 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมีด้วยกันหลายชนิดซึ่งมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป ในแต่ละชนิดสามารถอธิบายได้จากหลักการที่ทำให้เกิดการต่างเฟสระหว่างกระแสที่ไหลในขดลวดหลัก และขดลวดช่วย แต่ในบางครั้งเราเรียกชื่อรวมกันว่า มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส 2 ชนิด คือ Split phase motor และ Capacitor start motor

2.2.1 มอเตอร์แบบแยกเฟส (Split Phase Motor) โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดแยกเฟสแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ขดลวดช่วยมีอัตราส่วนค่าความต้านทานต่อรีแอคแตนซ์สูงกว่าขดลวดหลัก โดยที่กระแสซึ่งไหลผ่านขดลวดทั้งสองมีเฟสต่างกัน การทำให้อัตราส่วนของค่าความต้านทานต่อรีแอคแตนซ์ของขดลวดช่วยมีค่าสูงนั้นเพื่อใช้ในระหว่างการเริ่มหมุนของมอเตอร์เท่านั้น หลังจากนั้นเมื่อมอเตอร์หมุนไปแล้วจนกระทั่งมีความเร็วที่ 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

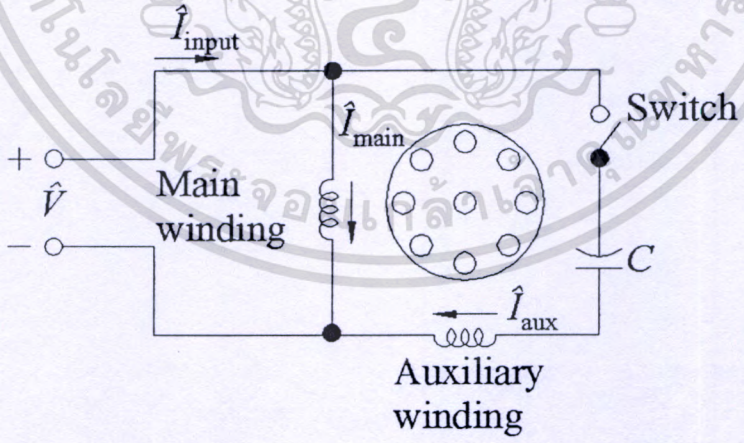
ขดลวดช่วยถูกตัดออกด้วยสวิตซ์แรงเหวี่ยง (Centrifugal Switch) สำหรับคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบของมอเตอร์ชนิดนี้มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนต่ำจนถึงปานกลาง



รูปที่ 2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดขดลวดแยก

2.2.2 มอเตอร์ชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Start Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนสูงมาก เนื่องจากได้ต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเข้ากับขดลวดช่วย ดังรูปที่ 2.4 นั้นคือการเพิ่มมุมเฟสระหว่างกระแสที่ไหลในขดลวดทั้งสอง และเมื่อมอเตอร์หมุนที่ความเร็วประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส สวิทซ์แรงเหวี่ยงจะตัดขดช่วยออก



รูปที่ 2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

2.3 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

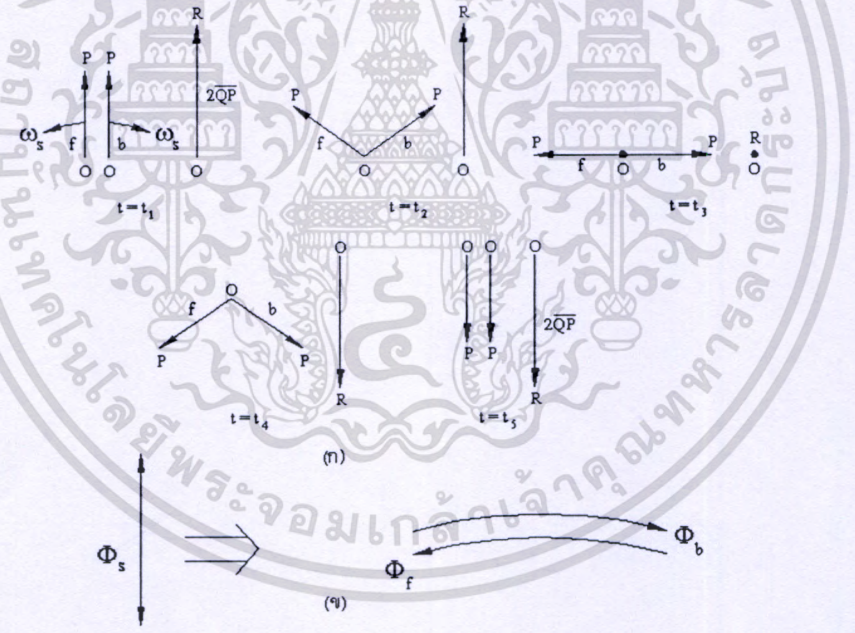
มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีโรเตอร์เป็นประเภทไม่มีขั้วยื่น ดังนั้นช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์จึงมีขนาดเท่ากันตลอด (uniform air-gap) การเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยงนำจึงมีหลักการเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดที่โรเตอร์ไม่มีขั้วยื่น

2.3.1 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในสเตเตอร์และโรเตอร์จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวจะเกี่ยงคล้องกันผ่านช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องระหว่างขดลวดทั้งสองนี้เรียกว่า ฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (mutual flux) ซึ่งเป็นฟลักซ์แม่เหล็กส่วนมากในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในส่วนของฟลักซ์แม่เหล็กส่วนน้อยที่ไม่ได้ผ่านช่องว่างอากาศ แต่จะเกี่ยวคล้องเฉพาะตัวขดลวดที่กำเนิดฟลักซ์นั้นเรียกว่า ฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล (leakage flux) ในส่วนของฟลักซ์แม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นจะพิจารณาเฉพาะฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (mutual flux) เท่านั้น ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลจะมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องจักร โดยผลของฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลจะมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปของค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance)



รูปที่ 2.5 การสั่น (หรือการกระเพื่อม) ของสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กหมุน

2.3.2 การสั่นของสนามแม่เหล็ก (แรงเคลื่อนแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็ก)

เมื่อพิจารณาการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 องค์ประกอบหลักซึ่งจะมีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้ามและหมุนที่ความเร็วเดียวกัน คือความเร็วซิงโครนัส สนามแม่เหล็กดังกล่าวพิสูจน์ได้โดยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ หรือใช้กราฟมาทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 ถ้ากำหนด OP เป็นเวคเตอร์ที่เกิดจากผลของการเคลื่อนที่สองส่วนซึ่งมีขนาดเท่ากันโดยที่ f คือ การเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามีทิศทางตามเข็มนาฬิกา และ b คือ การเคลื่อนที่ถอยหลังมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นการหมุนของเวคเตอร์ทั้งสองเกิดขึ้นที่ความเร็วเดียวกันในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อกำหนดให้ OR คือ เวคเตอร์ที่เป็นผลรวมของเวคเตอร์สองส่วนที่มีขนาด +20P และ -20P โดยที่เวคเตอร์ทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกันและเป็นเวคเตอร์ที่แปรตามเวลาในฟังชันก์ไซน์ ดังนั้นถ้าการหมุนของเวคเตอร์ทั้งสองดังกล่าวนั้นหมุนด้วยความเร็วคงที่เดียวกันซึ่งการสั่นของสนามแม่เหล็ก (เขียนแทนด้วย เวคเตอร์ OR) ที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์นั้น ส่งผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสองทาง ดังนั้นการสั่นของเส้นแรงแม่เหล็กในสเตเตอร์ (Palsating stator flux) , Φ_s ตามแนวแกนของขดลวดสเตเตอร์ เป็นผลจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนสองทางคือ , ϕ_f และ Φ_b ดังรูปที่ 2.5 (ข) สำหรับสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณาขดลวดสเตเตอร์ ที่วางแบบกระจายในรูปสัญญาณไซน์นั้นเป็นการวิเคราะห์จากสมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetomotive Force:mmf) ในตำแหน่งของมุม θ ดังรูปที่ 2.6 และการกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$F(\theta) = Ni\cos\theta \tag{2.21}$$

เมื่อ N คือจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ และกำหนดให้ $I = I_{\max}\cos\omega t$ ดังนั้น

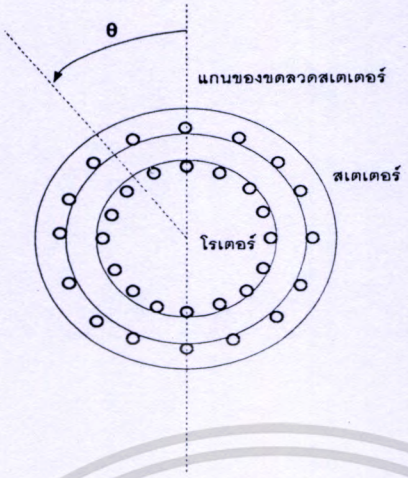
$$F(\theta,t) = NI_{\max}\cos\theta\omega t \tag{2.22}$$

$$= \frac{NI_{\max}}{2}\cos(\omega t - \theta) + \frac{NI_{\max}}{2}(\omega t + \theta) \tag{2.23}$$

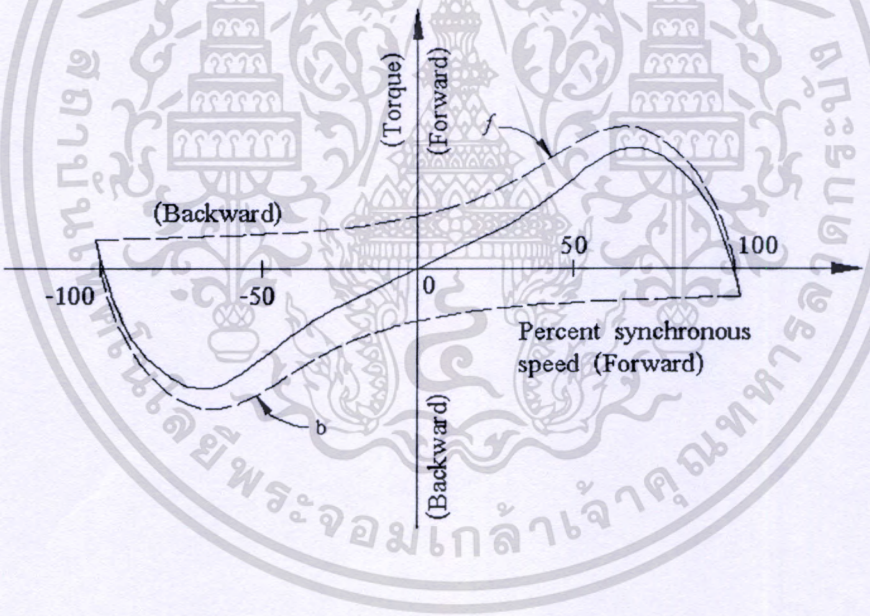
$$= F_f + F_b \tag{2.24}$$

เมื่อ F_f คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนตามทิศทางของมุม θ และ Φ_b แทนแรงเคลื่อนแม่เหล็กตามทิศทางตรงข้ามกับ F_f สำหรับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองนั้น มีผลที่ทำให้เกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่มีทิศทางตรงกันข้าม และองค์ประกอบของแรงบิดทั้งสองส่วนลดลงได้ดังรูปที่ 2.7 สำหรับในขณะมอเตอร์อยู่นิ่งนั้น แรงบิดไปข้างหน้าและแรงบิดถอยหลังมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นทำให้ผลของแรงบิดเริ่มต้นหมุนมีค่าเท่ากับศูนย์แต่ในขณะที่มอเตอร์หมุนที่ค่าความเร็วต่างๆ กัน แรงบิดทั้งสองส่วนไม่เท่ากันส่งผลทำให้มอเตอร์หมุนไปได้ตามทิศทางของการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ภาพตัดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส



รูปที่ 2.7 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง

2.3.3 การเกิดสลิปของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

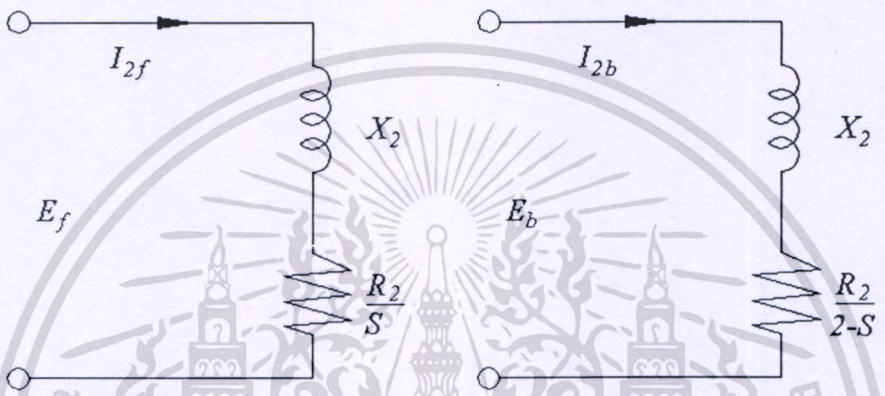
ถ้าสมมุติว่าโรเตอร์หมุนตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าที่ความเร็ว n_r รอบต่อนาทีและความเร็วซิงโครนัส คือ n รอบต่อนาที ดังนั้นค่าสลิปของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้ากำหนดตามสมการ 2.25

$$s_f = \frac{N - N_r}{N} = s \qquad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหมุนของโรเตอร์ในทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าเรียกว่าสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง และค่าสลิปกำหนดได้ดังนี้ คือ

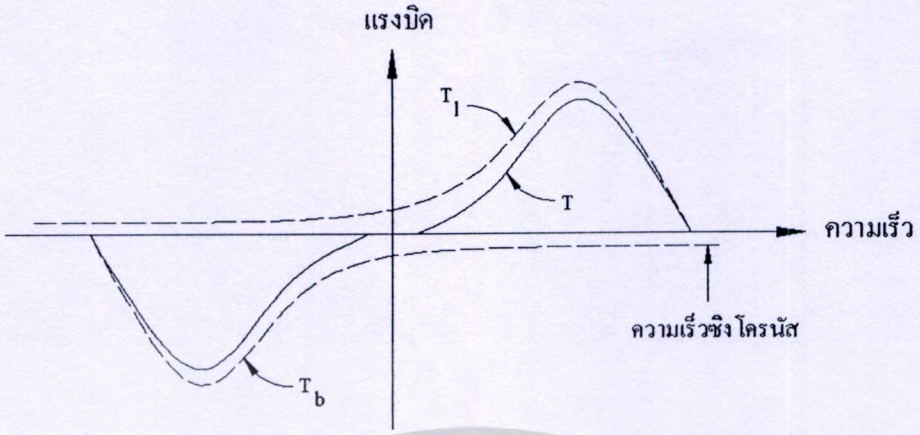
$$s_b \frac{N-(-N_r)}{N} = 2 - s \tag{2.26}$$



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์

สำหรับวงจรโรเตอร์เส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า และเส้นแรงแม่เหล็กหมุนถอยหลัง ดังรูปที่ 2.8 นั้น ขณะโรเตอร์อยู่นิ่งอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนทั้งสองมีค่าเท่ากัน ส่งผลทำให้กระแสเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองเท่ากัน คือ $I_{2f} = I_{2b}$ และทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองที่เกิดขึ้นมีขนาดเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ (ทิศทางตรงกันข้าม) ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็ก Φ_f และ Φ_b ที่เกิดขึ้นในช่องอากาศจึงมีขนาดเท่ากันด้วย โดยพฤติกรรมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้น ยังมีผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กหมุนถอยหลังลดลงอีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ความเร็วของมอเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าเพิ่มขึ้นในขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กหมุนถอยหลังลดลง อย่างไรก็ตามขณะที่โรเตอร์หมุนอิมพีแดนซ์ของวงจรโรเตอร์ (ในรูปที่ 2.8) นั้นไม่เท่ากัน ซึ่งกระแสโรเตอร์ $I_{2b} > I_{2f}$ (ทำให้ค่าประกอบกำลังต่ำ) และขณะโรเตอร์เคลื่อนที่แรงบิดไปข้างหน้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ในทางตรงข้ามกันแรงบิดถอยหลังมีค่าลดลงทำให้คุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ ในรูปที่ 2.7 เปลี่ยนไปเป็นรูปที่ 2.9 ซึ่งมีค่าแรงบิดชั่วขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว ค่าจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว จากการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทที่ 3
การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ ณ ความเร็วรอบใดๆจากความเร็วศูนย์ถึงความเร็วซิงโครนัส วิธีการในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีอยู่หลายวิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับวิศวกรหรือใช้งานมอเตอร์จะเลือกนำมาใช้ แต่ว่าในการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้หลายมาตรฐานและแต่ละมาตรฐานก็มีอยู่หลายวิธีที่ใช้ในการทดสอบ ในส่วนวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นวิธีหนึ่งในสี่วิธี ซึ่งกำหนดไว้ใน IEEE standard 114-200[1]

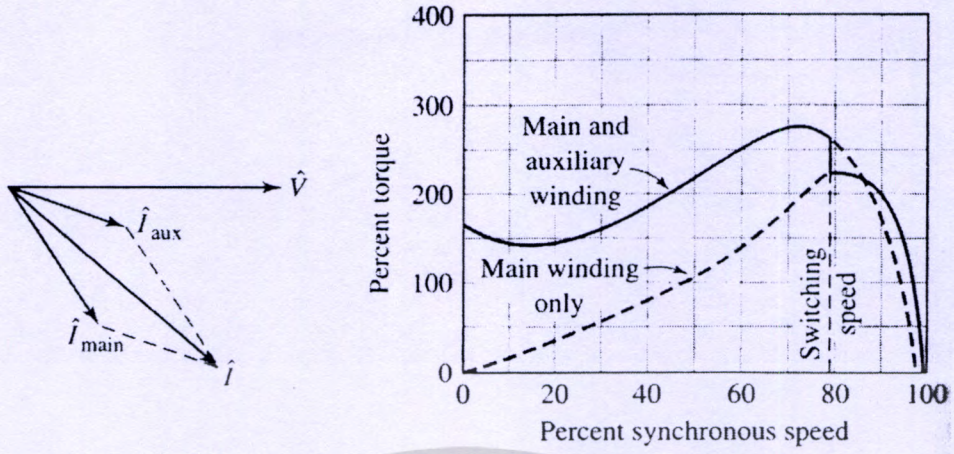
3.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ และการคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

กราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งวิศวกรหรือผู้ใช้มอเตอร์สามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกใช้มอเตอร์ได้ จุดต่างๆบนกราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2

3.1.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ และมุมต่างเฟสของ Split Phase Motor

กราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ ของ Split Phase Motor จะแสดงขนาดของแรงบิดของมอเตอร์ทุกๆความเร็วรอบ โดยที่เส้นประแสดงขนาดแรงบิดของมอเตอร์ขณะที่มอเตอร์ทำงานด้วยขดลวดหลัก (Main windings)เพียงขดเดียว และเส้นทึบแสดงขนาดแรงบิดของมอเตอร์ขณะที่มอเตอร์ทำงานด้วยขดลวดหลัก (Main windings) และขดลวดช่วย(Auxiliary windings) ในส่วนของมุมต่างเฟสระหว่างกระแสขดลวดหลักกับกระแสขดลวดช่วยจะมีขนาดแตกต่างกันน้อยซึ่งคือส่วนหนึ่งที่ทำให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนมีขนาดต่ำ

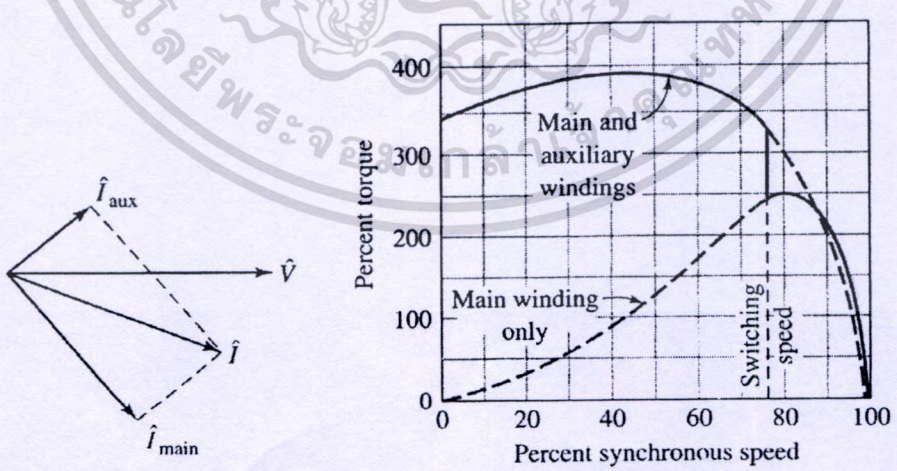
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
61655



รูปที่ 3.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ และมุมต่างเฟสของ Split Phase Motor

3.1.2 คุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ และมุมต่างเฟสของ Capacitor Start Motor

ส่วนของกราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ ของ Capacitor Start Motor จะแสดงลักษณะเช่นเดียวกันกับ Split Phase Motor แต่จะเห็นว่าขนาดแรงบิดขณะเริ่มหมุนนั้นสูงกว่าของ Split Phase Motor ซึ่งเป็นผลมาจากตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกับขดลวดช่วยของมอเตอร์ และมุมต่างเฟสก็จะมีขนาดต่างกันประมาณ 90° ซึ่งก็เป็นผลมาจากตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกับขดลวดช่วยของมอเตอร์เช่นเดียวกัน โดยทำให้มุมของกระแสขดลวดช่วยนั้นนำหน้าแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ และมุมต่างเฟสของ Capacitor Start Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) กระทำโดยการสตาร์ทมอเตอร์ด้วยวิธีสตาร์ทตรง (direct-on-line starting) โดยมอเตอร์อยู่ในสภาวะไร้ภาระ (no-load) จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลแรงดัน, กระแส, ความเร็วรอบ, และเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว วิธีการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบด้วยวิธีการเร่งความเร็วนี้จะต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลกระทบจากสภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) จากเครื่องมือวัดและจากตัวมอเตอร์เองซึ่งจะส่งผลกระทบต่อข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะที่ทำการเร่งความเร็วได้ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการกำจัดผลกระทบดังกล่าวโดยต้องยืดช่วงเวลาในการเร่งความเร็วให้นานขึ้นโดยคัปปลิ้ง (coupling) ล้อช่วยแรงเข้ากับเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ วิธีการดังกล่าวจะเป็นการเพิ่มค่าคงตัวเวลาทางกล (mechanical time constant) ให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำทำให้เวลาในการเร่งความเร็วนานขึ้น นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีคือทำการสตาร์ทมอเตอร์โดยทำการลดแรงดันที่ป้อนเข้าสู่สเตเตอร์ของมอเตอร์ วิธีนี้ก็จะเพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วเช่นกัน

3.2.1 สมการแรงบิดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในสภาวะ Dynamic

ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์ (acceleration method) ซึ่งจะทำการบันทึกข้อมูลในช่วงที่มอเตอร์ทำการเร่งความเร็วตั้งแต่สภาวะโรเตอร์หยุดนิ่งจนถึงความเร็วเข้าใกล้ซิงโครนัส โดยการทดสอบจะทำการบันทึกข้อมูลความเร็วรอบ, แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าและเวลาในการเร่งความเร็ว ในการทดสอบจะทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้กับมอเตอร์ เพื่อเพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่จะเพิ่มให้กับมอเตอร์มีระบุไว้ใน IEC standard 34-12 [3] เมื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยภายนอกให้กับมอเตอร์แล้วสมการที่ใช้คำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์จะได้เป็นดังสมการที่ 3.1

$$T_m = (J_m)\frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \tag{3.1}$$

T_m = แรงบิดของมอเตอร์ (N.m)

$D\omega_r$ = แรงบิดจากความหนืด (N.m)

J_m = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ ($kg.m^2$)

ω_r = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

เนื่องจากในการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบของมอเตอร์จำเป็นต้องมีช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) จากมอเตอร์และเครื่องมือวัดซึ่งจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลแรงบิดของมอเตอร์นั้นหมดไป ดังนั้นจำเป็นต้องทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์นั้นแสดงดังสมการที่ 3.2

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{1}{T_m - T_l} d\omega \tag{3.2}$$

t = เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์จาก ω_1 ไปสู่ ω_2

J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (kg-m^2)

T_m = แรงบิดเร่งของมอเตอร์ (N-m)

T_l = แรงบิดภาระของมอเตอร์ (N-m)

เนื่องจากในการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วนี้จะทำการทดสอบที่สภาวะไร้ภาระ (no load) ดังนั้นค่าแรงบิด ของภาระของมอเตอร์ในสมการที่ 3.2 จึงกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ และจากสมการที่ 3.2 เมื่อทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (J) ให้แก่มอเตอร์จะทำให้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์มีค่ามากขึ้น ดังนั้นในการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำกระทำได้โดยการคัปปลิ้ง (coupling) วัตถุทรงกระบอกเข้ากับเพลาของมอเตอร์ ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ ภายหลังจากเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์ของมอเตอร์แล้วนั้นแสดงดังสมการที่ 3.3

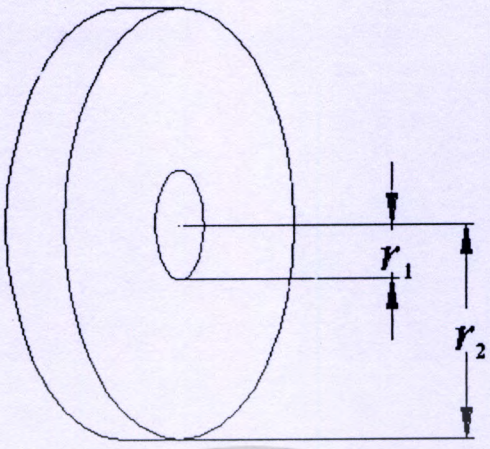
$$T_m = (J_m + J_{ext}) \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \tag{3.3}$$

J_{ext} = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยภายนอกที่เพิ่มให้มอเตอร์ (kg.m^2)

3.3 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้ในการทดสอบ

จากหัวข้อ 3.1.2 ได้กำหนดรูปร่างของวัตถุที่ใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์โดยให้เป็นรูปทรงกระบอกซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะของล้อช่วยแรง

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรูปทรงดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 3.4

$$J_{ext} = \frac{1}{2} m(r_1^2 + r_2^2) \tag{3.4}$$

m = มวลของวัตถุ (kg)

r_1 = รัศมีภายในของวัตถุ (m)

r_2 = รัศมีภายนอกของวัตถุ (m)

3.4 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่โรเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด

วิธีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น กระทำโดยการใช้ล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่าหนึ่งมาทำการคลัปปลิ้ง (coupling) เข้ากับเพลาของมอเตอร์ซึ่งวิธีการในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ สามารถคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) ซึ่งขั้นตอนการทดสอบกระทำตาม IEC standard 34-2 โดยทำการเดินเครื่องมอเตอร์ที่สภาวะคงตัว (steady state) และมีการคลัปปลิ้งล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่าหนึ่งเข้าที่เพลามอเตอร์ จากนั้นทำการปลดแหล่งจ่ายออกแล้วทำการบันทึกความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลงจนกระทั่งความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงถึงประมาณ 95% ของความเร็วพิกัด ภายหลังจากทำการปลดแหล่งจ่ายออกจากขั้วของสเตเตอร์ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ (T_m) จะมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นสมการแรงบิดในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลงเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(J_m + J_1)\frac{d\omega_{r1}}{dt} + D\omega_{r1} = 0 \tag{3.5}$$

$$(J_m + J_2)\frac{d\omega_{r2}}{dt} + D\omega_{r2} = 0 \tag{3.6}$$

J_m = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์ (kg-m^2)

J_1, J_2 = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงตัวที่ 1 และ 2 (kg-m^2)

$D\omega_r$ = แรงบิดจากความหนืด (N.m)

จากสมการที่ 3.5 และ 3.6 เมื่อทำการแก้สมการอนุพันธ์ (differential equation) จะได้ผลเฉลย (solution) ของสมการอยู่ในรูปแบบ

$$\omega_{r2}(t) = \omega_0 e^{-\left(\frac{D}{J_m + J_1}\right)t} \tag{3.7}$$

โดยที่ ω_0 = ค่าความเร็วเริ่มต้นในการหน่วงความเร็ว (rad/s)

จากสมการที่ 3.5 และ 3.6 นำสมการทั้งสองมาทำการหาผลลัพธ์ของสมการสองตัวแปรคือค่า J_m และค่า D โดยจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ดังสมการที่ 3.8

$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega_{r1}}{dt} & \omega_{r1} \\ \frac{d\omega_{r2}}{dt} & \omega_{r2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_m \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -J_1 \frac{d\omega_{r2}}{dt} \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

ผลลัพธ์ของสมการที่ 3.8 จะแสดงดังสมการที่ 3.9

$$\begin{bmatrix} J_m \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d\omega_{r1}}{dt} & \omega_{r1} \\ \frac{d\omega_{r2}}{dt} & \omega_{r2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ -J_1 \frac{d\omega_{r2}}{dt} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

ในการคำนวณสมการที่ 3.9 ให้ทำการคำนวณที่ความเร็วพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

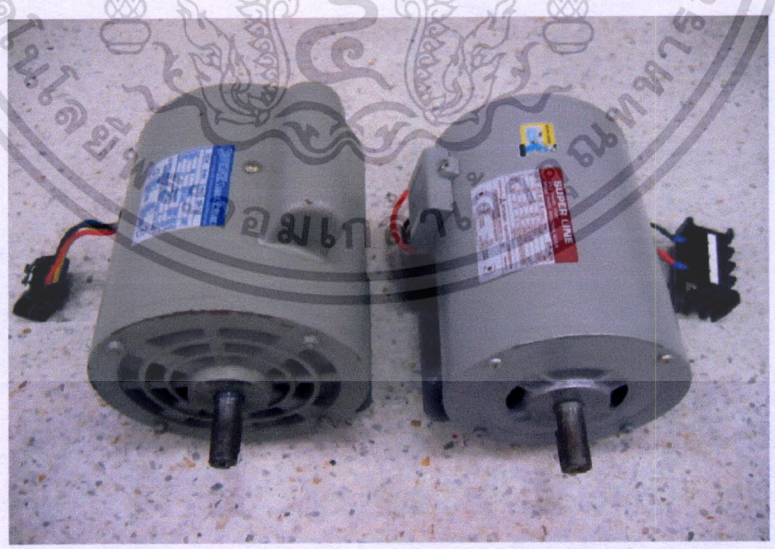
ในการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส จะมีการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็ว (acceleration method) และวิธีการหน่วงความเร็ว (retardation method) เป็นหลักซึ่งวิธีดังกล่าวได้มีระบุไว้ใน IEEE standard 114-2001

ในส่วนของบทนี้จะนำเสนอการทดสอบ ผลการทดสอบในรูปแบบต่าง ๆ และการคำนวณหาคุณลักษณะแรงบิดความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสพร้อมคุณลักษณะอื่น ๆ ด้วย

4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส (Single Phase Induction Motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกสร้างขึ้นโดยอ้างอิงมาตรฐาน JIS C4004 เป็นมอเตอร์ประเภท split phase และ capacitor start ขนาด 1/2 และ 1/4 แรงม้า ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 มอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 มอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ

พิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 พิกัดต่าง ๆ ของมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดมอเตอร์	พิกัดกำลัง (Hp)	พิกัดแรงดัน (V)	พิกัดกระแส (A)	พิกัดความเร็ว (rpm)	พิกัดแรงบิด (N-m)
Split Phase	1/2	220	4.8	1440	2.47
Capacitor Start	1/2	220	4.5	1425	2.5

ตารางที่ 4.2 พิกัดต่าง ๆ ของมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดมอเตอร์	พิกัดกำลัง (Hp)	พิกัดแรงดัน (V)	พิกัดกระแส (A)	พิกัดความเร็ว (rpm)	พิกัดแรงบิด (N-m)
Split Phase	1/4	220	2.8	1450	1.228
Capacitor Start	1/4	220	2.6	1450	1.228

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 DC Tachogenerator

DC Tachogenerator เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงประเภทหนึ่ง โดย DC Tachogenerator ที่นำมาใช้สำหรับทดสอบเป็นประเภทที่มีแปรงถ่านโดยสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุทกับความเร็วรอบของ DC Tachogenerator แสดงดังสมการที่ 4.1

$$V = k\omega \tag{4.1}$$

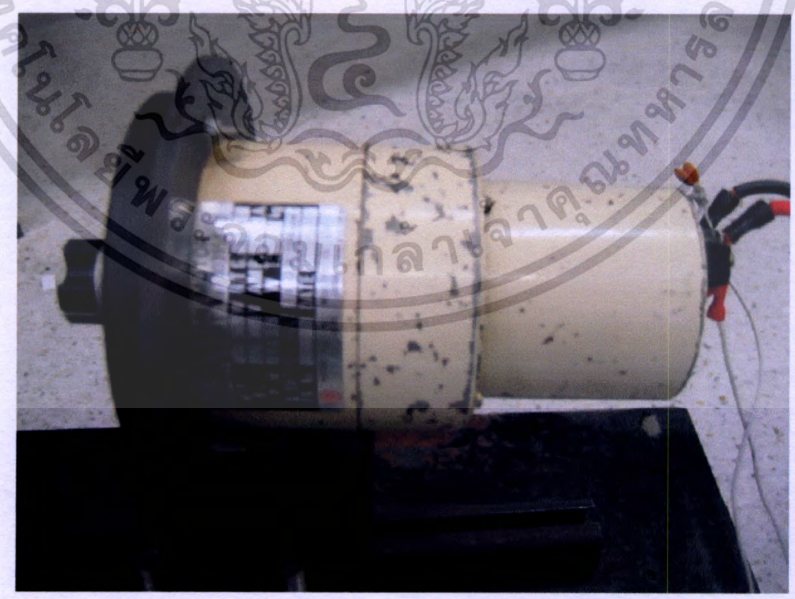
โดยที่ V = แรงดันเอาท์พุทของ DC Tachogenerator (V)

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 0.02988 (V/(rad/s))



รูปที่ 4.3 DC Tachogenerator ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ล้อช่วยแรง (Flywheel)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อย 3 ค่า สำหรับมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้าคือขนาด 10, 11.38, 12.66 kg และ 3 ค่าสำหรับมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้าคือขนาด 7.1, 7.6, 8.86 kg เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกัน โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 มวลของล้อช่วยแรงและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ

มวล (kg)	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ($kg\text{-}m^2$)
10	0.05972
11.38	0.07926
12.66	0.09339

ตารางที่ 4.4 มวลของล้อช่วยแรงและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ

มวล (kg)	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ($kg\text{-}m^2$)
7.1	0.0325
7.6	0.04598
8.86	0.0523

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 ล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.4 Analyzing Recorder

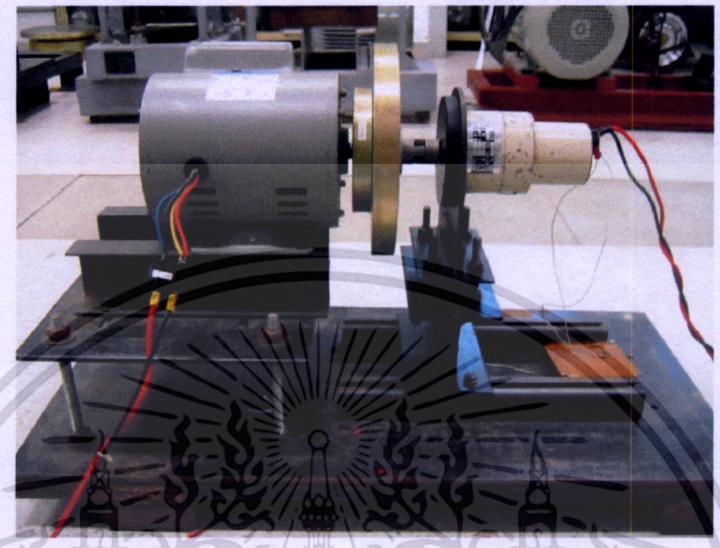
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้า , กระแสไฟฟ้า , ความเร็วรอบ , และเวลาที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้ง รูปแบบของ analyzing recorder แสดงดังรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.5 Analyzing Recorder ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 แท่นทดสอบวิธีเร่งความเร็วสำหรับมอเตอร์

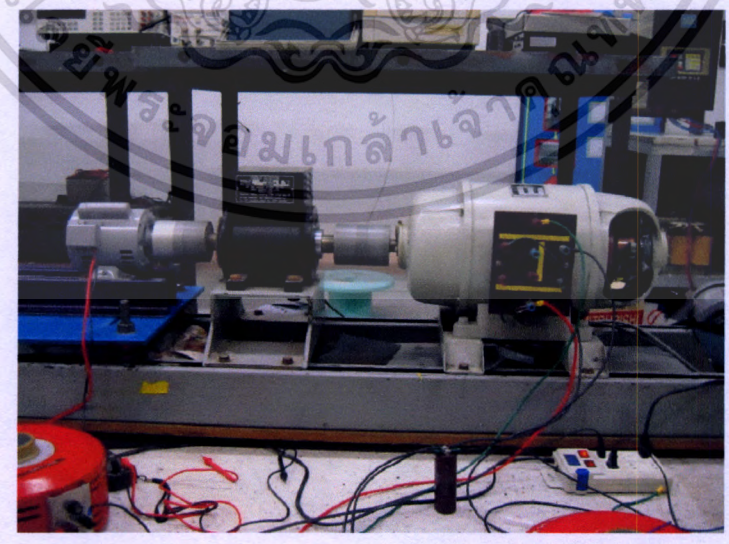
แท่นทดสอบสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ได้นำล้อช่วยแรงมาคลัปปลิ้งกับเพลามอเตอร์โดยตรงและคลัปปลิ้งเข้ากับ DC Tachogenerator ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แท่นสำหรับทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

4.1.6 แท่นทดสอบ Load สำหรับมอเตอร์

แท่นสำหรับทดสอบ Load โดยนำมอเตอร์ที่จะทดสอบคัปปลิ้งกับ Torque Detector และมี DC Generator เป็น Load ของมอเตอร์

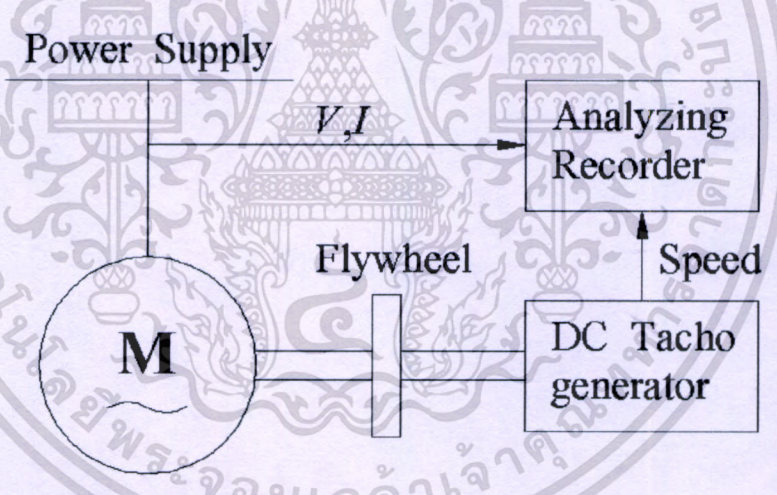


รูปที่ 4.7 แท่นสำหรับการทดสอบภาระของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วิธีการทดสอบ

ในการทดสอบได้ทำการต่อมอเตอร์ โดยทำการต่อแหล่งจ่ายผ่าน analyzing recorder เพื่อบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ก่อนที่จะเข้าสู่มอเตอร์ โดยไดอะแกรมการต่อวงจรสำหรับทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8 ในการทดสอบจะต้องมีการทดสอบหลักอยู่ 2 ประเภทคือ การทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็วและการทดสอบด้วยวิธีการหน่วงความเร็ว ภายหลังการทดสอบทั้ง 2 แล้ว ก็จะทำการทดสอบกับภาระ (load test) เพื่อหาคุณลักษณะแรงบิด - ความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงความเร็วพิกัดถึงความเร็วในสภาวะไร้ภาระ (no-load) ซึ่งมีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส นอกจากนี้ก็ยังทำการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยใช้หลักการ Double Revolving Field Theory โดยการทดสอบทั้ง 2 อย่างนี้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบและเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือได้ของกราฟคุณลักษณะแรง – ความเร็วรอบของมอเตอร์จากการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็ว โดยรายละเอียดของการทดสอบทั้งหมดสามารถแจกแจงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 ไดอะแกรมการต่อวงจรสำหรับทดสอบมอเตอร์

4.2.1 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration Test)

การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วเป็นการทดสอบโดยอ้างอิงตาม IEEE standard 114-2001 ในการทดสอบจะทำการต่อมอเตอร์โดยป้อนแรงดัน 1 เฟสเท่ากับ 220 โวลท์ จากนั้นทำการสตาร์ทมอเตอร์จากสภาวะเริ่มต้นที่แตกต่างกันคือ สภาวะที่โรเตอร์หยุดนิ่งและสภาวะที่โรเตอร์หมุนกลับทิศ ด้วยวิธีสตาร์ทตรง (direct-on-line starting) ในการทดสอบแต่ละครั้งจะทำการเปลี่ยนขนาดของล้อช่วยแรงให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่าง ๆ กัน เพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่อผลการทดลอง โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงมีขนาดดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ในการทดสอบนั้นจะทำการบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้า , กระแสไฟฟ้า , ความเร็วรอบ และเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัว ที่ความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed)

4.2.2 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation Test)

การทดสอบหน่วงความเร็วเป็นการทดสอบโดยอ้างอิงตาม IEC standard 34-2 การทดสอบกระทำโดยการเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำ จนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นทำการปลดแหล่งจ่ายออกแล้วทำการบันทึกความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์อยู่ในย่าน 100%-95% ของพิกัดความเร็วรอบ ภายหลังจากได้ข้อมูลของความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลง ให้นำข้อมูลดังกล่าวมาทำการหาแนวโน้มของข้อมูล โดยในการทดสอบจะทำการทดสอบโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยที่ทราบค่า และทำการทดสอบอย่างน้อย 2 ครั้งโดยแต่ละครั้งต้องเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ต่างกัน จากนั้นนำข้อมูลแนวโน้มดังกล่าวมาทำการคำนวณแก้สมการ 2 ตัวแปรตามสมการที่ 3.5 และ 3.6 เพื่อทำการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด

4.2.3 การทดสอบภาระของมอเตอร์ (Load Test)

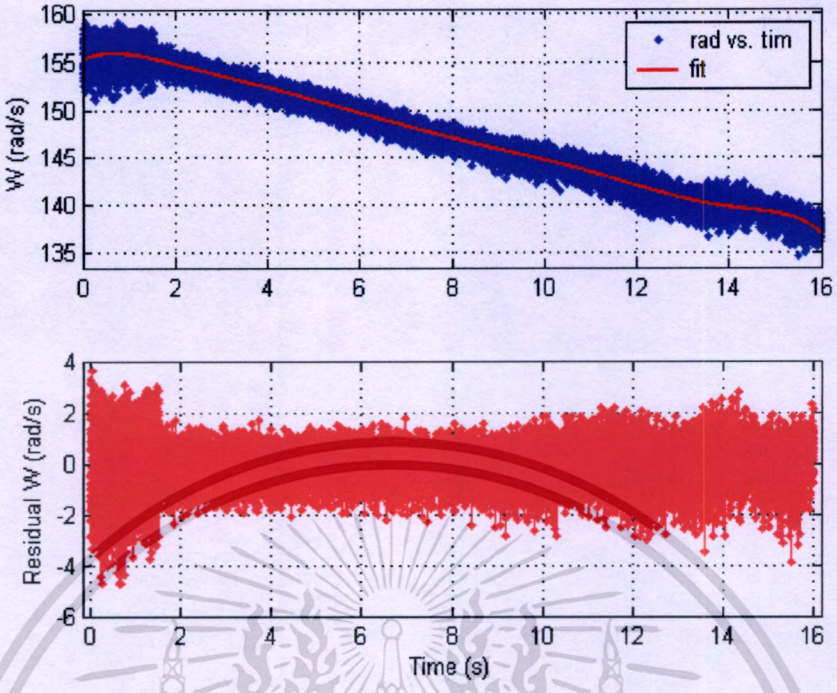
ในการทดสอบภาระของมอเตอร์ ทำการทดสอบโดยการคลัปปลิ้งมอเตอร์เข้ากับเครื่องวัดแรงบิดและDC Generator จากนั้นก็ค่อย ๆ เพิ่มแรงดันทีละขนาดให้กับทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ และ DC Generator จนถึงค่าพิกัดกระแสของมอเตอร์แต่ละตัว เพื่อจ่ายไฟให้กับภาระทางไฟฟ้าแล้วทำการบันทึกผลด้วย Digital power meter ดังแสดงในรูปที่ 4.5

4.3 ผลการทดสอบ

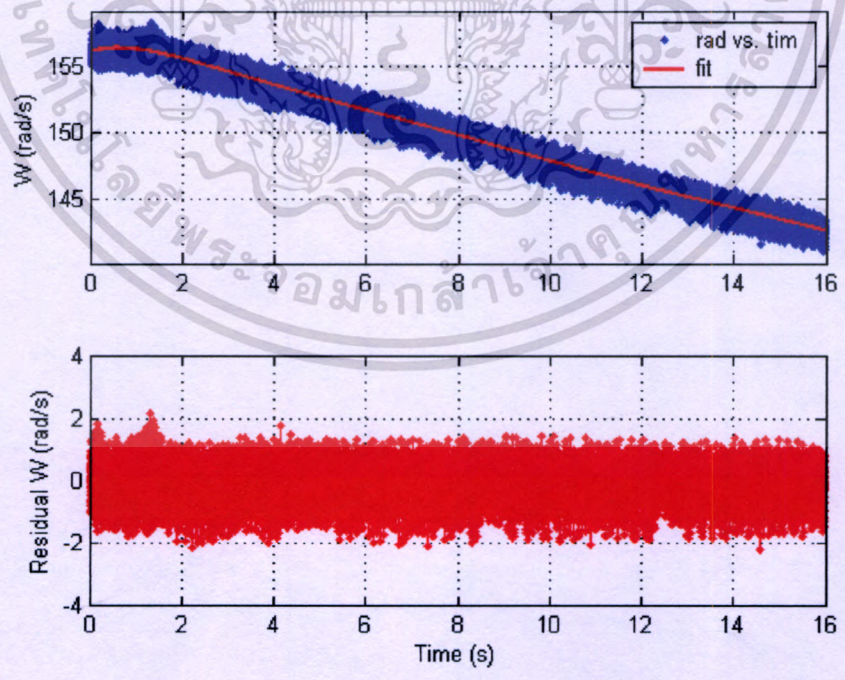
4.3.1 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation Test)

ผลการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว จะได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของมอเตอร์แต่ละตัวโดยต้องทดสอบมอเตอร์ที่ละตัวและตัวละสองครั้งโดยใช้ค่าของล้อช่วยแรงที่มีขนาดต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

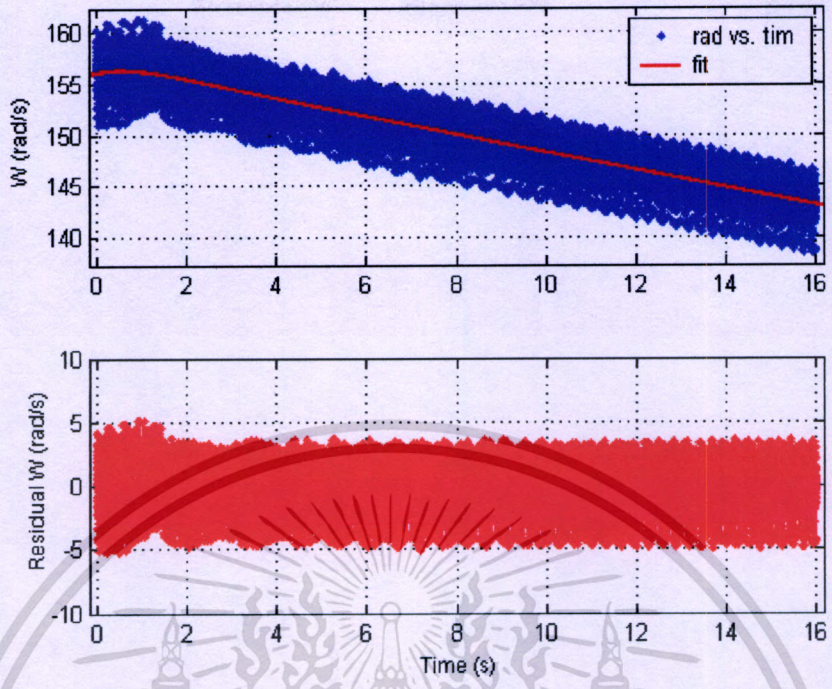


รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2

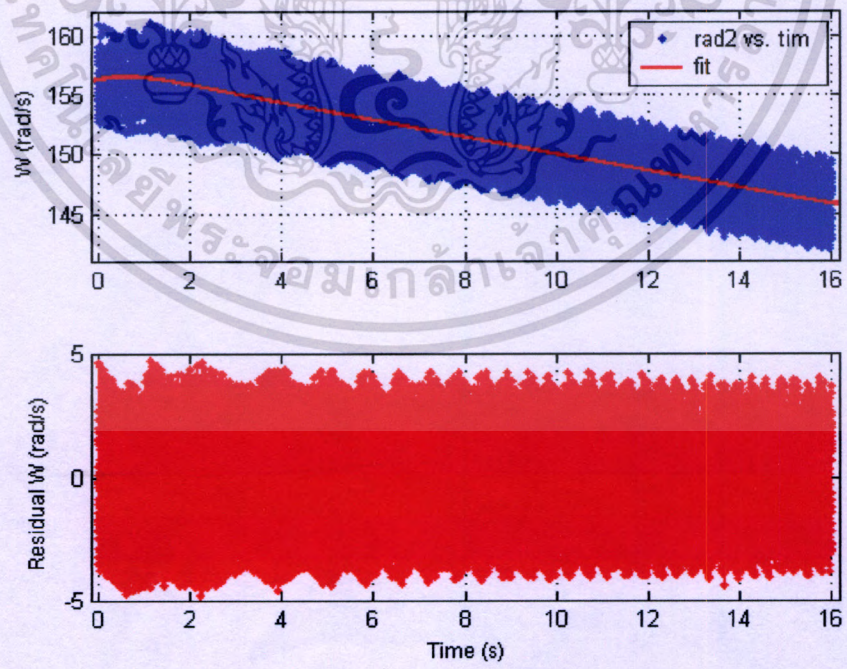


รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

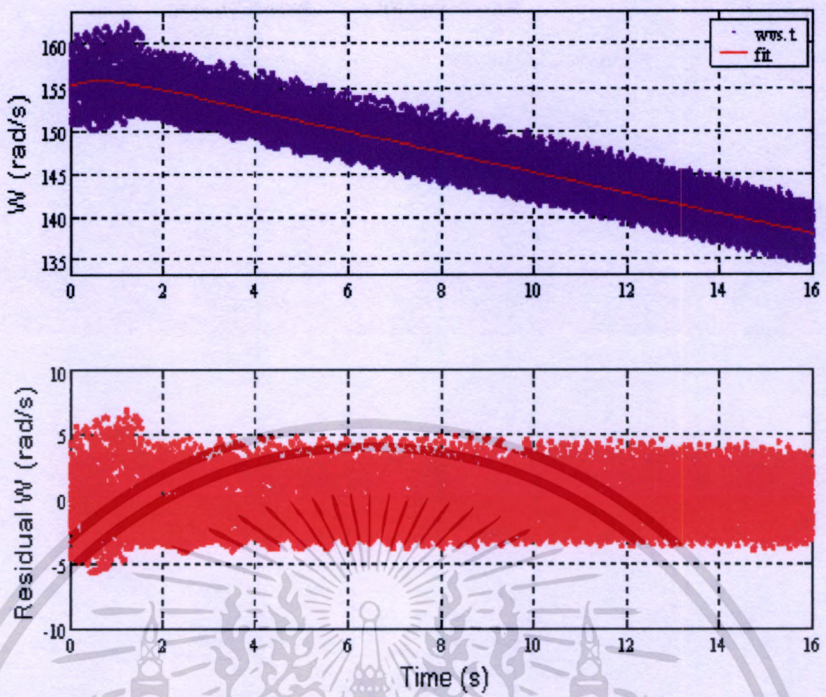


รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2

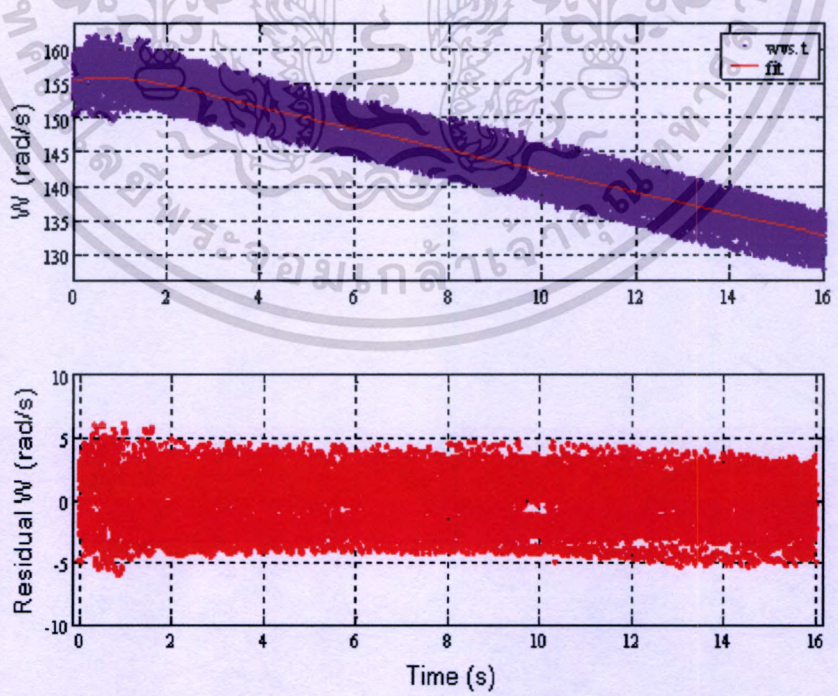


รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

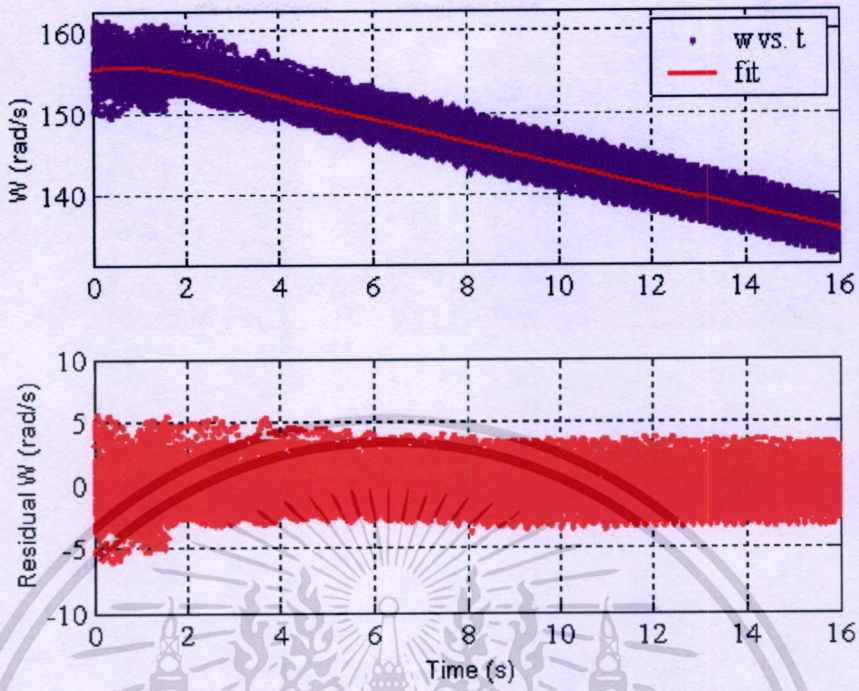


รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2

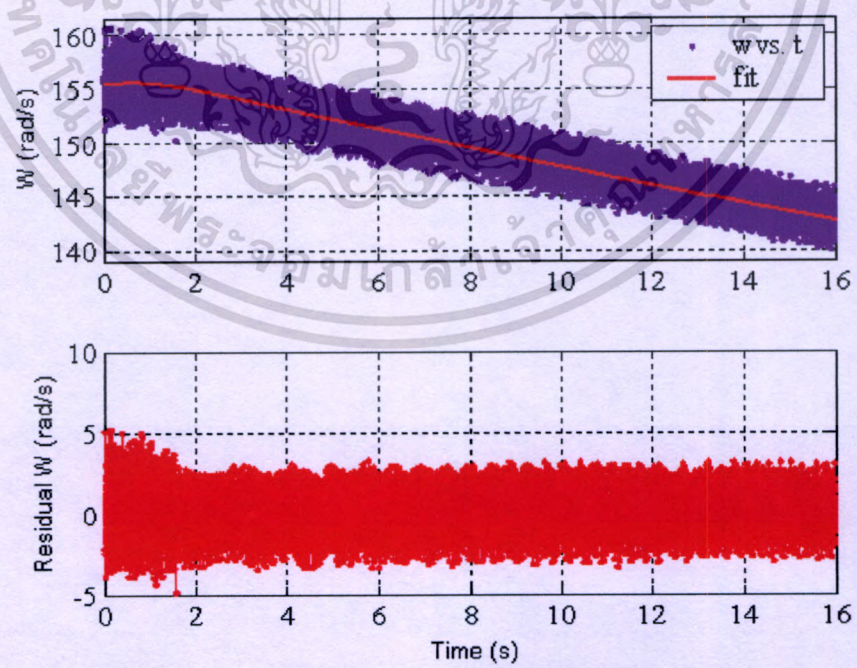


รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้นไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.16 เป็นการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) ซึ่งแต่ละรูปแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วรอบลง โดยเส้นสีแดงในแต่ละรูปเป็นเส้นแนวโน้มการลดความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้วิธี polynomial regression โดยพล็อตร่วมกับข้อมูลจริง ส่วนรูปล่างจะเป็นค่า error ที่ได้จากผลต่างระหว่างข้อมูลจริงกับค่าที่ได้จากสมการแนวโน้ม ซึ่งการพิจารณาความเหมาะสมของเส้นแนวโน้มสามารถพิจารณาจากความสมมาตรของข้อมูล error ได้ภายหลังได้เส้นแนวโน้มของแต่ละการทดสอบแล้วเมื่อนำมาทำการคำนวณตามสมการที่ 3.5 และ 3.6 จะได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ (J_m) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า

ชนิดของมอเตอร์	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ ($kg-m^2$)	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด (N-m / (rad/s))
Split Phase	0.004872	0.000217
Capacitor Start	0.005638	0.000283

ตารางที่ 4.6 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า

ชนิดของมอเตอร์	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ ($kg-m^2$)	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด (N-m / (rad/s))
Split Phase	0.001743	0.000381
Capacitor Start	0.001285	0.000313

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

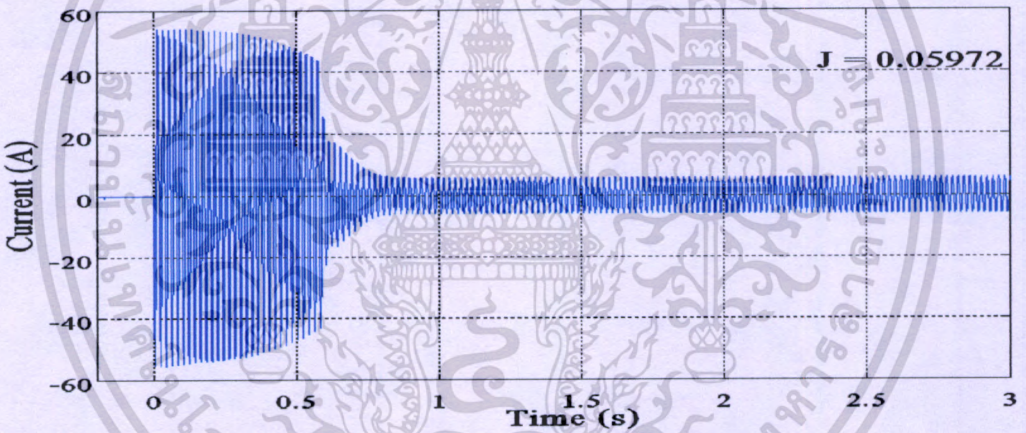
4.3.2 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration Test)

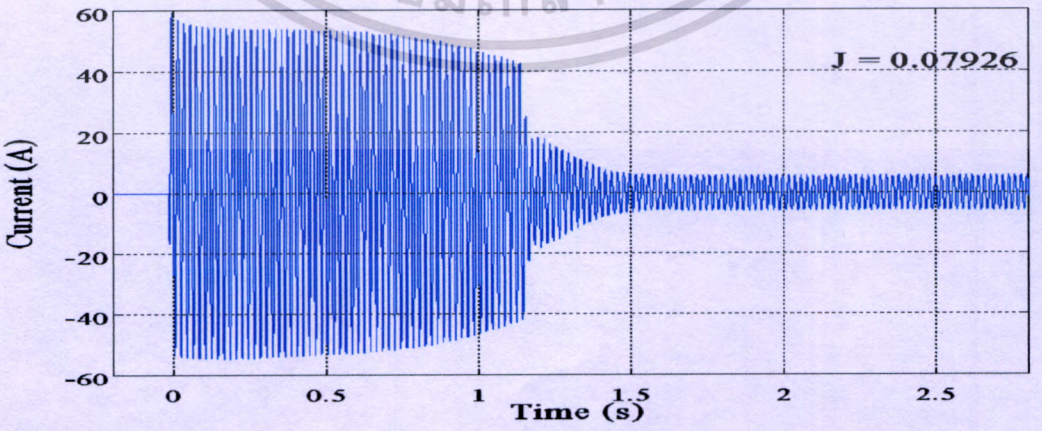
การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วทำเพื่อทดสอบที่จะให้ได้กราฟแรงบิดและความเร็วรอบ และยังได้แสดงถึงผลของกระแสไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ เพื่อที่จะชี้ให้เห็นถึงสมรรถนะและข้อดีข้อเสียของมอเตอร์ทั้งสองชนิด

4.3.2.1 รูปคลื่นกระแสของมอเตอร์ทั้ง 2 ขนาดในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว

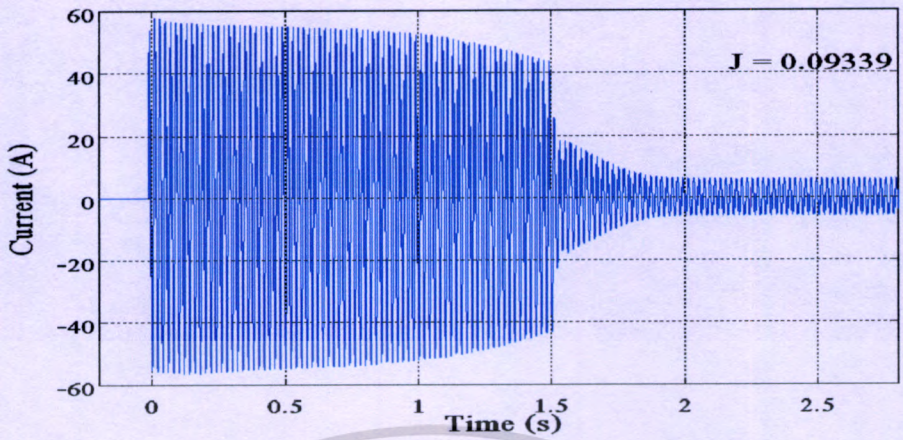
ในรูปที่ 4.17 – 4.20 จะแสดงผลของกระแสไฟฟ้ารวมเปรียบเทียบกับเวลาเพื่อแสดงขนาดของกระแสที่มีขนาดสูงในขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุน โดยได้แสดงผลของกระแสไฟฟ้ารวมที่มีการเปลี่ยนขนาดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ

โดยที่ผลที่ได้สามารถแสดงถึงข้อดีข้อเสียของมอเตอร์แต่และชนิด ซึ่งกระแสไฟฟ้าของ Split Phase Motor จะมีขนาดสูงมีช่วงเวลาที่ใช้ยาวนานกว่า Capacitor Start Motor

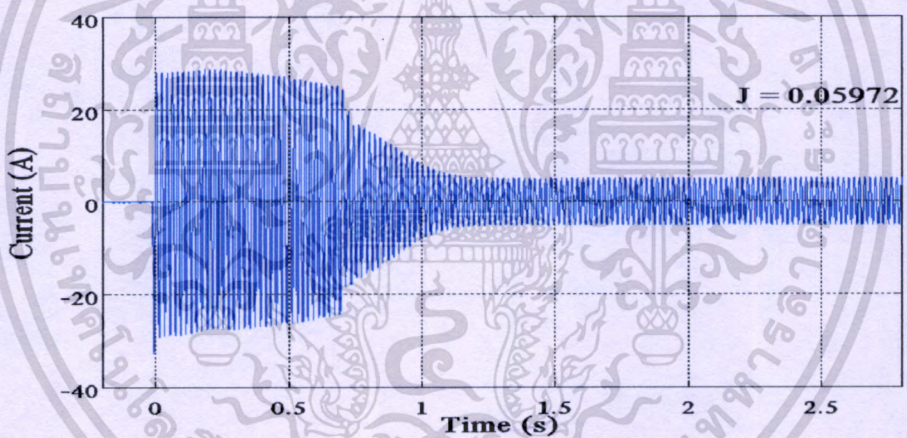


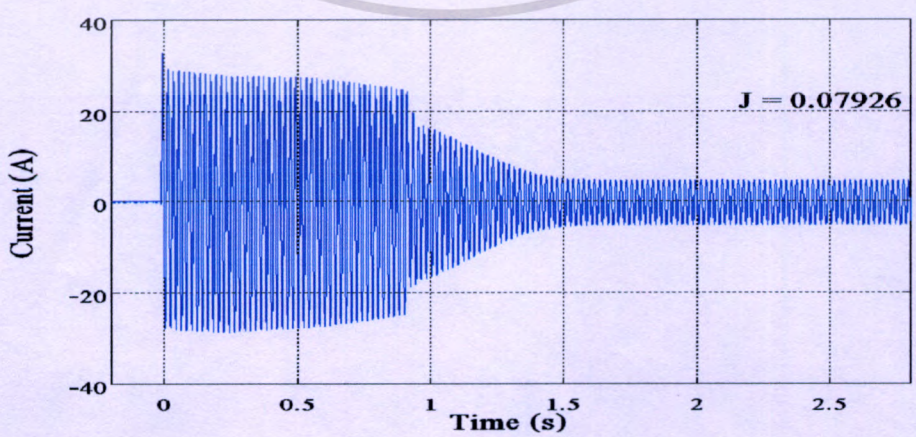


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

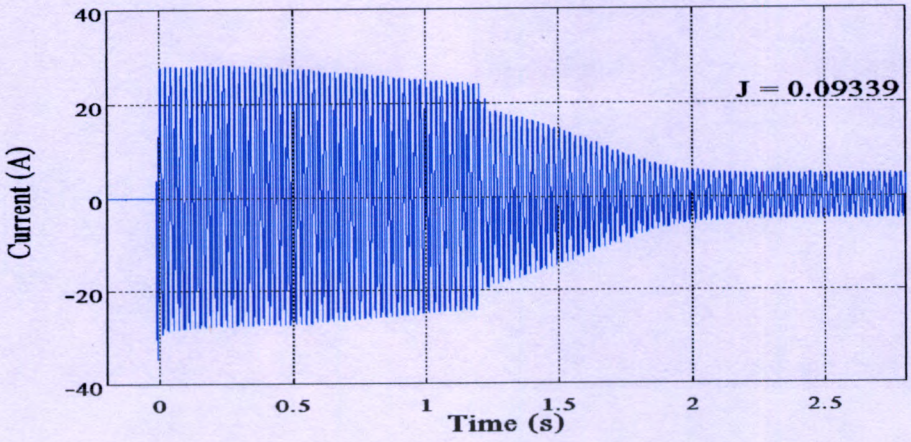


รูปที่ 4.17 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน

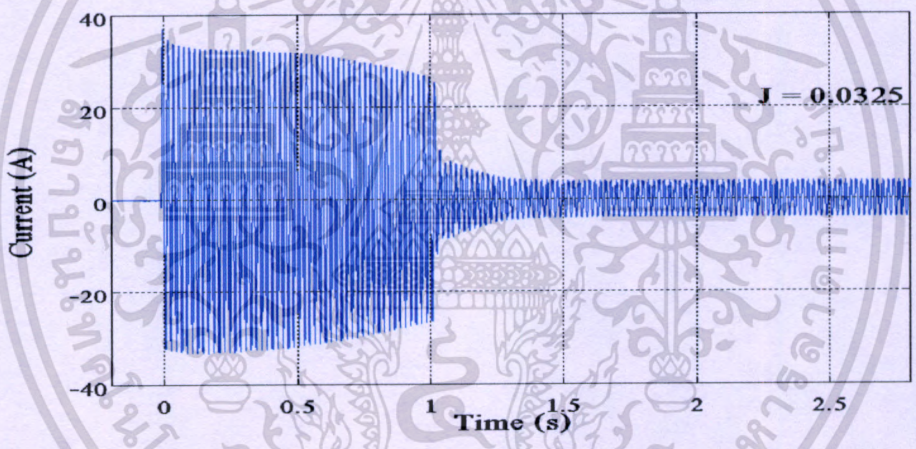


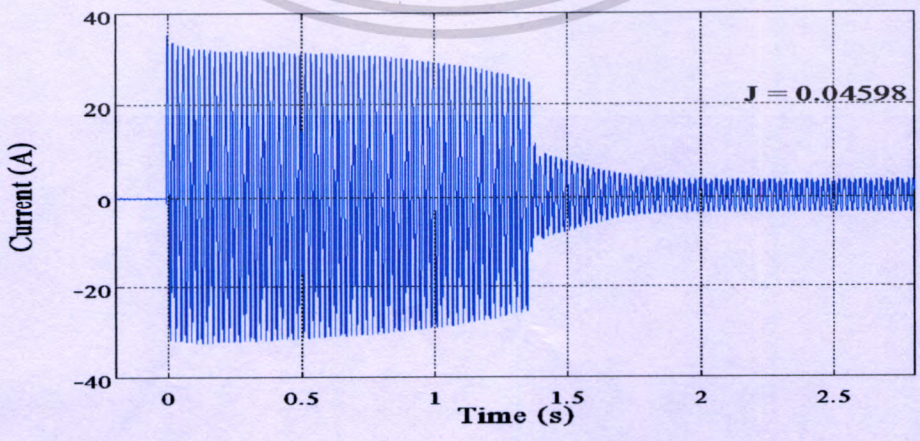


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

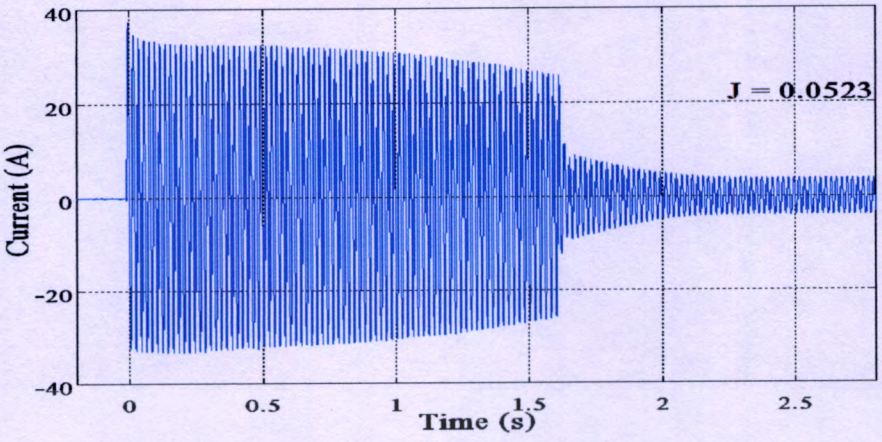


รูปที่ 4.18 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อที่การทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน

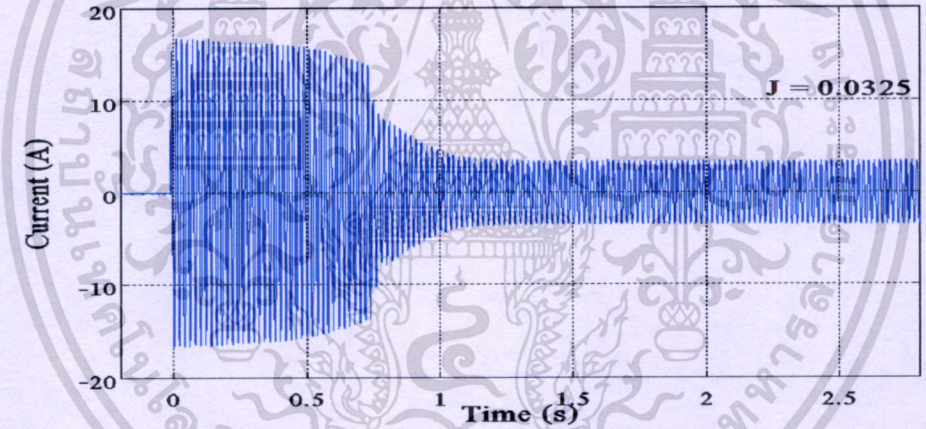


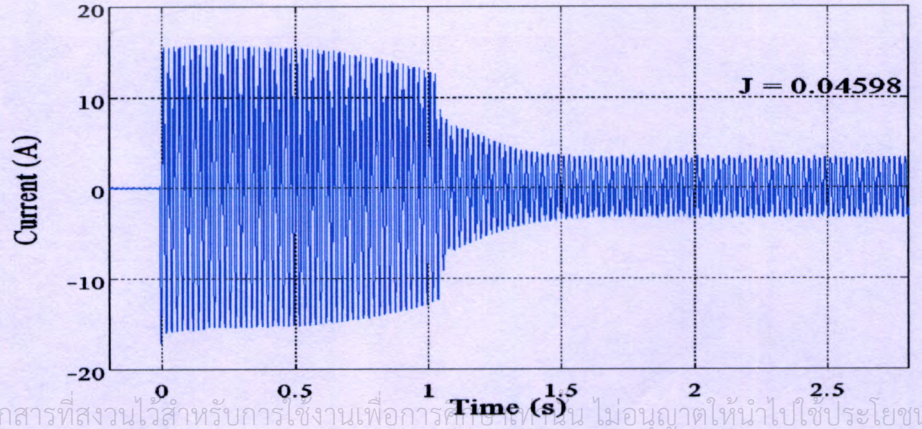


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

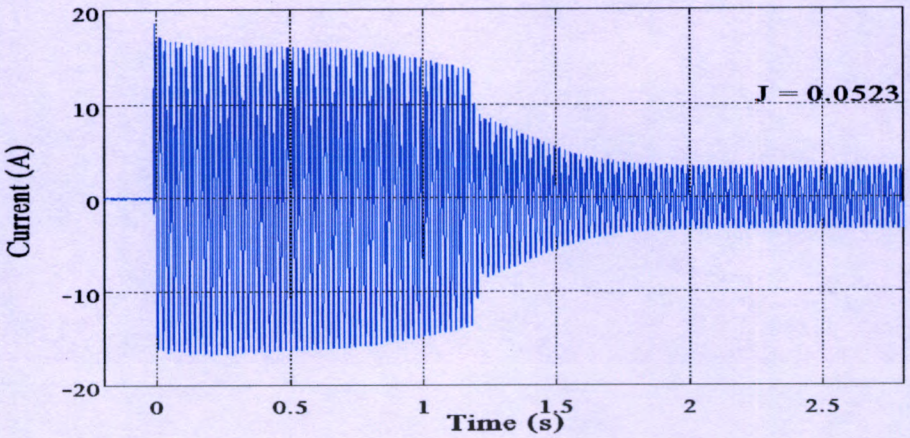


รูปที่ 4.19 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน





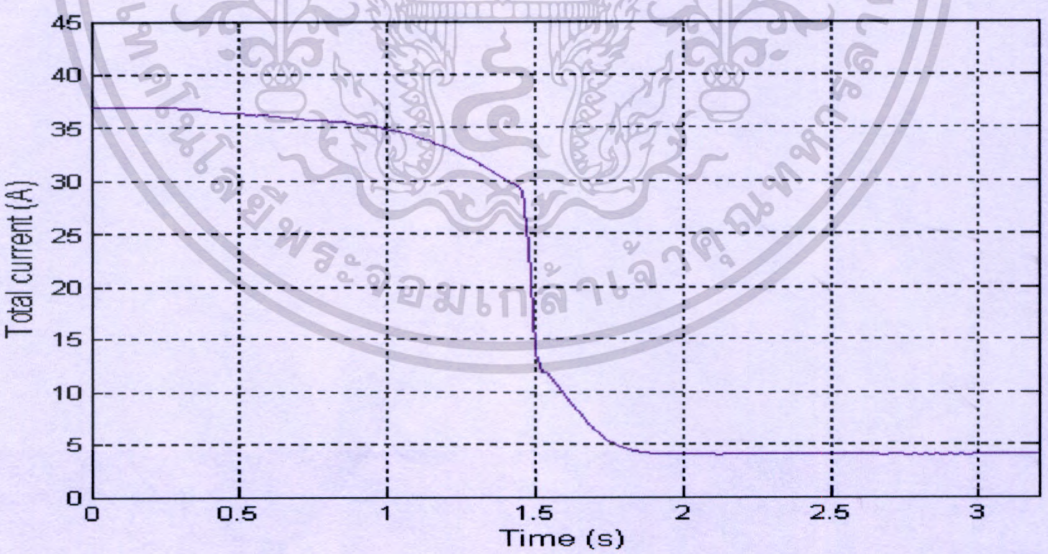
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน

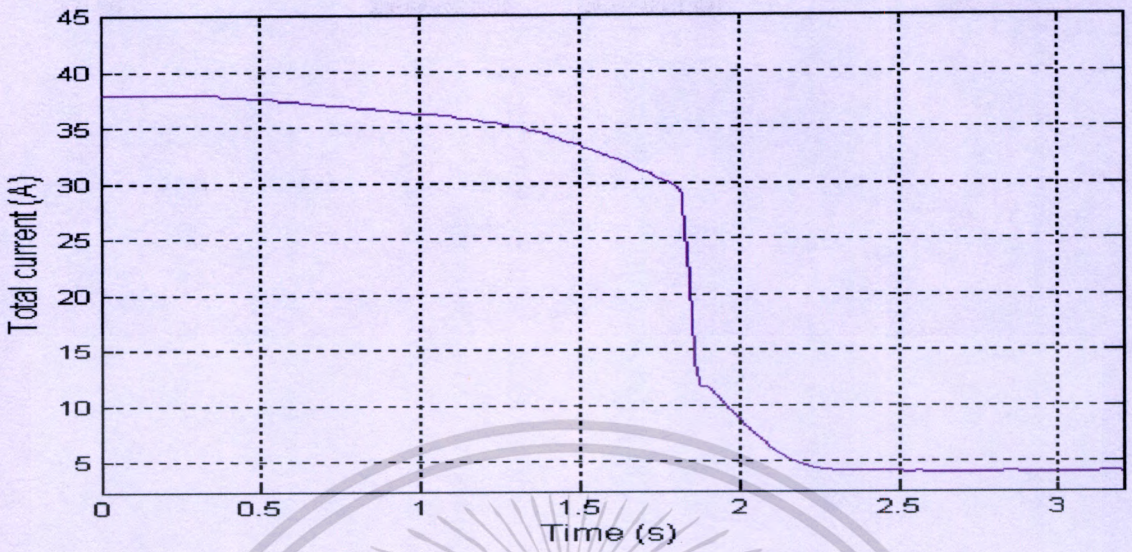
4.3.2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า rms ของกระแสไฟฟ้า และ เวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว

รูปที่ 4.21 – รูปที่ 4.32 แสดงค่ากระแสไฟฟ้ารวม rms เปรียบเทียบกับเวลาของมอเตอร์ทั้งสองชนิดโดยเปลี่ยนค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ

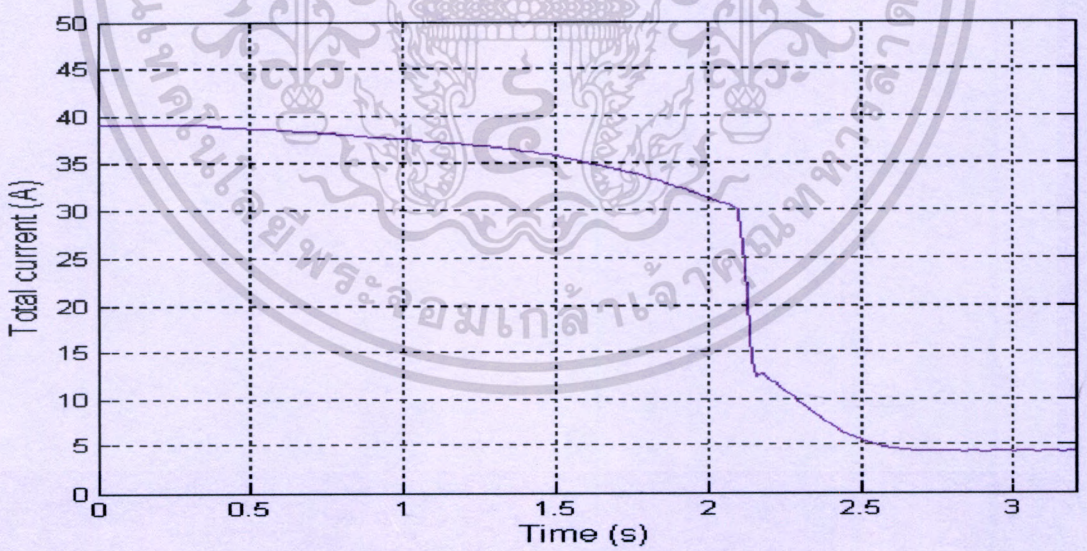


รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05973 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



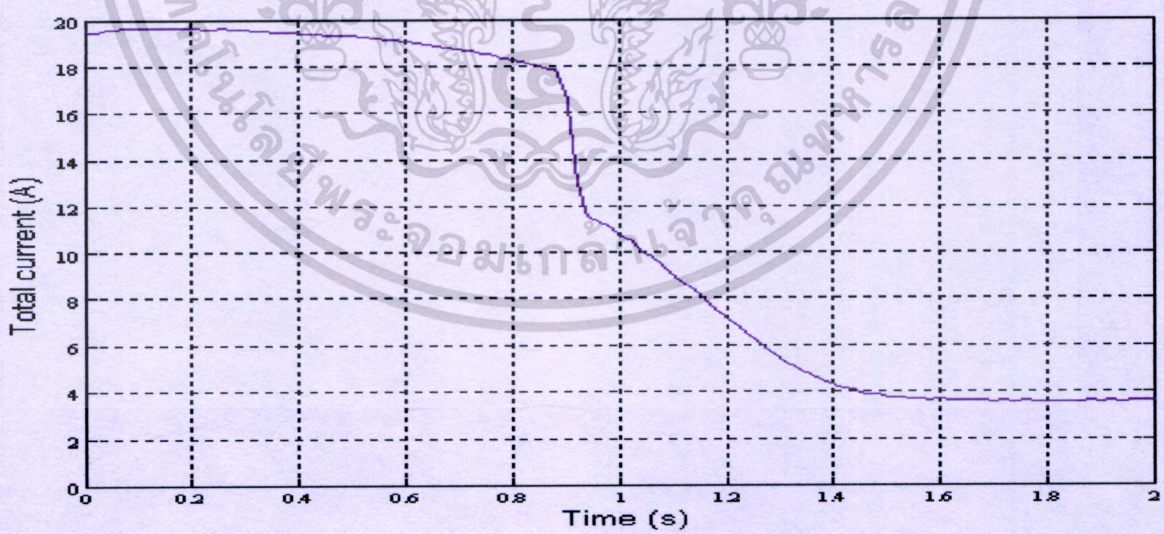
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2

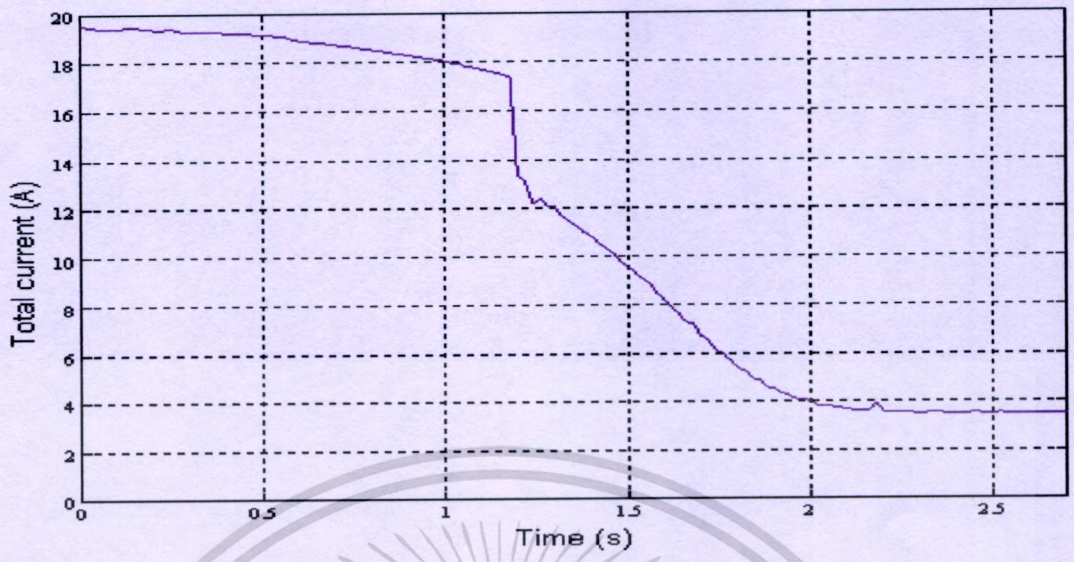
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05973 kg-m^2

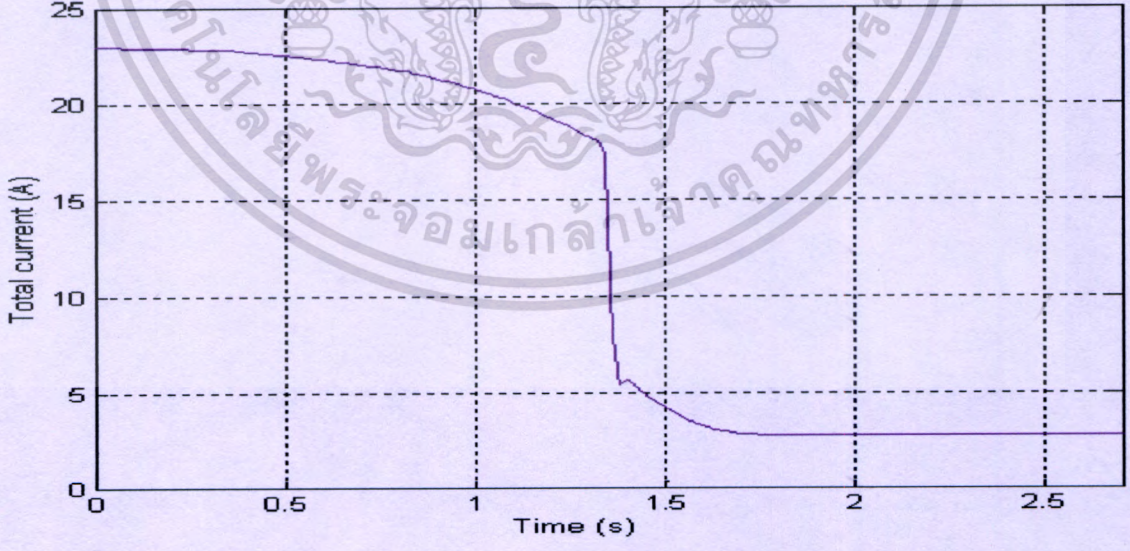


รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2

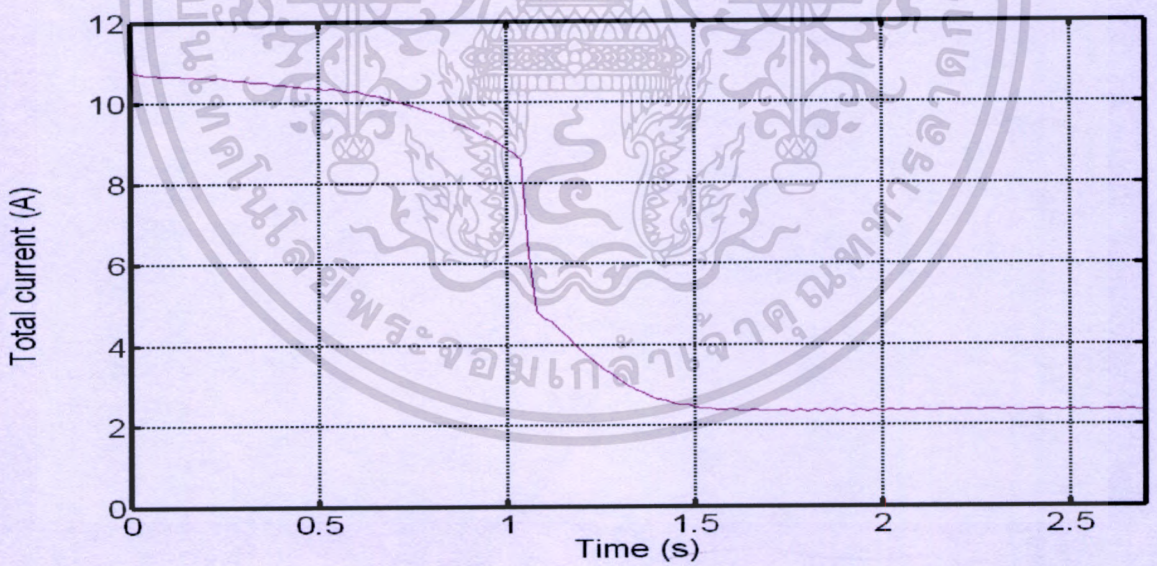
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.04598 kg-m^2

รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2

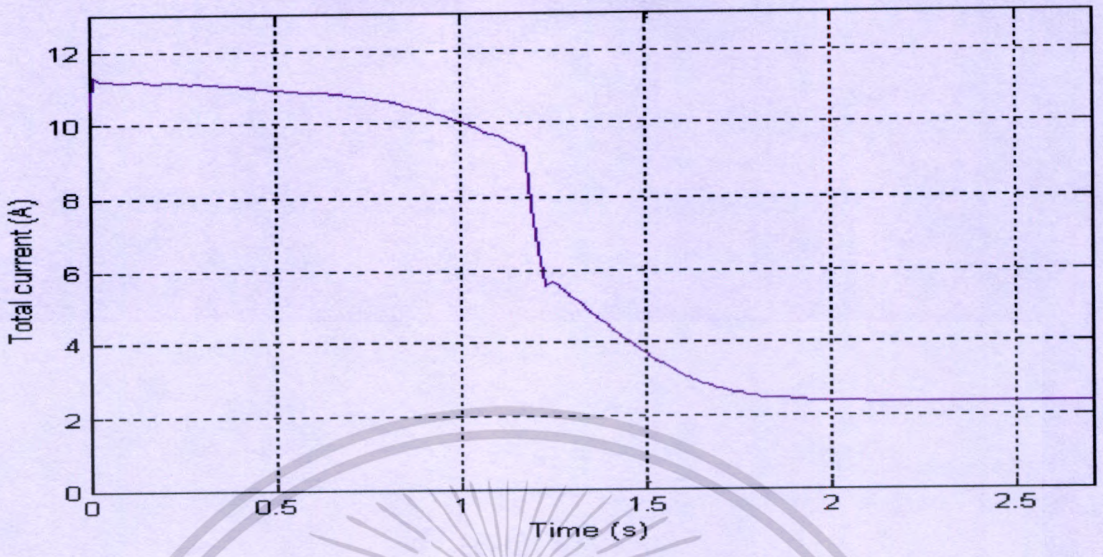
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.04598 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2

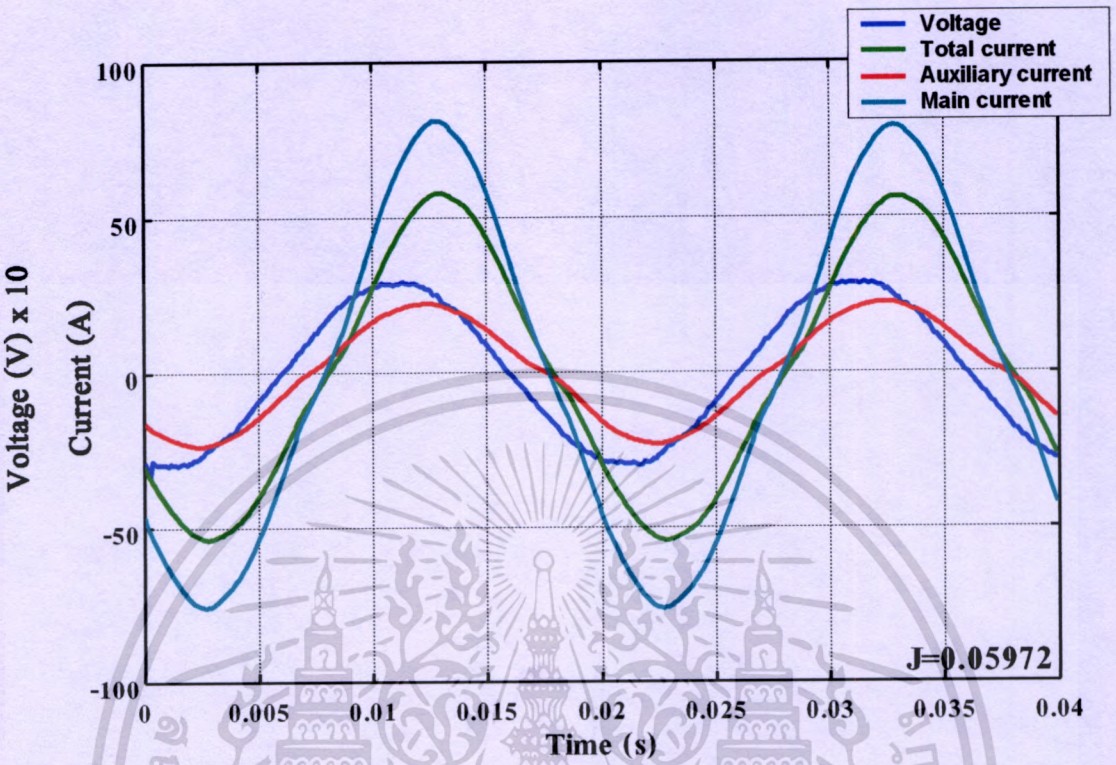
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.20 เป็นการนำเสนอรูปคลื่นของกระแสของมอเตอร์ทั้ง 2 ขนาดในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว โดยกราฟแต่ละรูปเป็นการทดสอบกับล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่าง ๆ กัน

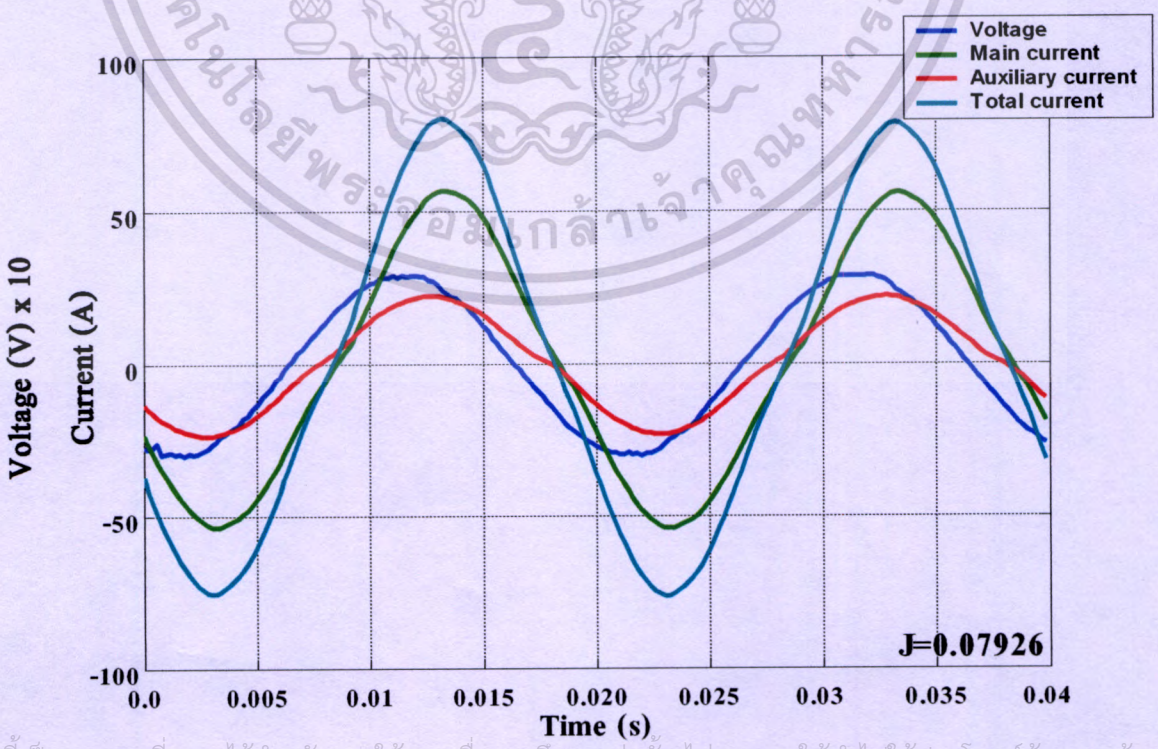
ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.32 เป็นการนำเสนอผลการคำนวณหาค่า rms ของคลื่นกระแสในรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.20

4.3.2.3 การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส

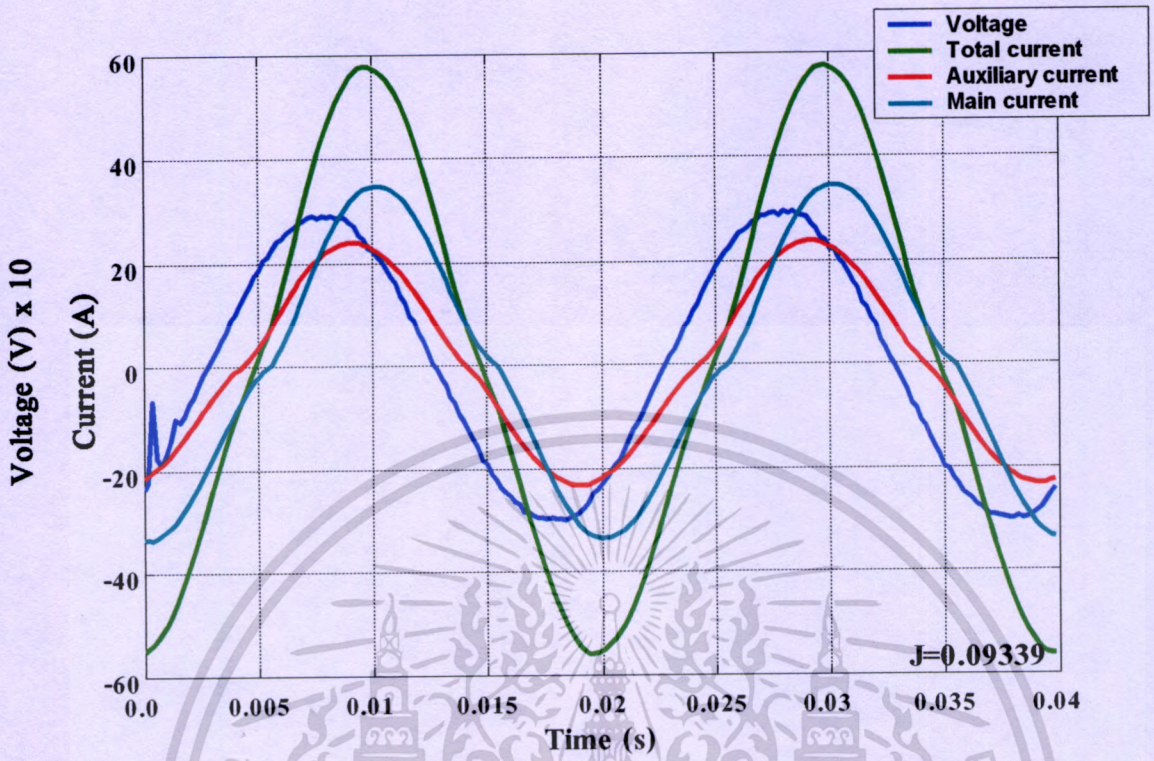
ในส่วนของการวิเคราะห์จะทำการพล็อตรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าของขดลวดหลัก, กระแสไฟฟ้าของขดลวดช่วย และส่วนของกระแสไฟฟ้ารวมของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะวิเคราะห์ในช่วงที่กระแสไฟฟ้าขดลวดช่วยทำงาน ณ จุดก่อนและหลังถูกตัดออกจากวงจรด้วยสวิตช์แรงเหวี่ยง และนำเสนอผลของการวิเคราะห์ด้วยสัญญาณของรูปกราฟแต่ละรูป ซึ่งแสดงผลดังแสดงตามรูปที่ 4.33 ถึงรูปที่ 4.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

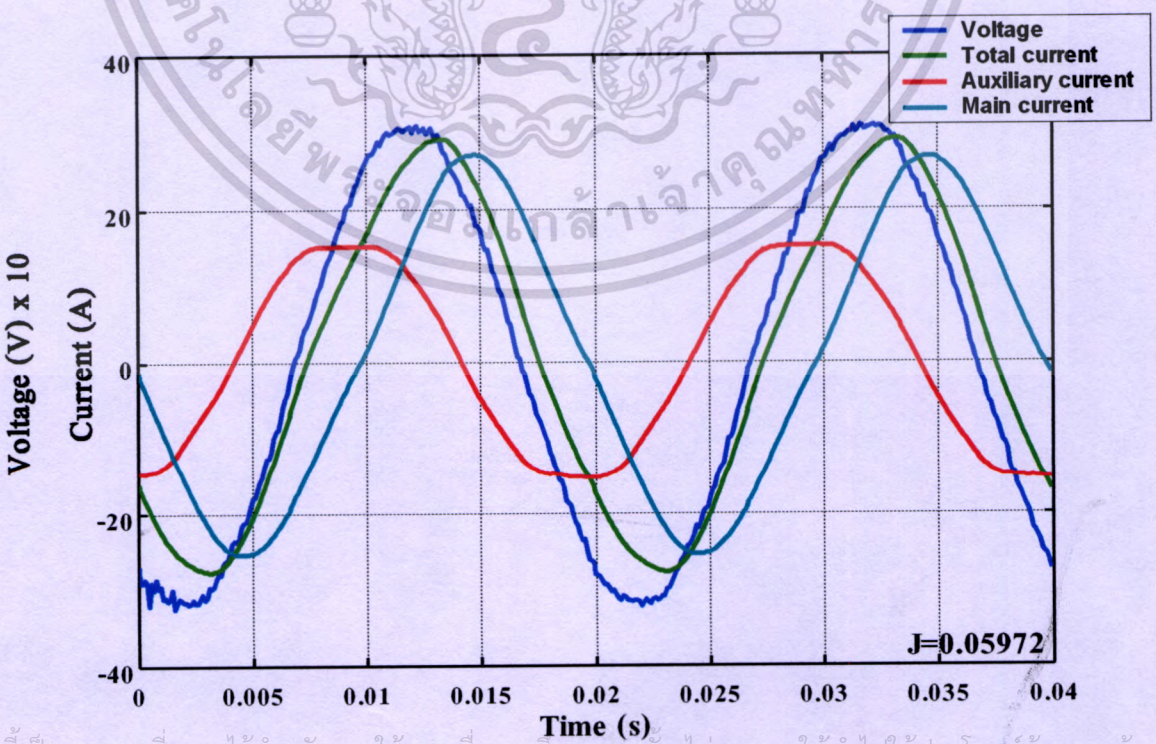




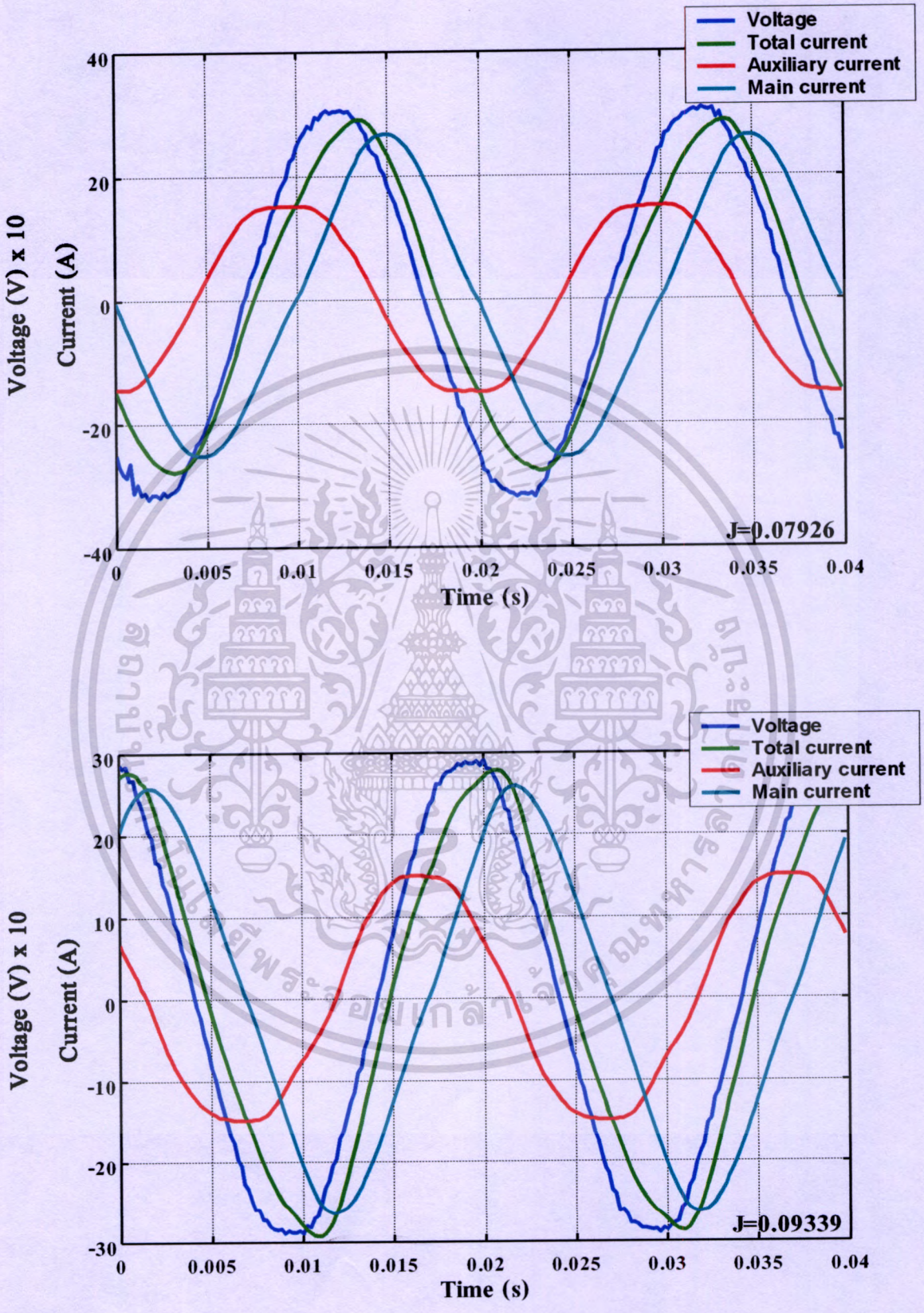
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก

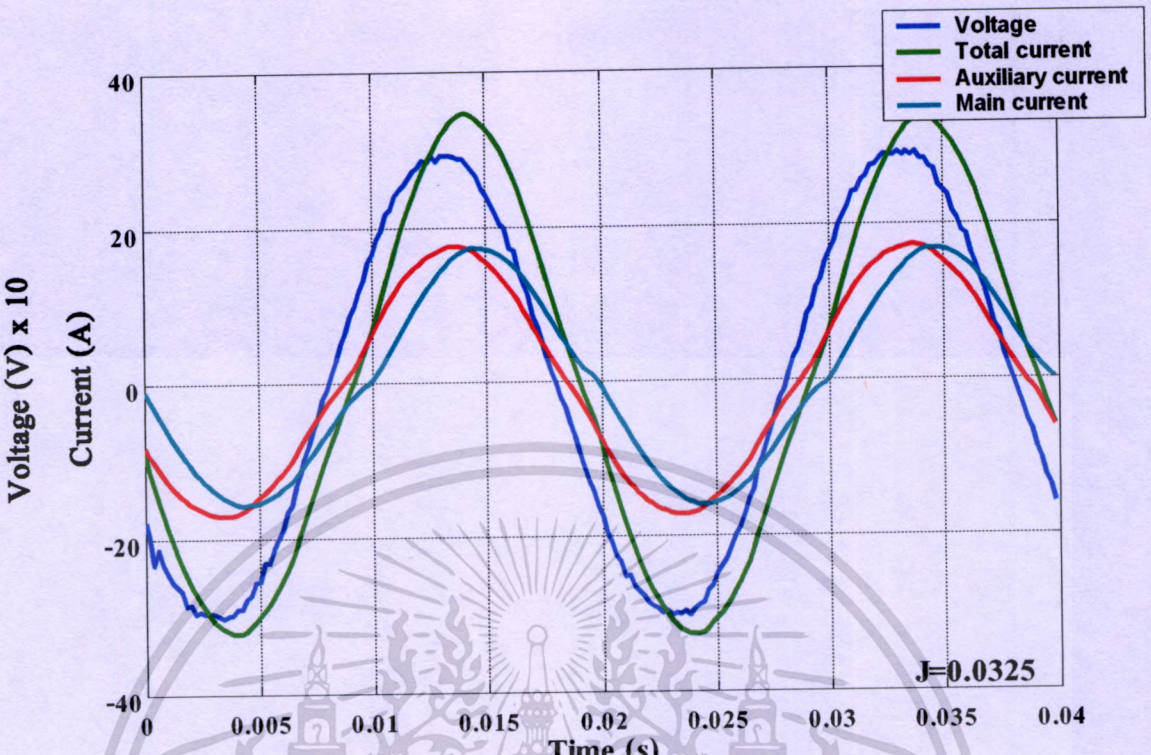


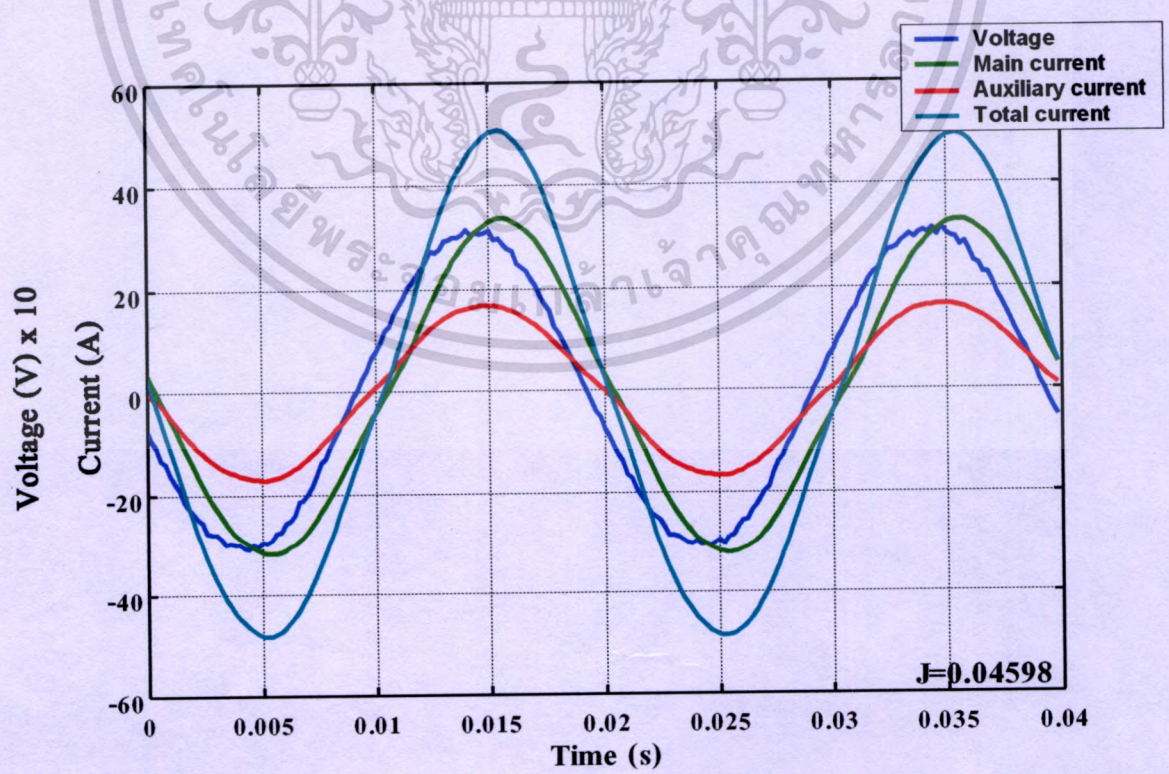
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



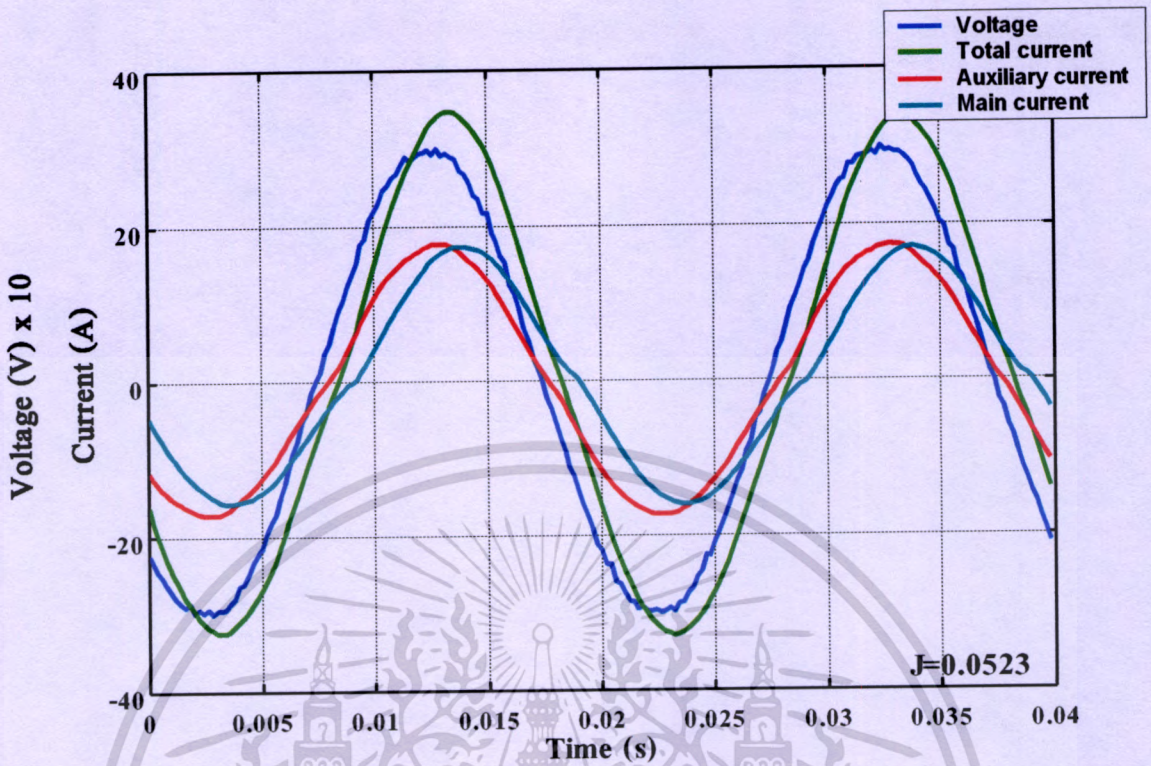
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

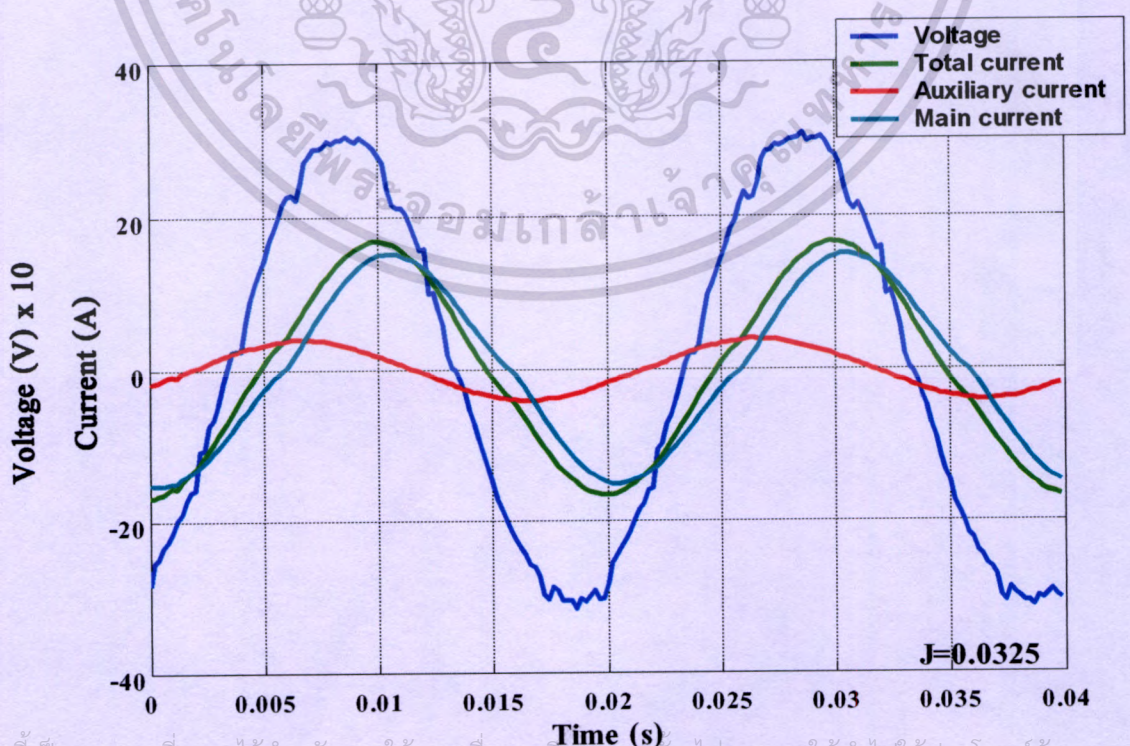




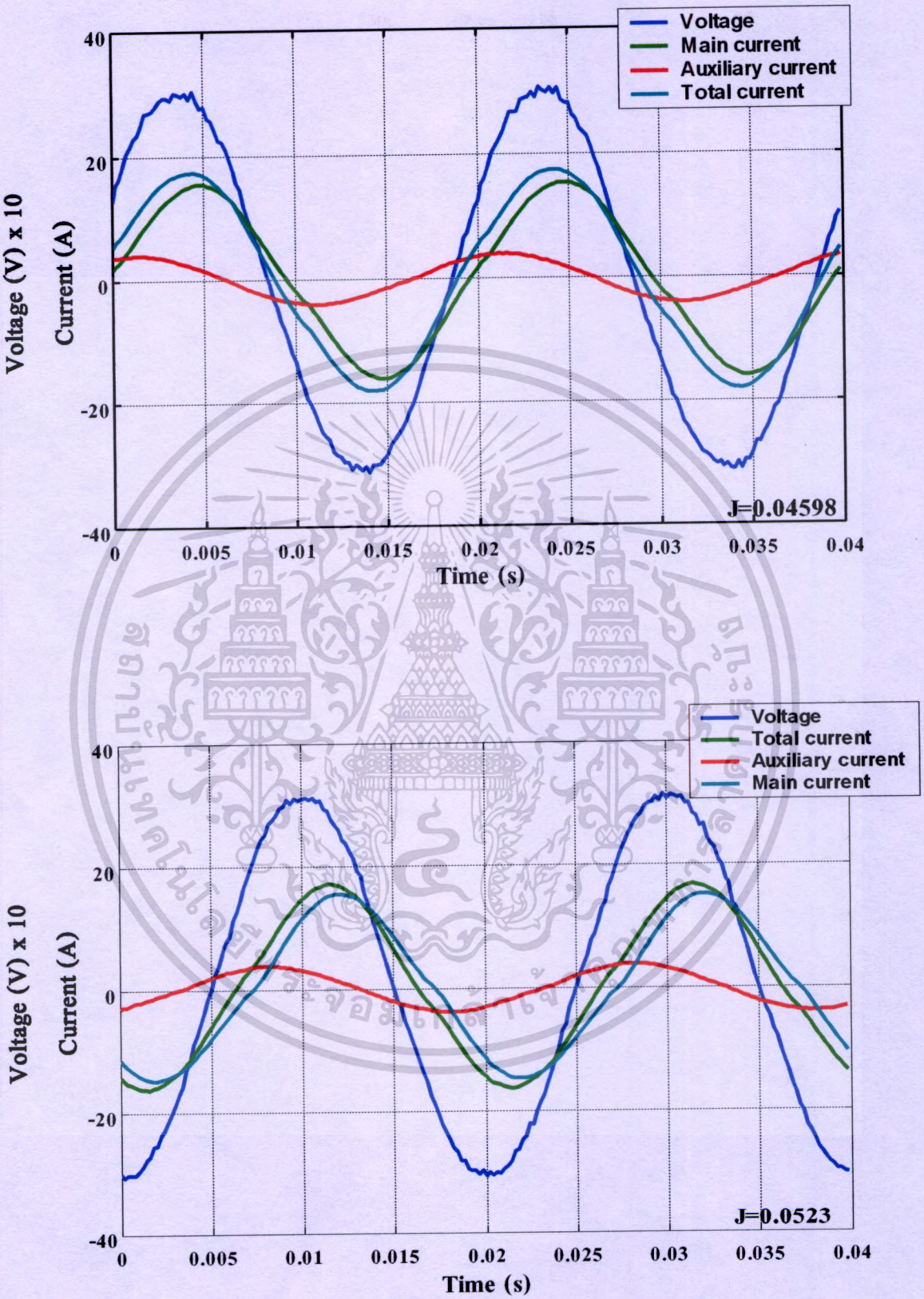
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

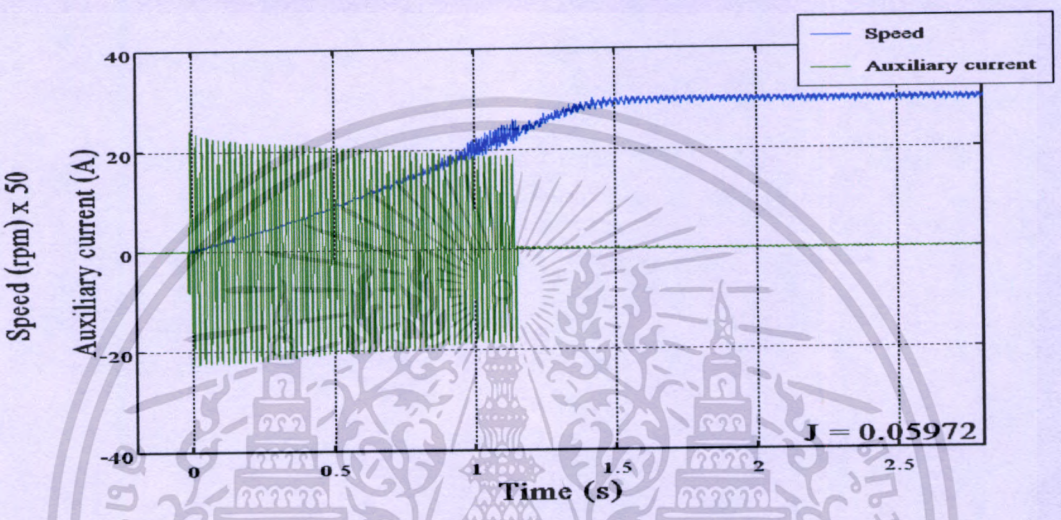


รูปที่ 4.36 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก

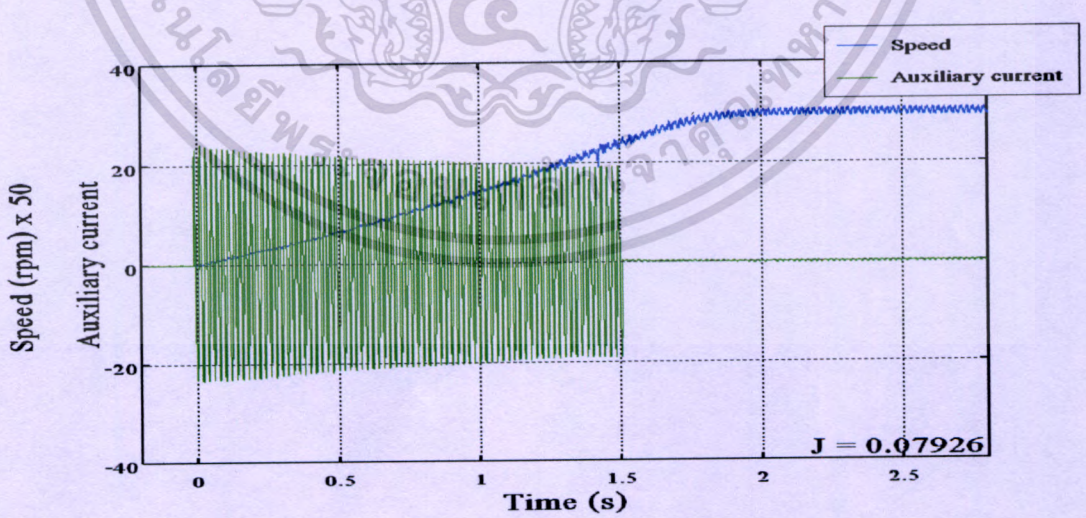
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนต่อไปจะเป็นการนำเสนอผลการทดลอง ในรูปแบบของข้อมูลของอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วพร้อมกับพล็อตกระแสไฟฟ้าของขดลวดช่วย โดยจะทำการนำเสนอผลการทดลองในรูปที่ 4.37 ถึงรูปที่ 4.48 ซึ่งการพิจารณาผลการทดลองนั้นสามารถอาศัยวิธีการเช่นเดียวกับการพิจารณาค่า rms ของกระแสไฟฟ้า

4.3.2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วพร้อมกับกราฟของกระแสขดลวดช่วย

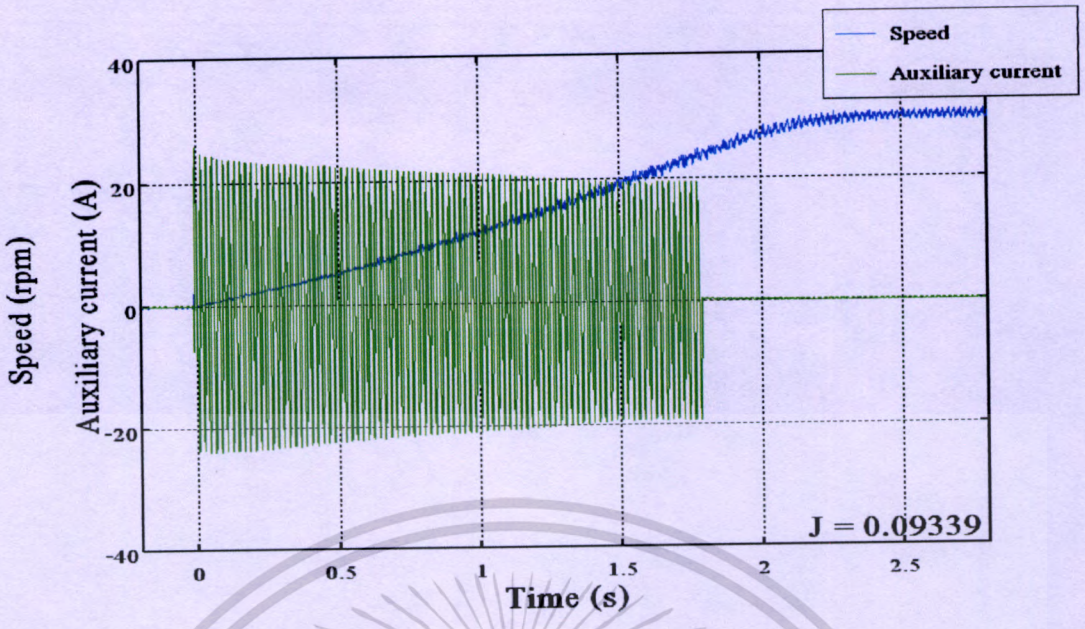


รูปที่ 4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2

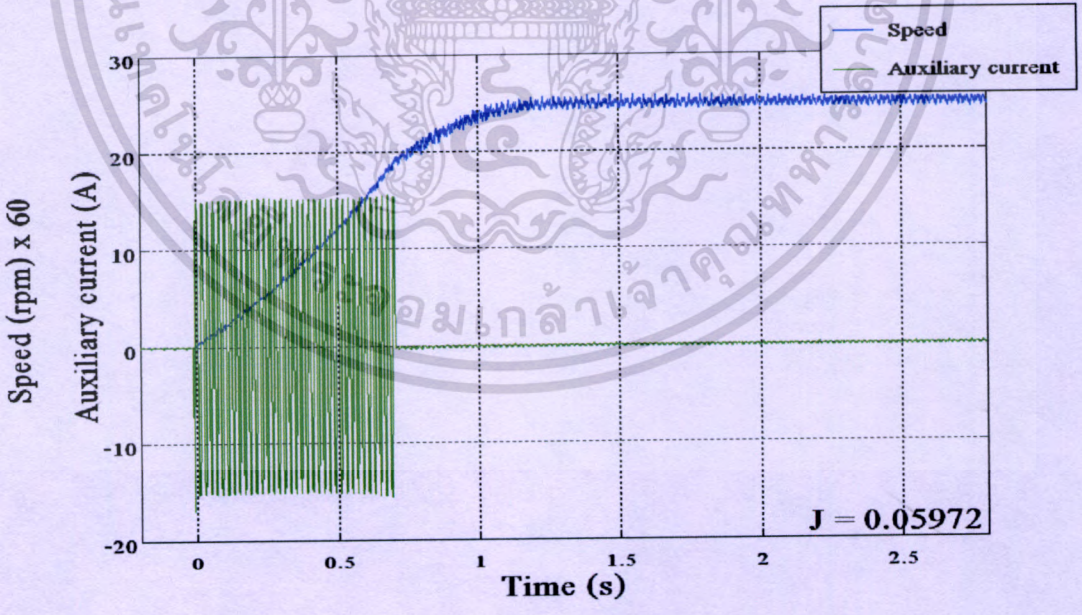


รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

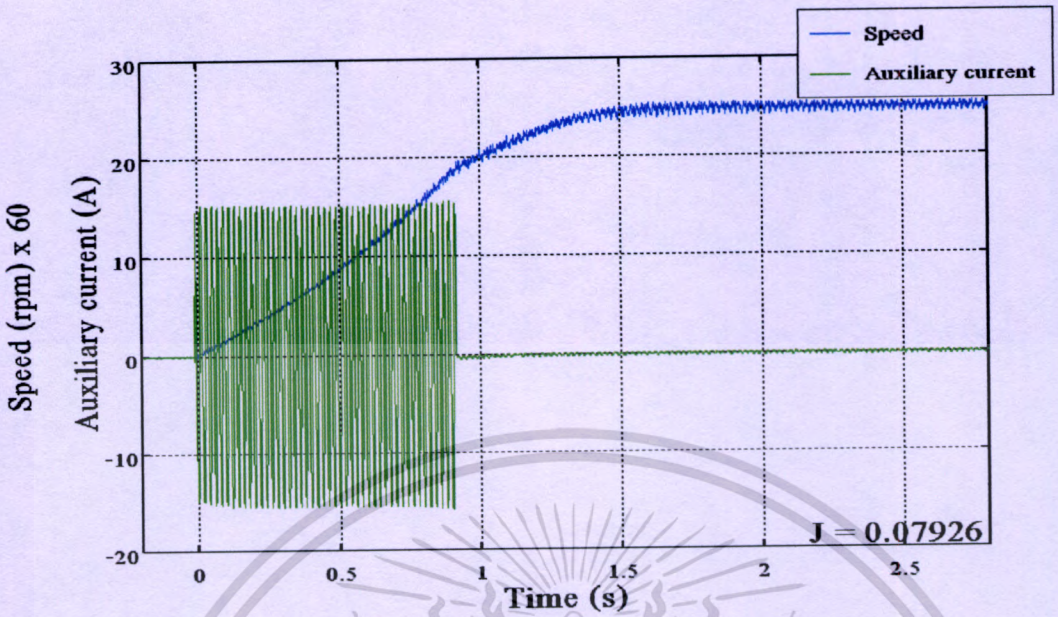


รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2

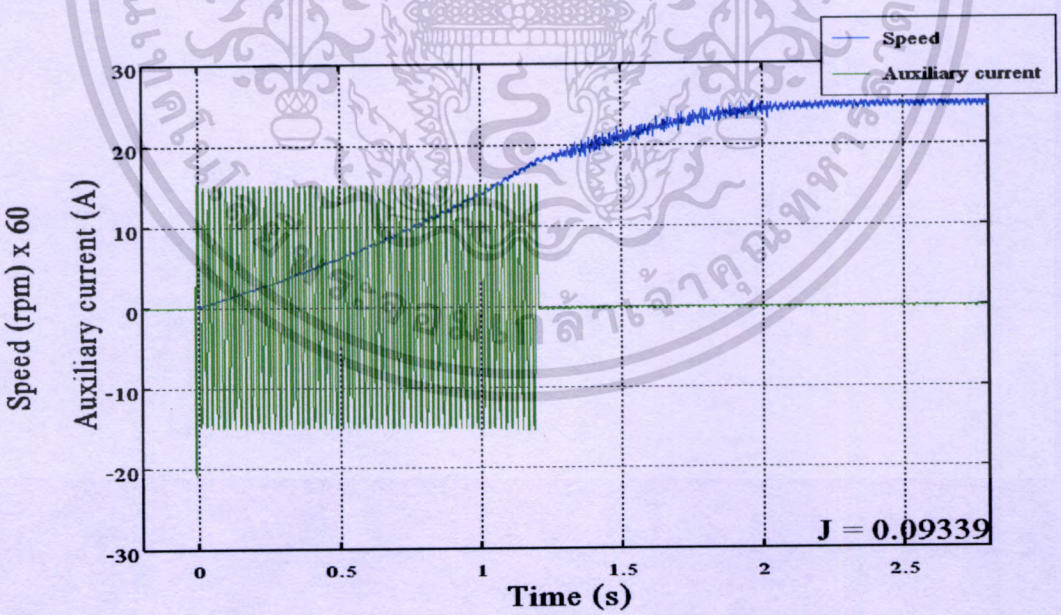


รูปที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

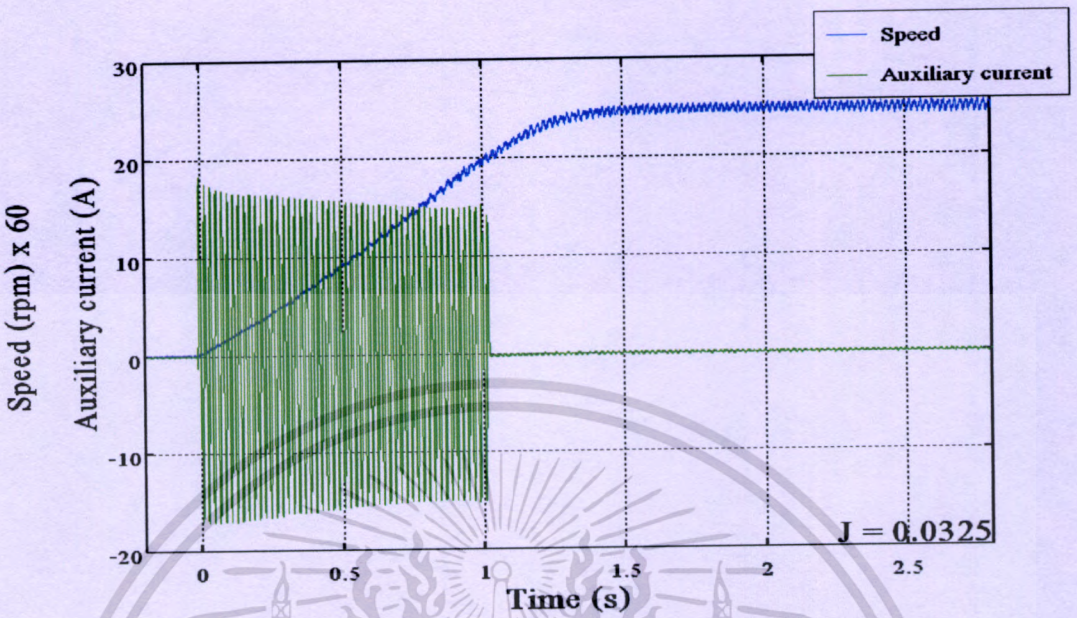


รูปที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2

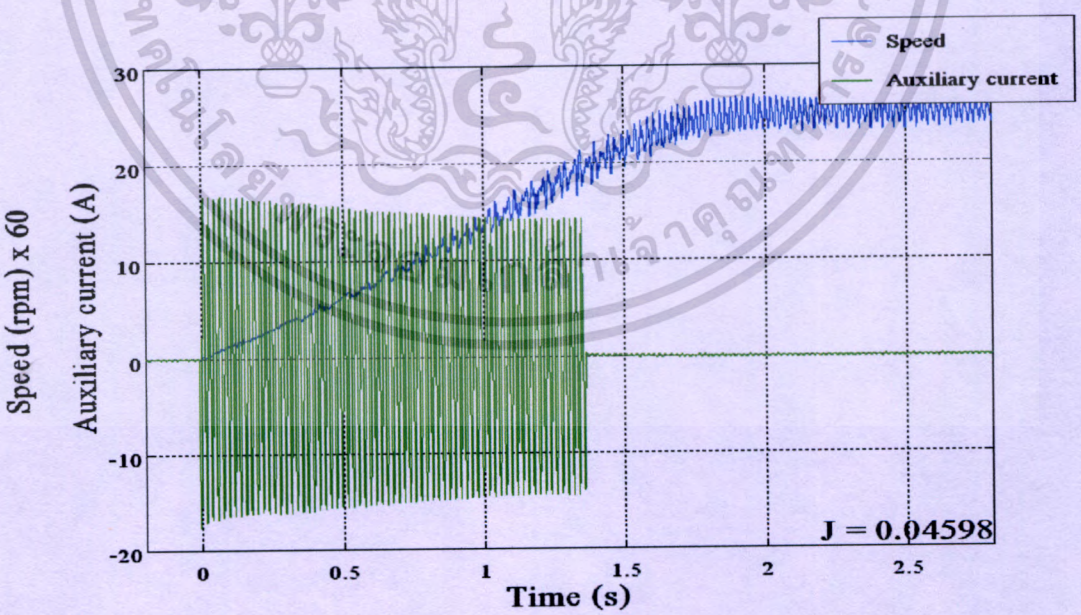


รูปที่ 4.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

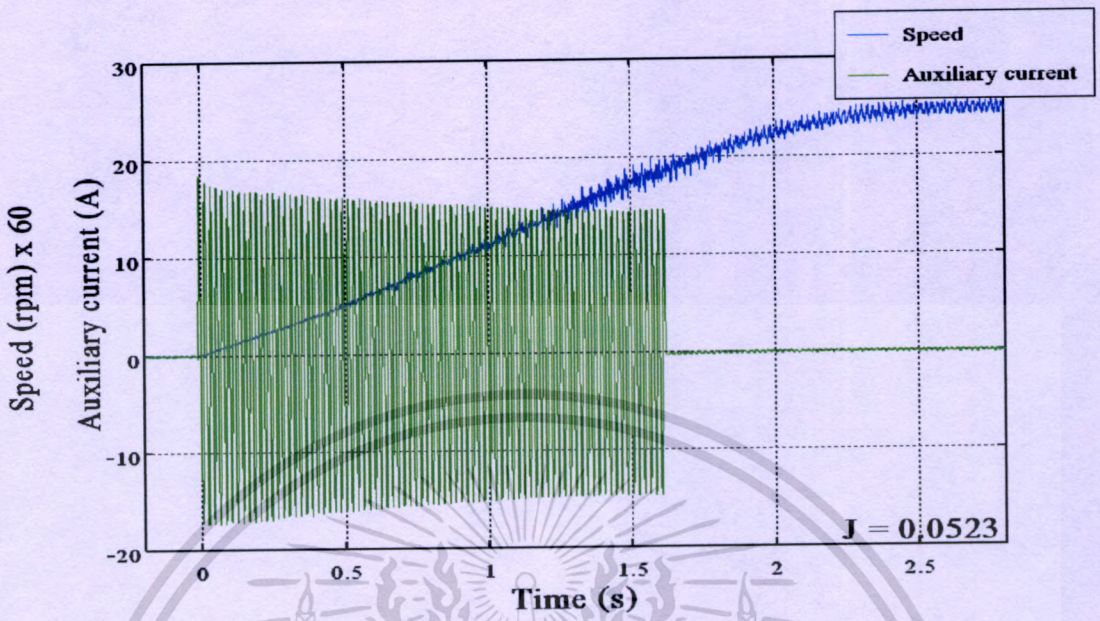


รูปที่ 4.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2

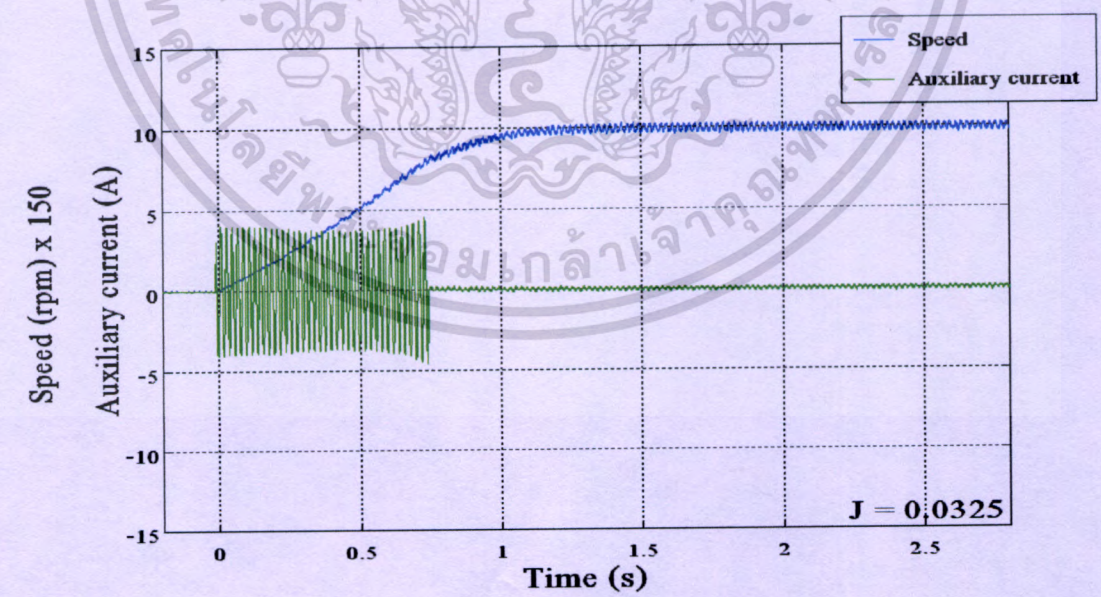


รูปที่ 4.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.04598 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

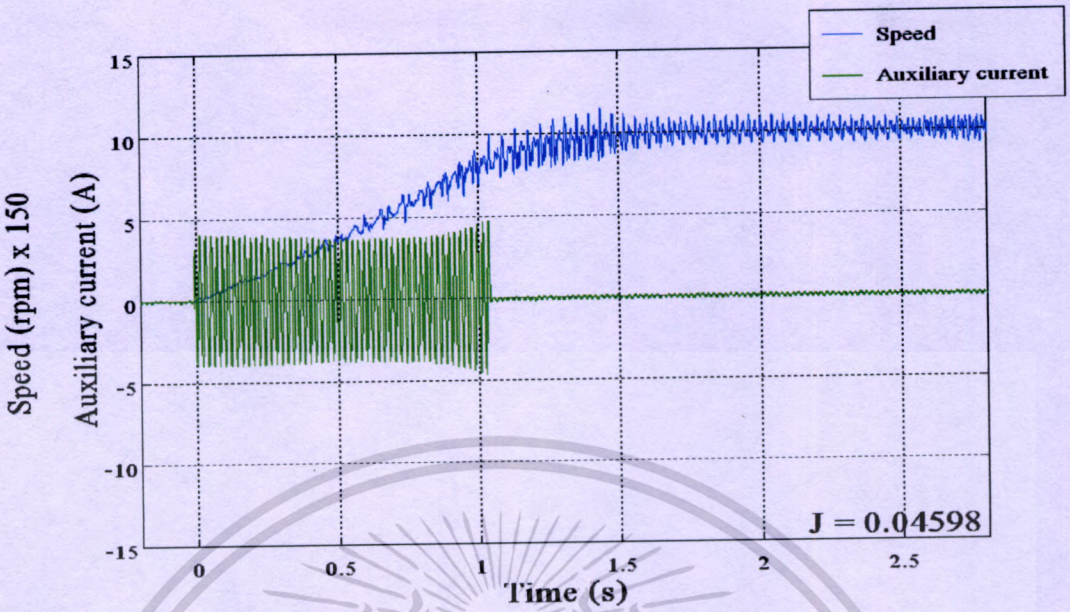


รูปที่ 4.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2

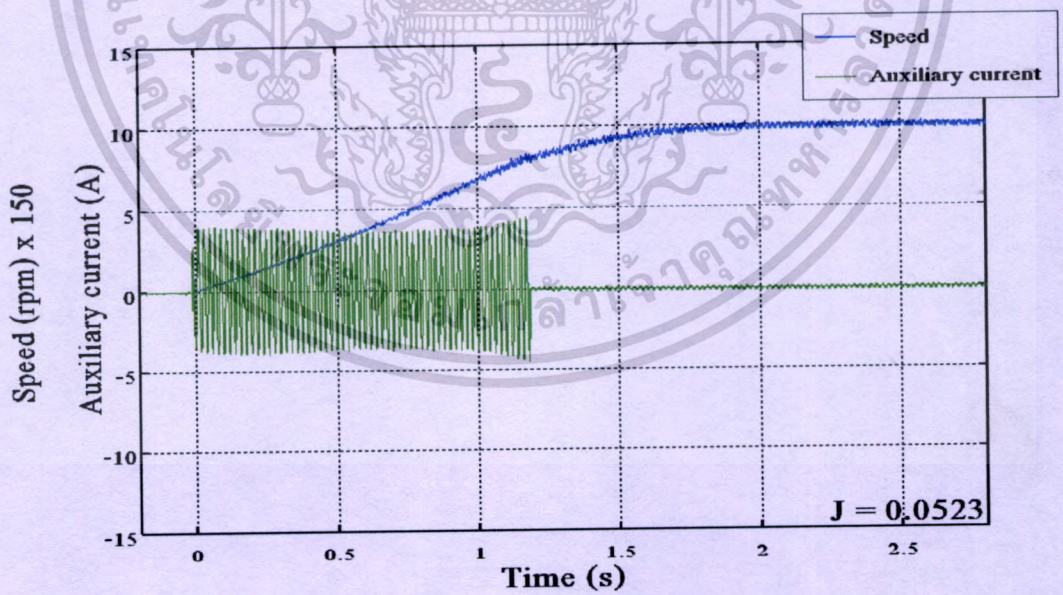


รูปที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.04598 kg-m^2

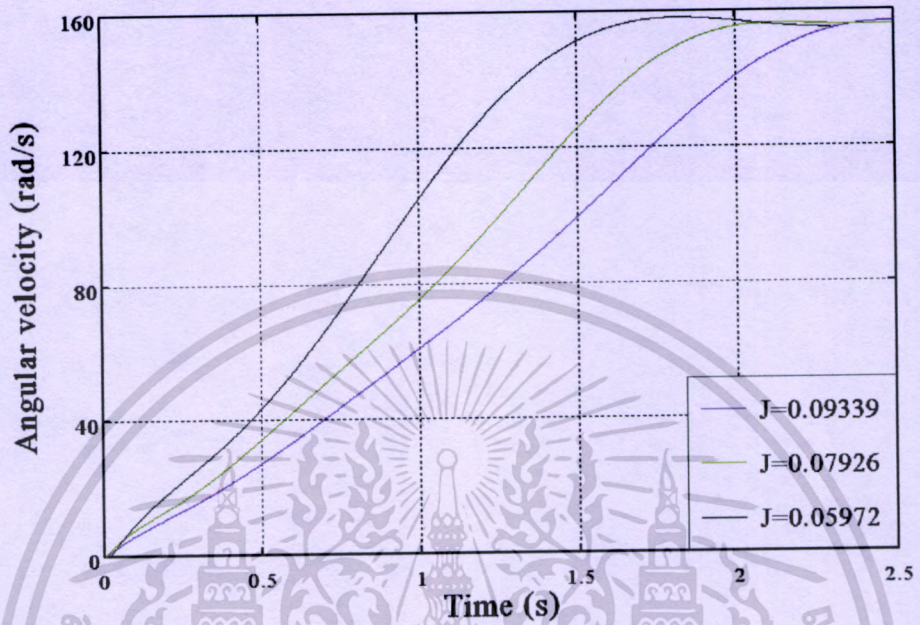


รูปที่ 4.48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2

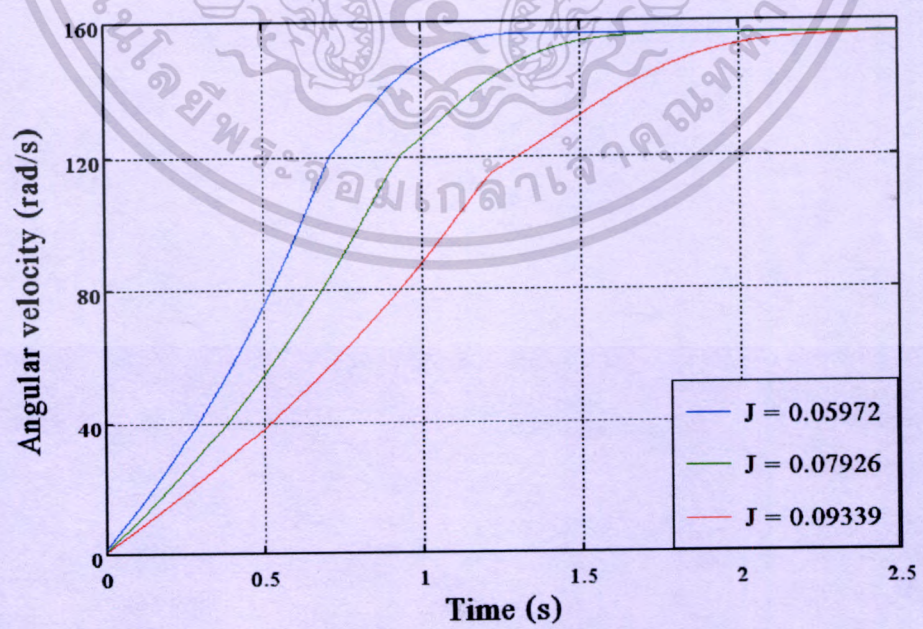
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับเวลา

ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุมกับเวลาสามารถแสดงให้เห็นถึงอัตราเร่งที่แตกต่างของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เพิ่มให้จากภายนอกที่ค่าต่างๆ

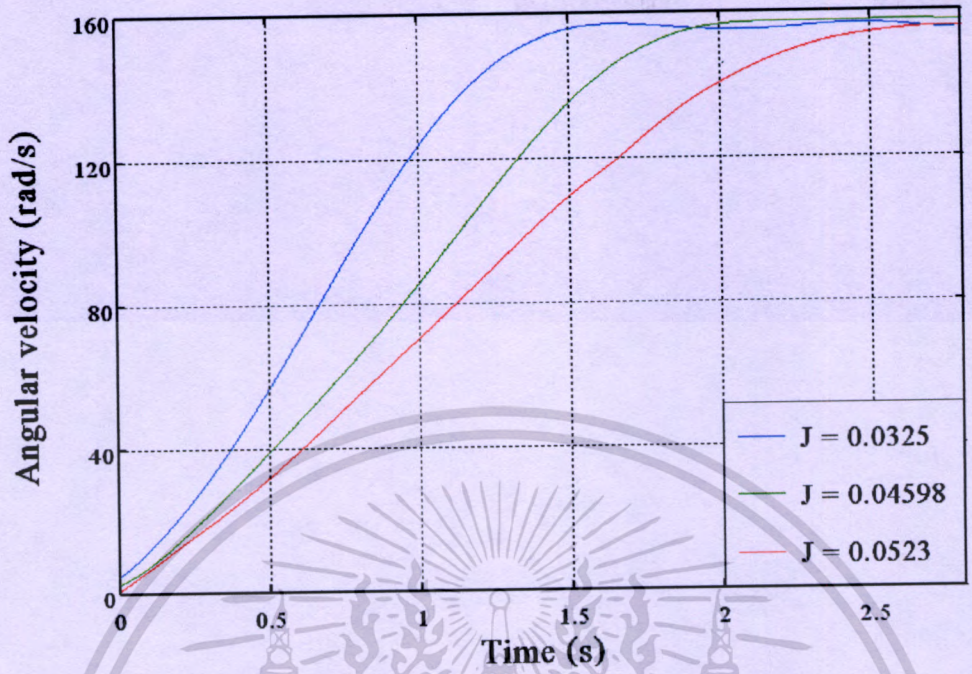


รูปที่ 4.49 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า

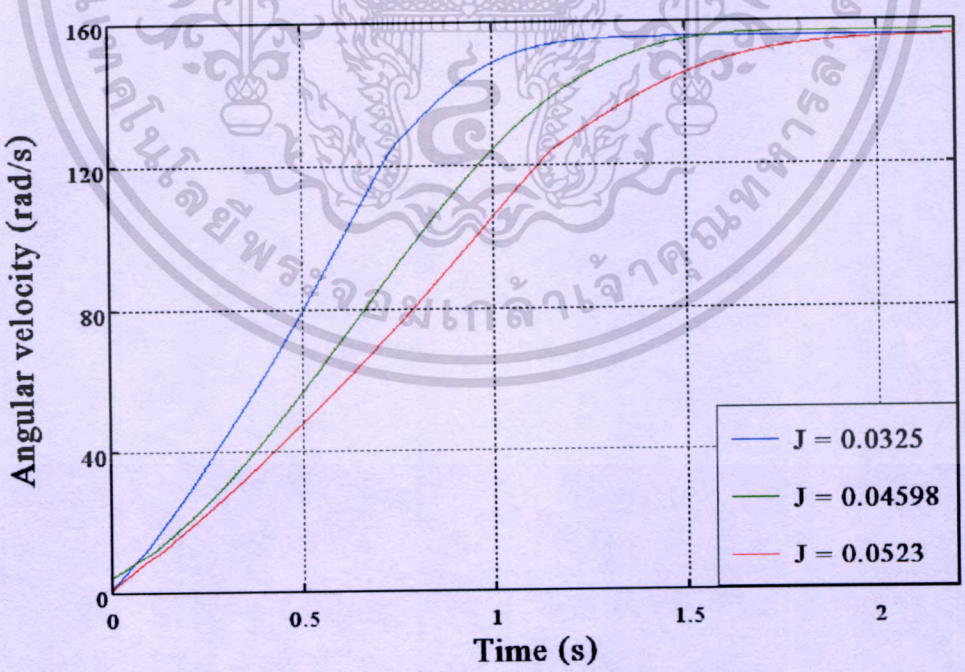


รูปที่ 4.50 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.51 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า



รูปที่ 4.52 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้า

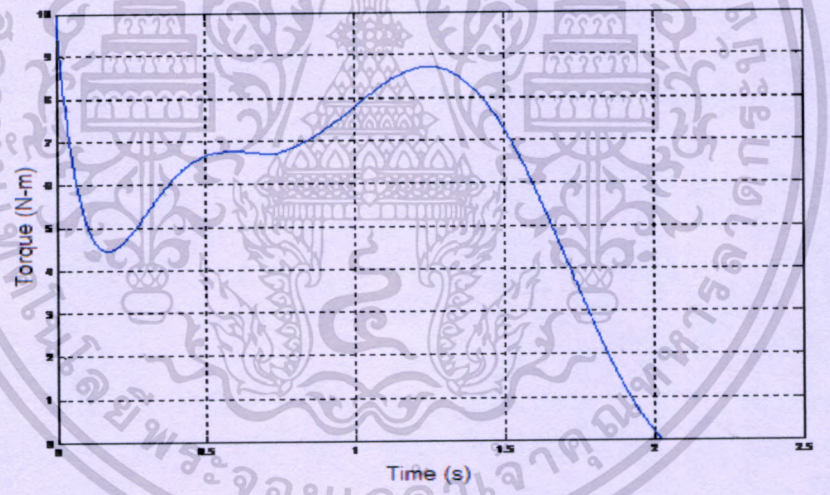
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

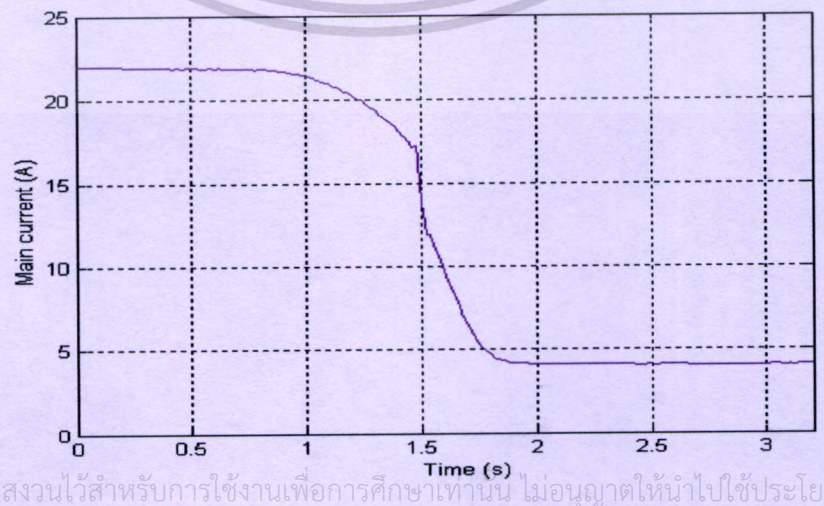
จากรูปที่ 4.49 ถึงรูปที่ 4.52 เป็นการแสดงผลของสมการที่ 3.3 ซึ่งเป็นสมการที่แสดงให้เห็นถึงผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์มีค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้เวลาในการเร่งความเร็วมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

4.3.2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-เวลาเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของขดลวดหลัก-เวลา และ กระแสของขดลวดช่วย-เวลา

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบค่าของแรงบิดและกระแสในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของขดลวดทั้ง 2 ชนิดและแรงบิดของมอเตอร์ ณ เวลาในการเร่งความเร็วต่าง ๆ กัน

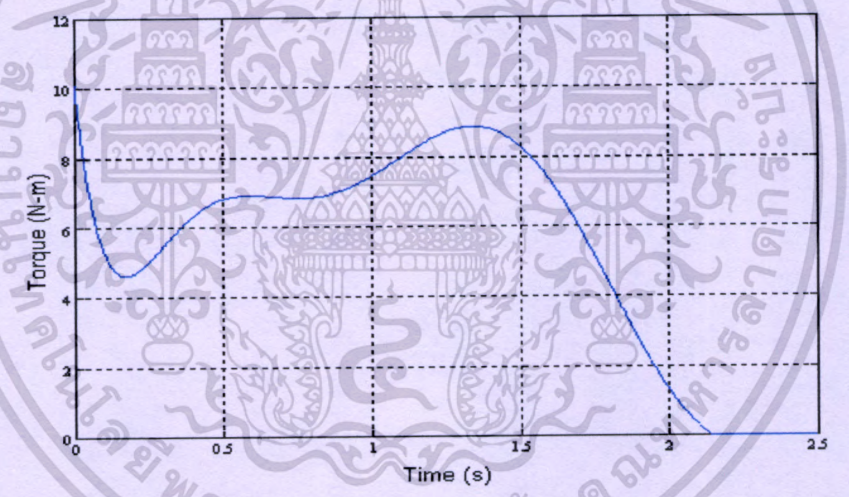
ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-เวลา และ กระแสไฟฟ้าของขดลวดทั้ง 2 ชนิด-เวลาของมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.53 ถึงรูปที่ 4.64

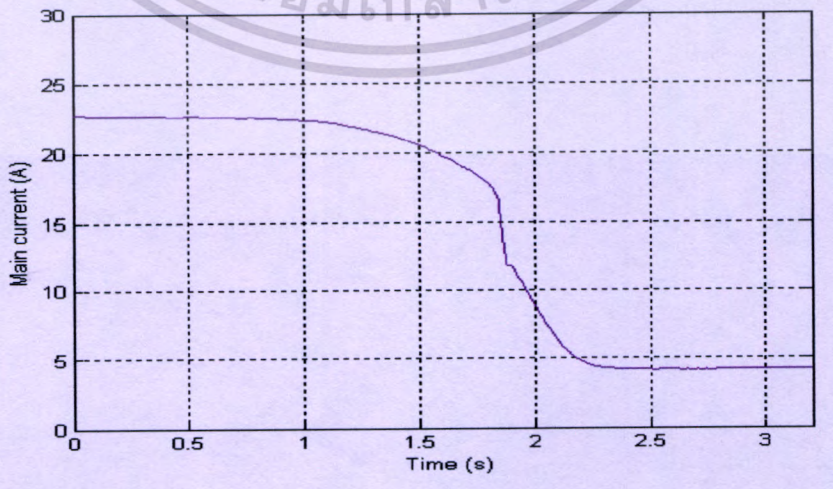




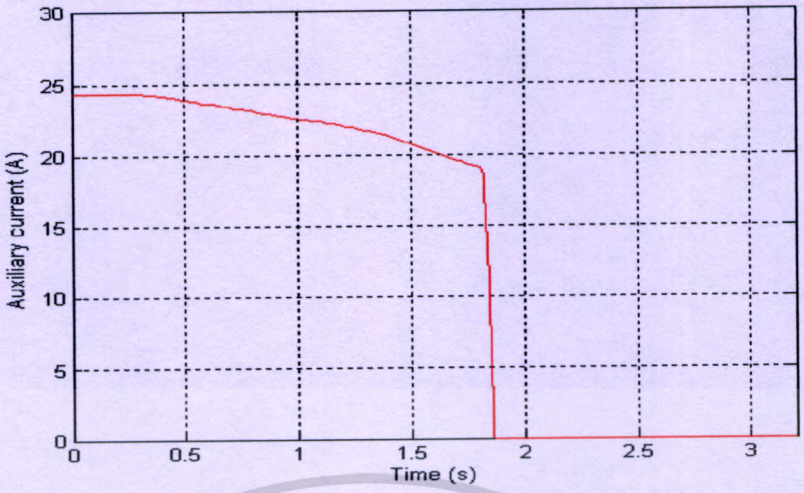
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.53 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2

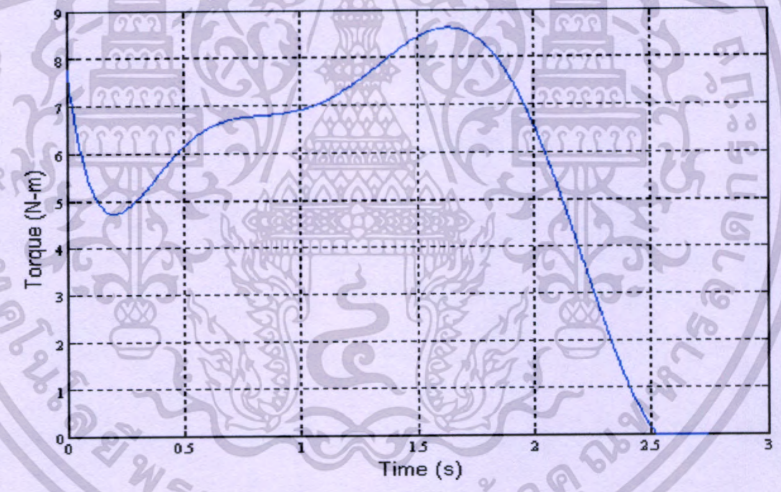


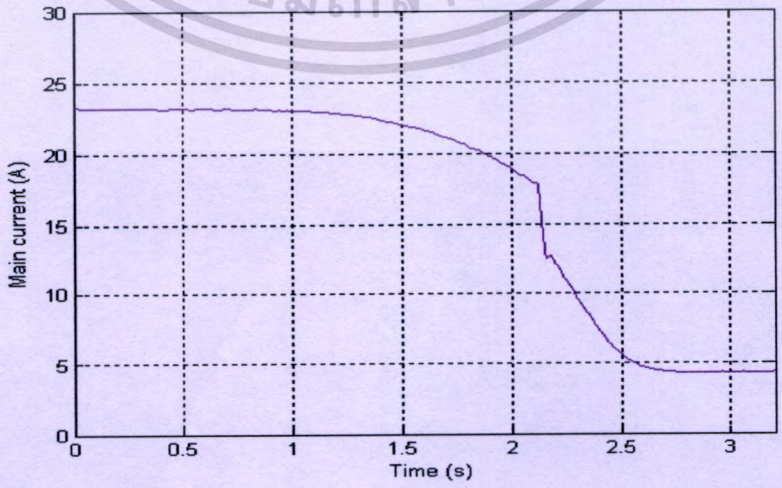


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

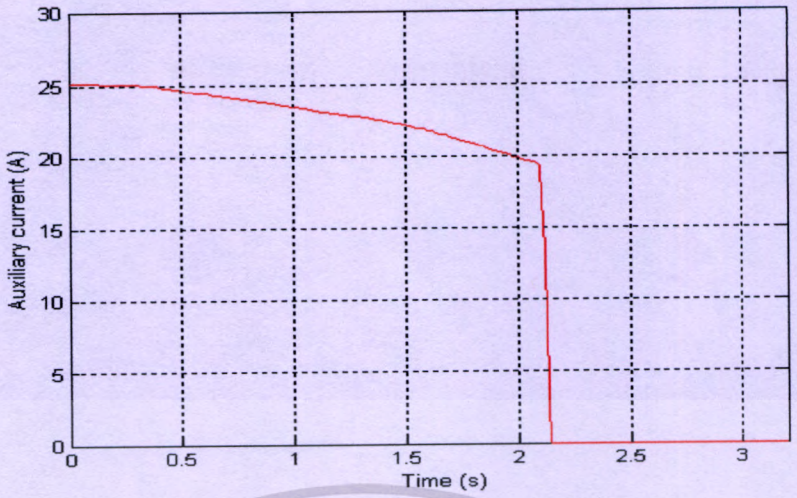


รูปที่ 4.54 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนา 0.07926 kg-m^2

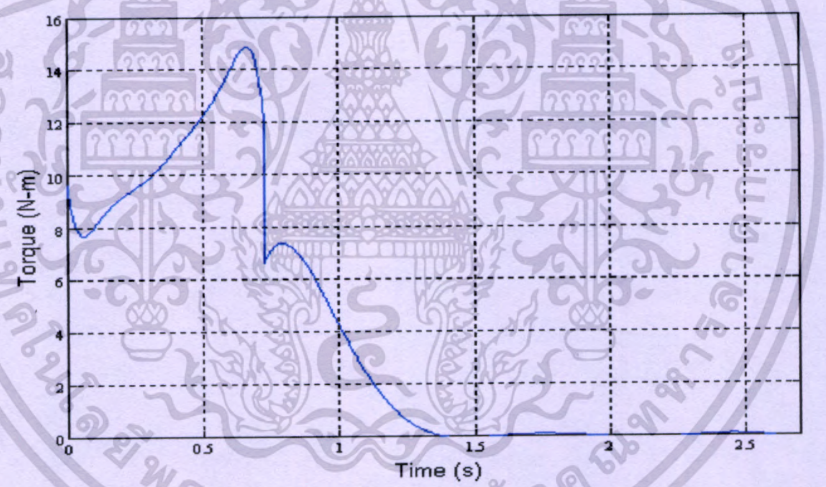


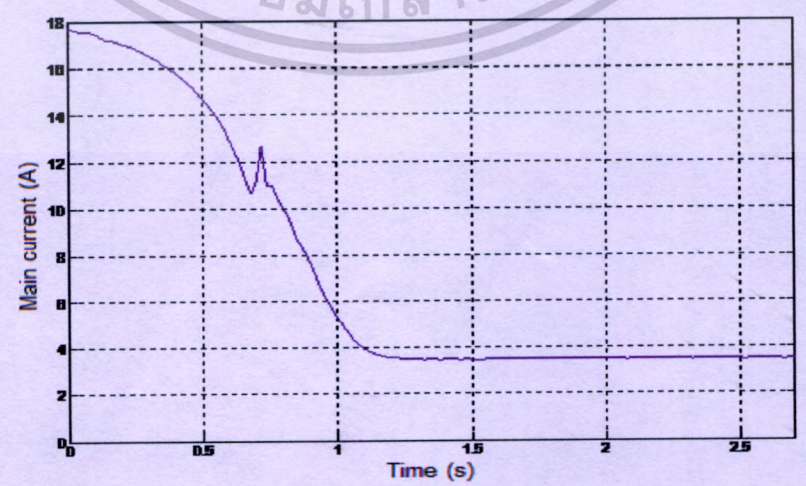


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

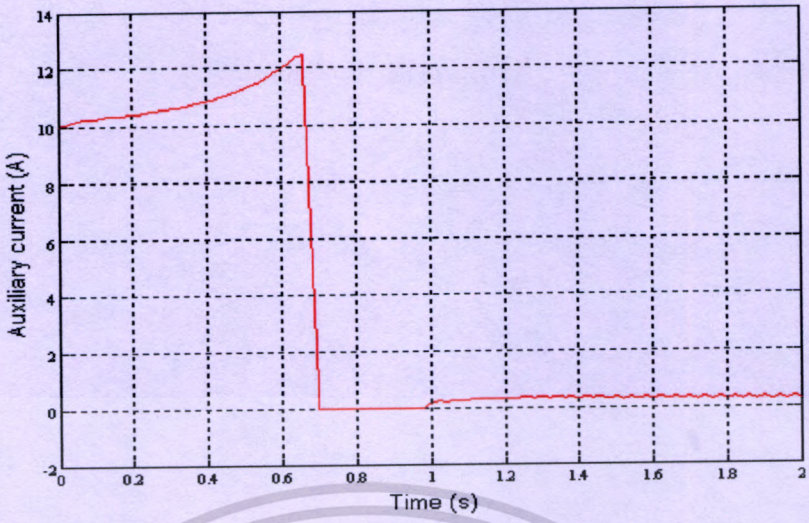


รูปที่ 4.55 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2

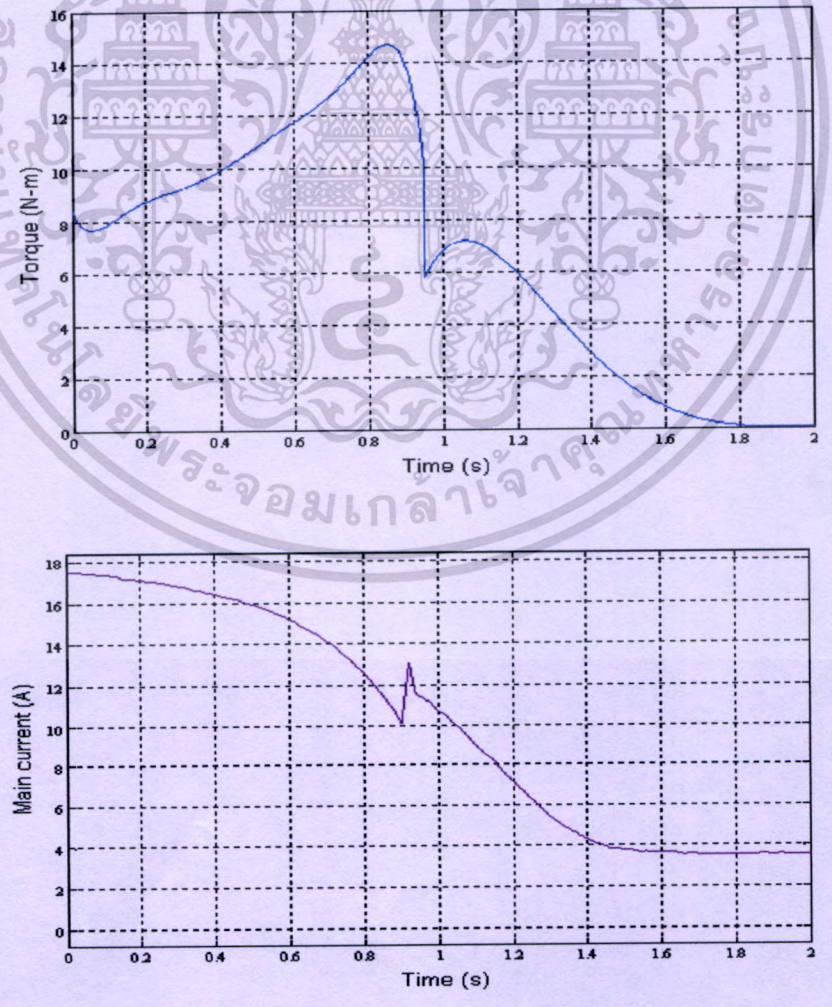




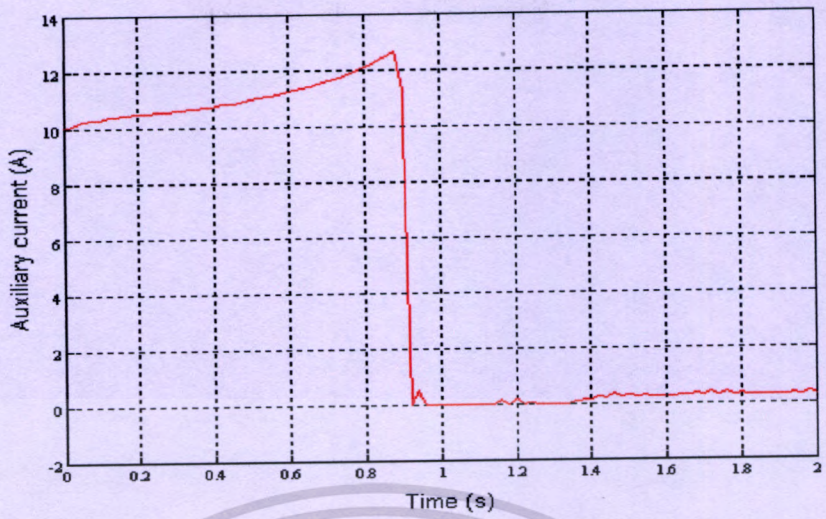
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



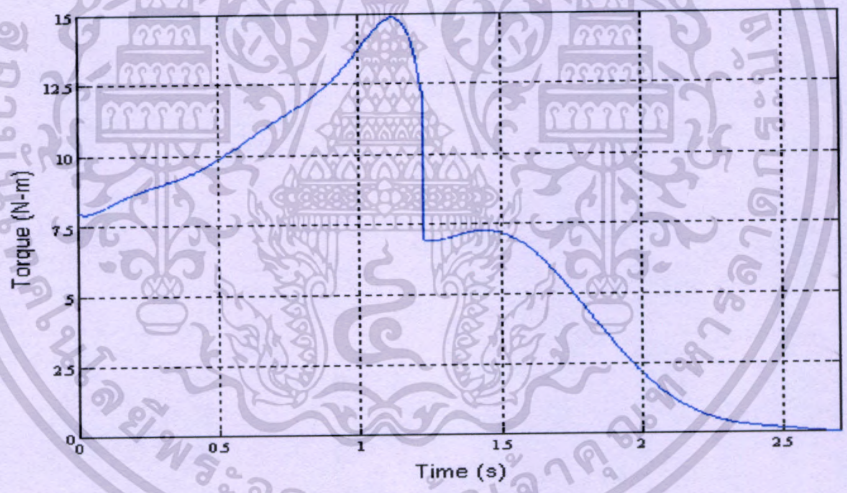
รูปที่ 4.56 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2

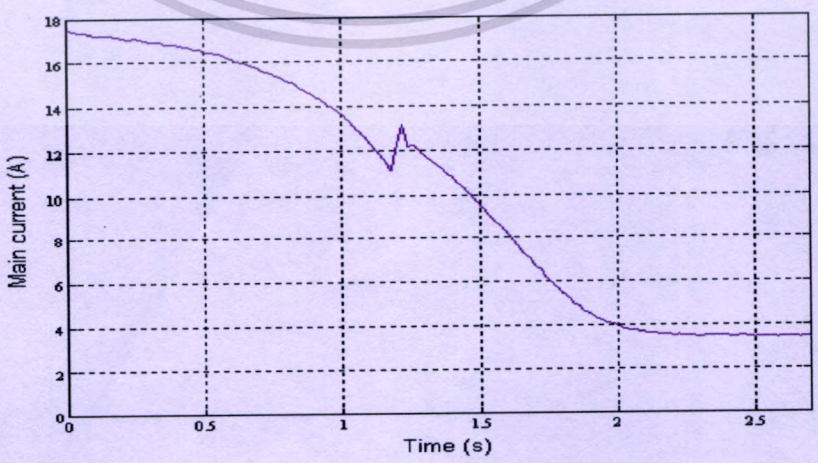


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

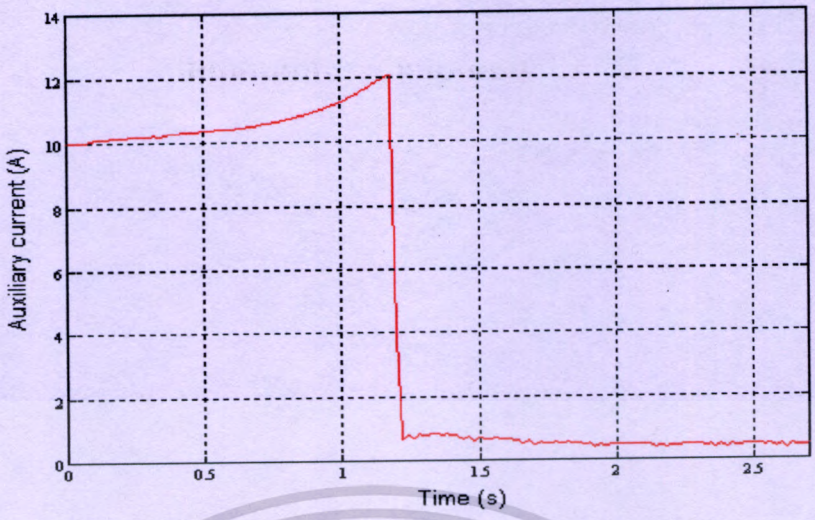


รูปที่ 4.57 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2

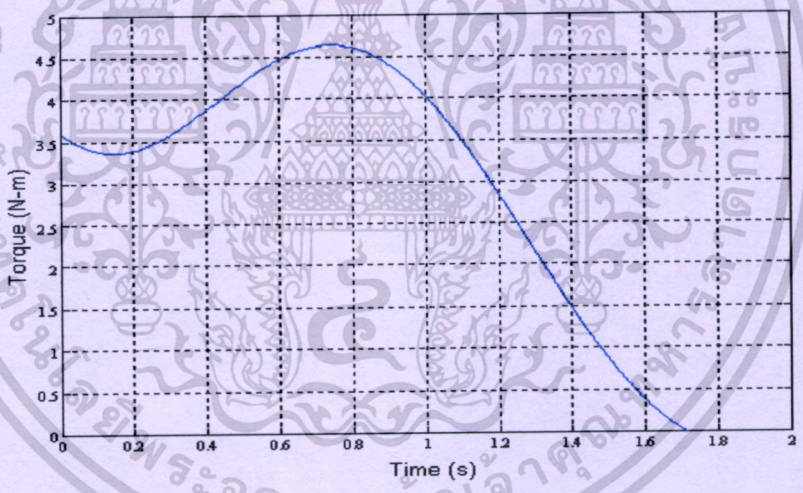


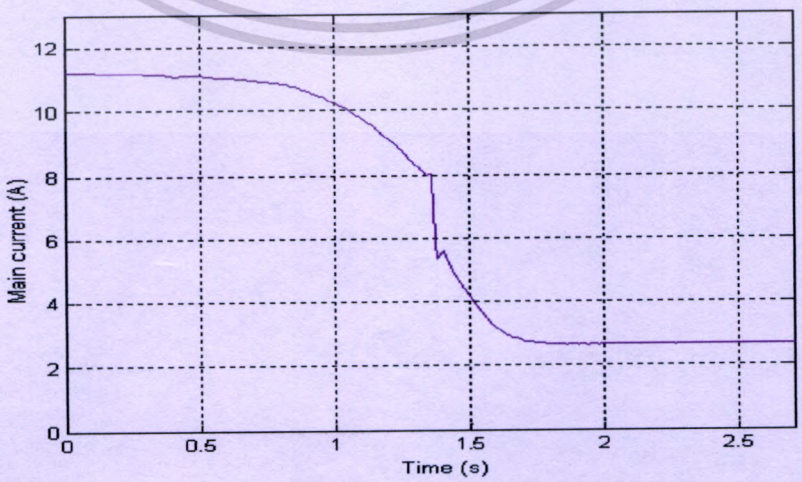


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



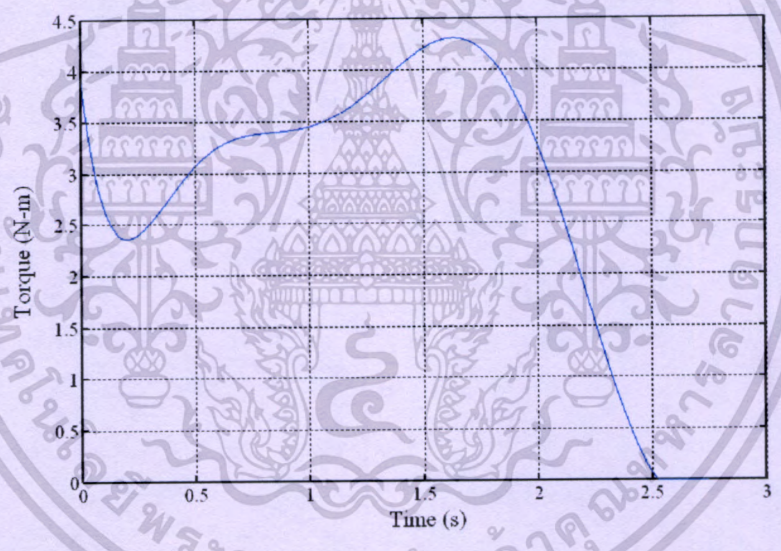
รูปที่ 4.58 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2

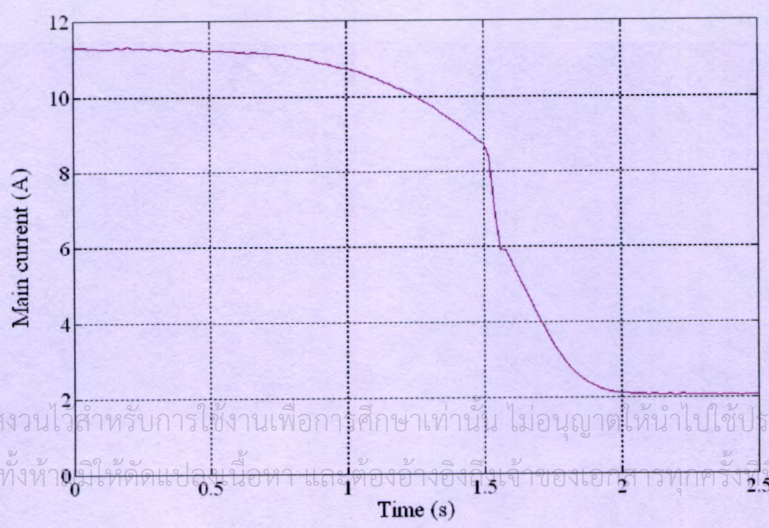




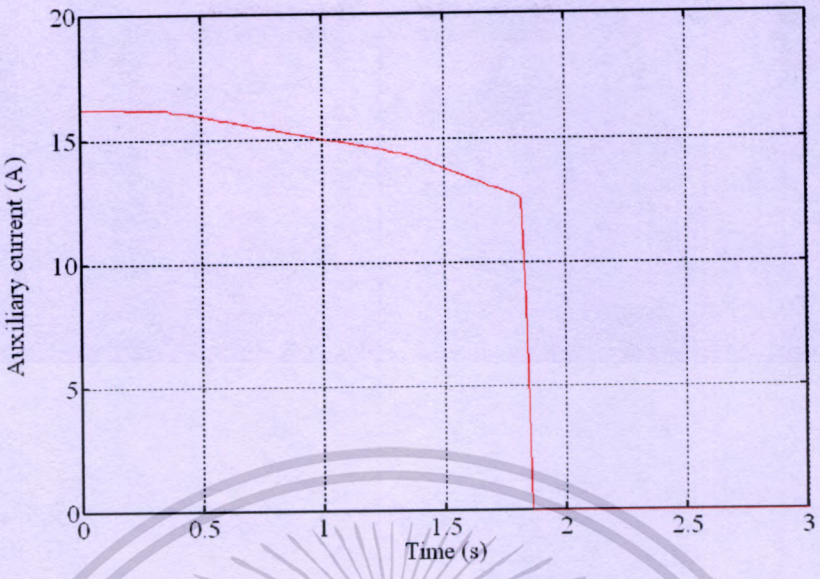
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.59 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2

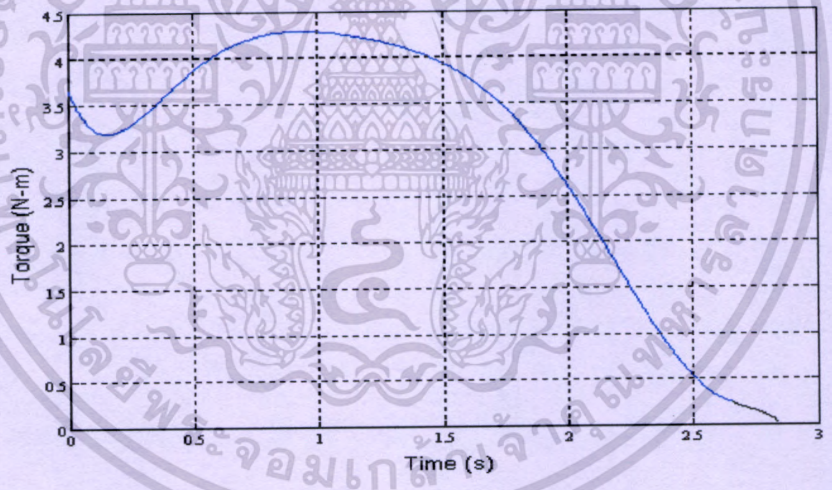


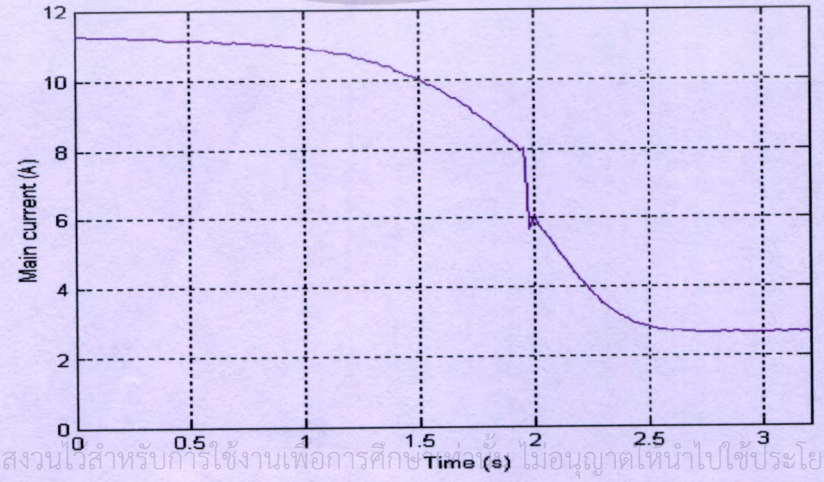


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

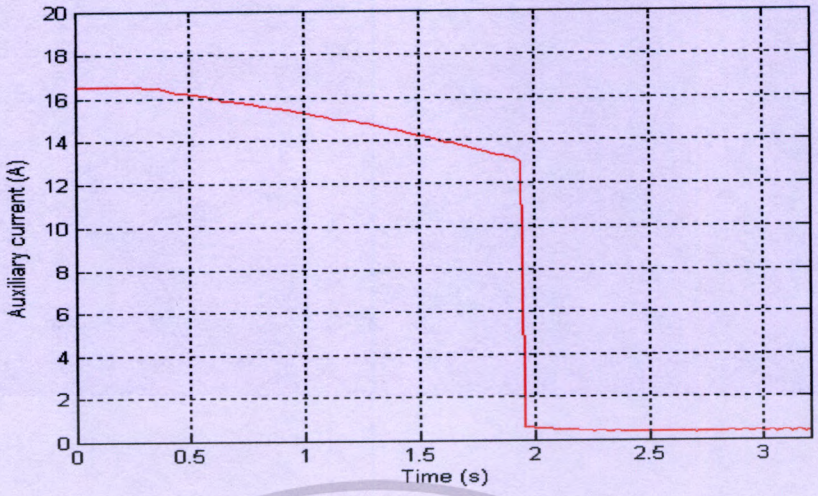


รูปที่ 4.60 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.04598 kg-m^2

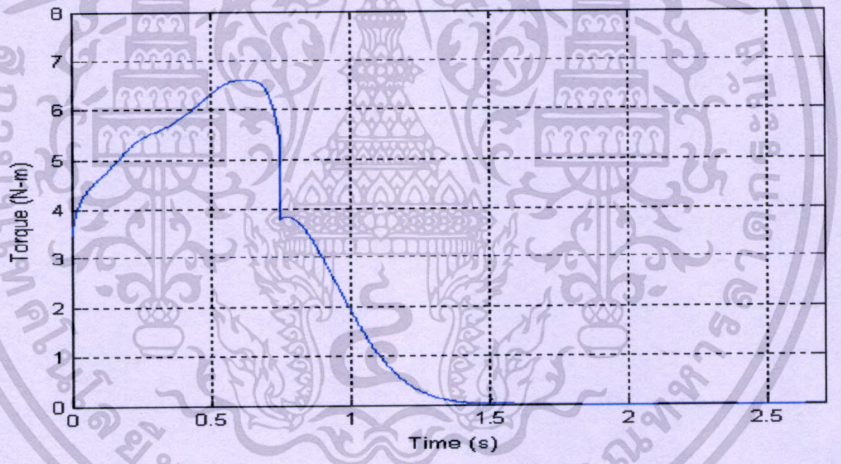


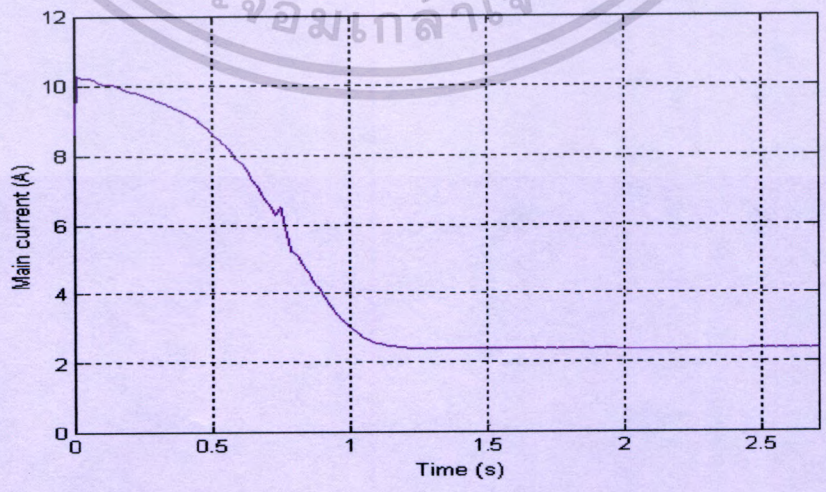


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

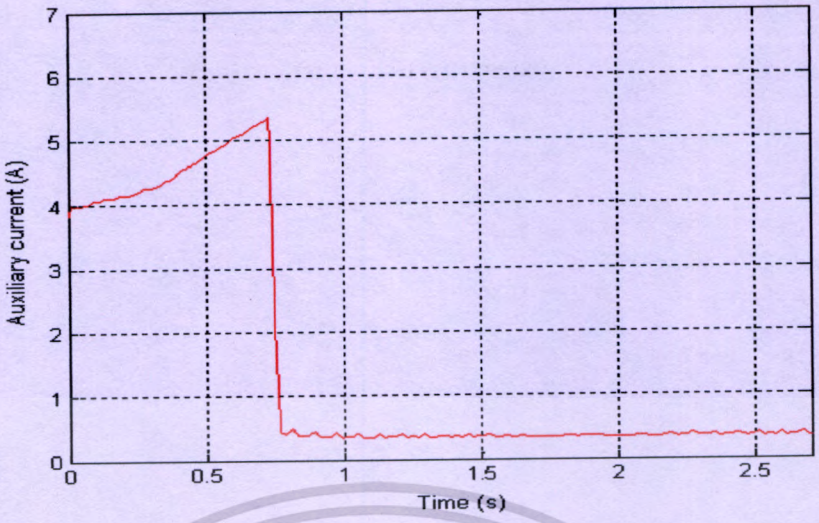


รูปที่ 4.61 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2

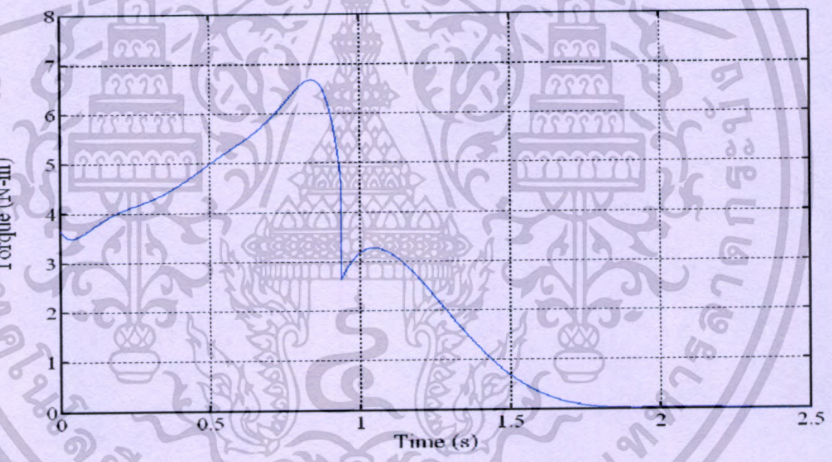


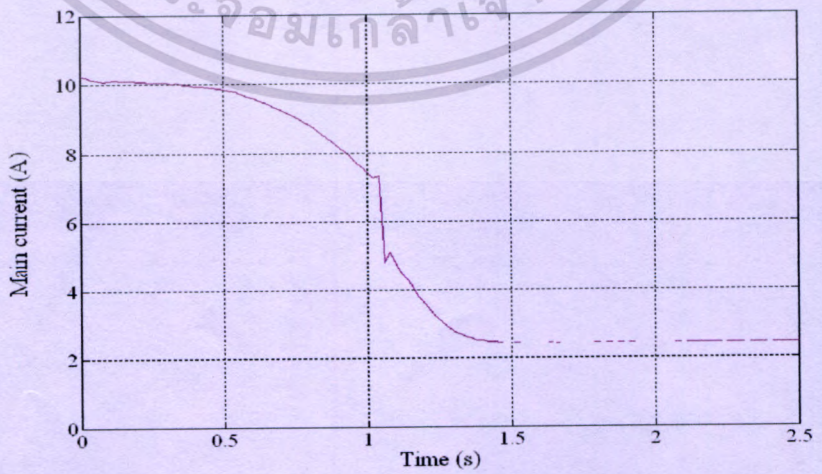


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

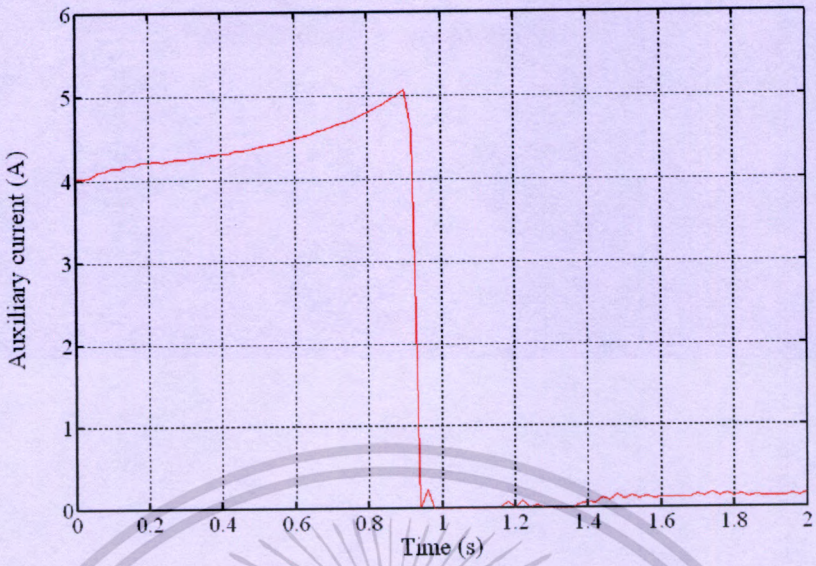


รูปที่ 4.62 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2

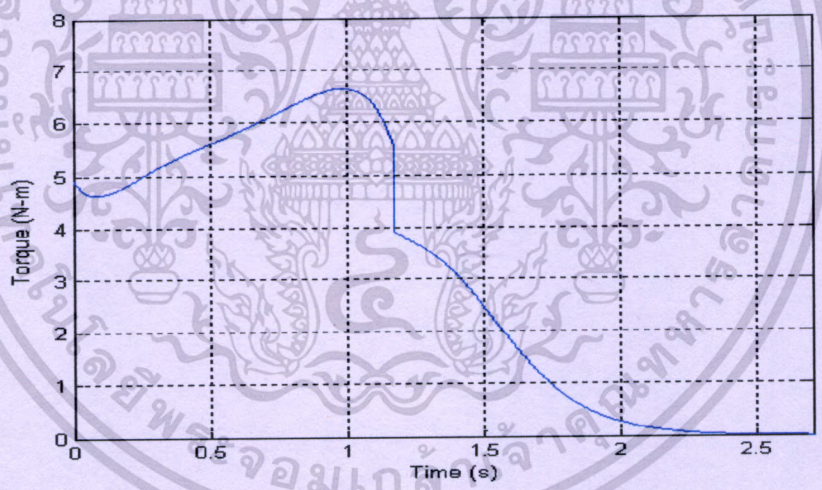




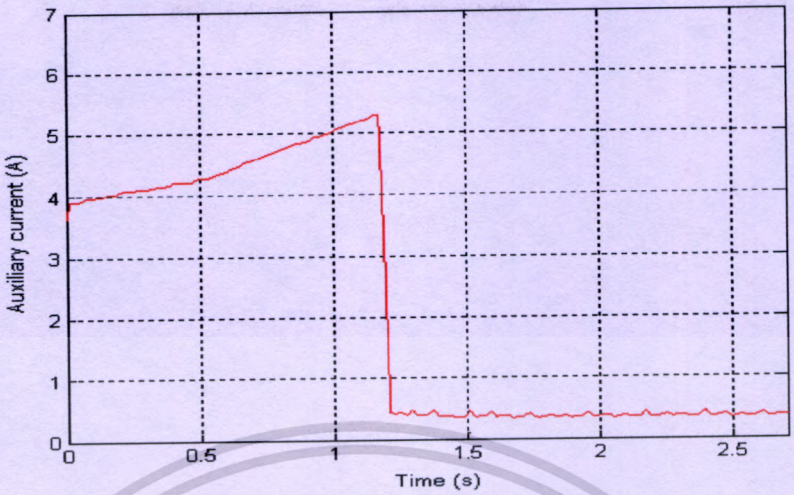
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.63 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.04598 kg-m^2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



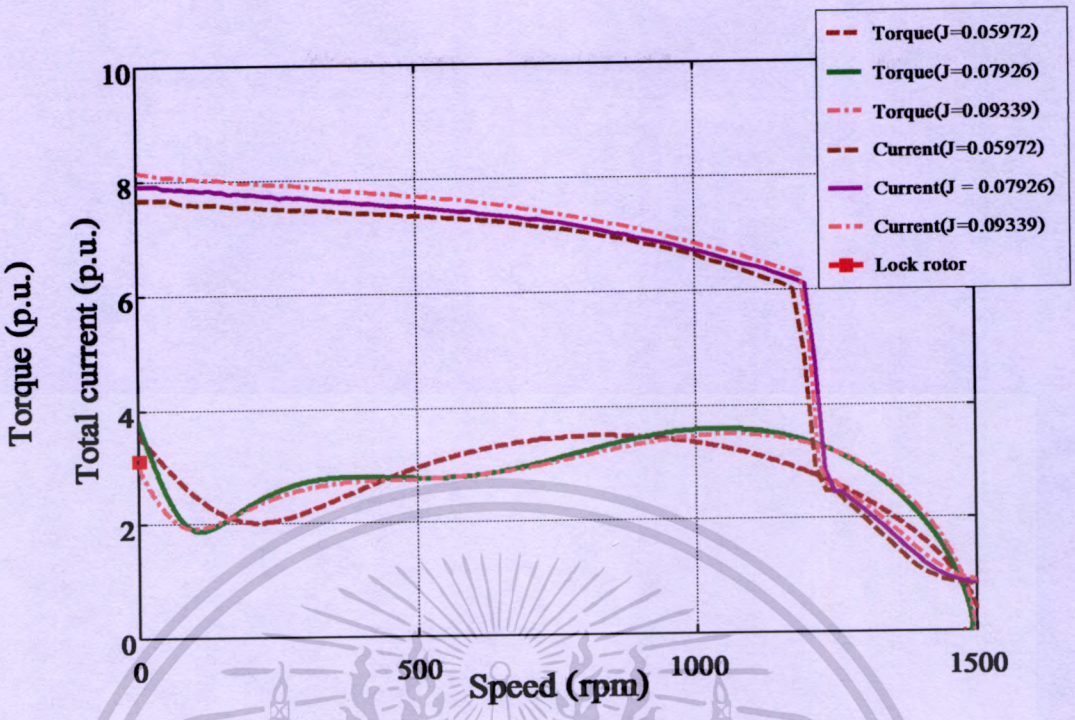
รูปที่ 4.64 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2

4.3.2.7 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ และ กราฟคุณลักษณะกระแสขดลวดหลักและขดลวดช่วย-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

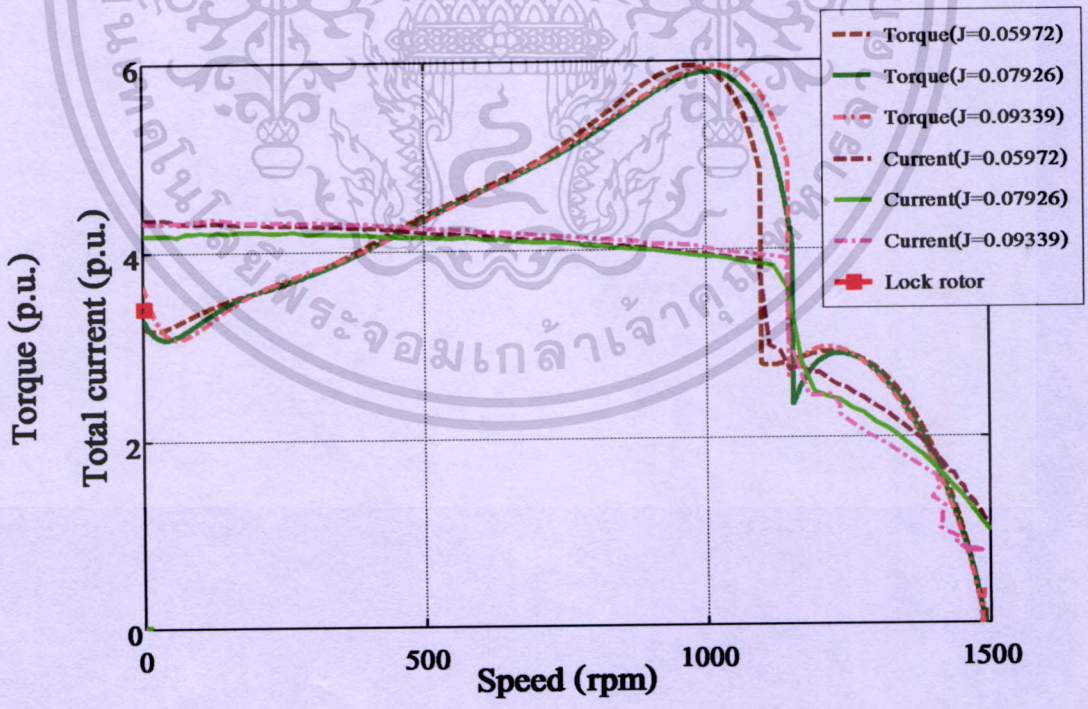
กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณตามสมการแสดงให้เห็นถึงแรงบิดที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยแสดงเป็นค่าเปอร์ยูนิต ร่วมถึงค่าของกระแสไฟฟ้ารวม rms ที่ความเร็วรอบต่างๆ และยังได้แสดงค่าของแรงบิดขณะเริ่มหมุนที่ได้จากการทดสอบ Lock rotor เพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่าของแรงบิดขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบจริงกับค่าที่ได้จากการทดสอบจากวิธีเร่งความเร็วที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงบิดของ Split phase motor มีขนาดต่ำกว่า Capacitor start motor ทั้งแรงบิดขณะเริ่มหมุน (Starting torque) และแรงบิดสูงสุด (Maximum torque) แต่กระแสไฟฟ้าของ Split phase motor กลับมีขนาดสูงกว่าของ Capacitor start motor ทั้งตลอดย่านความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งนั้นคือข้อเสียของ Split phase motor ที่เห็นได้ชัดเจนจากผลของการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



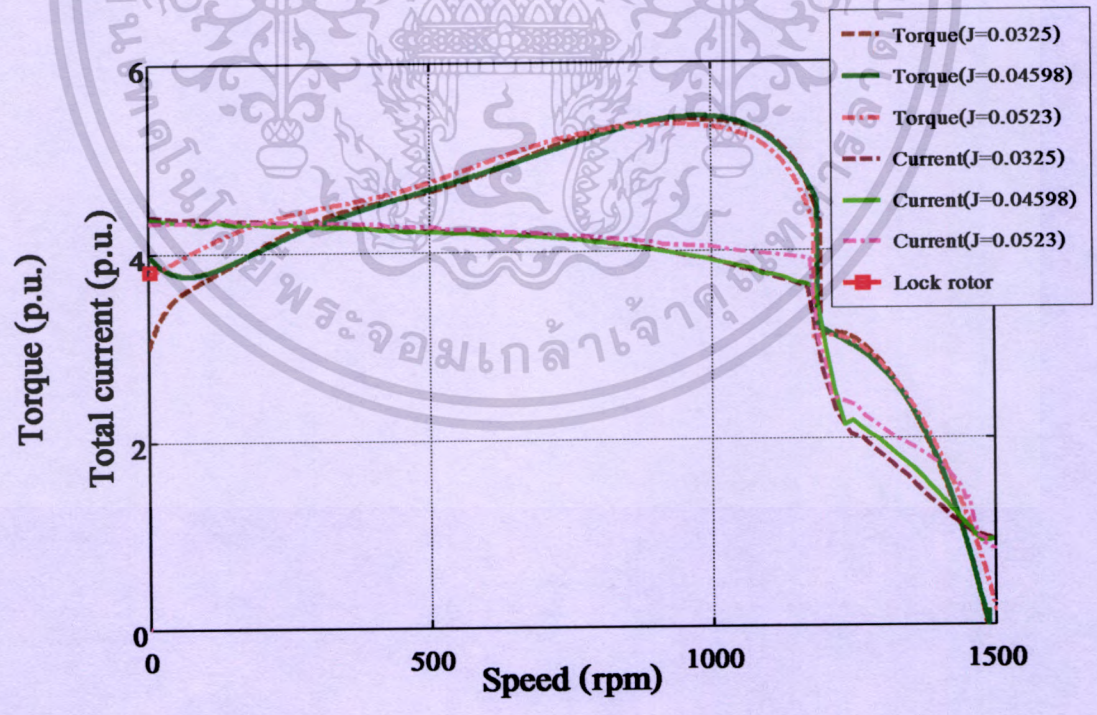
รูปที่ 4.65 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.66 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.67 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.68 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การทดสอบภาระของมอเตอร์ (Load Test)

ในการทดสอบภาระนั้นได้ทำการทดสอบตามรูปที่ 4.8 และนำข้อมูลที่บันทึกได้แก่ ค่ากำลังอินพุท, กำลังเอาท์พุท, ค่าแรงบิด เพื่อมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ ซึ่งได้แสดงผลจากการบันทึกดังในตารางที่ 4.7 ถึงตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า

Perfor-mance / speed	Torque (N-m)	P_o (w)	I_m (A)	P_i (w)	η (%)
1440	3.8	573.04	5.28	911.13	62.89
1445	3.5	529.62	5.07	764.89	69.24
1450	3.2	485.89	4.91	742.58	65.43
1455	2.9	441.87	4.74	732.06	60.36
1460	2.6	397.51	4.61	696.29	57.09
1465	2.3	352.84	4.47	624.29	56.53
1470	2.0	307.88	4.39	559.39	55.04
1475	1.7	262.58	4.27	506.91	51.80
1480	1.3	201.49	4.21	427.79	47.10
1485	1.0	155.51	4.17	358.32	43.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า

Perfor-mance / speed	Torque (N-m)	P_o (w)	I_m (A)	P_i (w)	η (%)
1425	3.5	522.27	4.98	764.30	68.33
1430	3.4	509.15	4.86	730.10	69.74
1435	3.1	465.84	4.60	679.66	68.54
1440	2.9	437.32	4.55	643.11	68.00
1445	2.8	423.70	4.46	625.29	67.76
1450	2.4	364.42	4.23	541.80	67.26
1455	2.2	335.21	4.12	508.90	65.87
1460	2.0	305.78	4.00	469.20	65.17
1465	1.8	276.15	3.94	430.60	64.13
1470	1.6	246.30	3.86	393.50	62.59
1475	1.5	231.69	3.76	376.55	61.53
1480	1.0	154.98	3.69	297.10	52.13

ตารางที่ 4.9 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า

Perfor-mance / speed	Torque (N-m)	P_o (w)	I_m (A)	P_i (w)	η (%)
1442	1.3	196.30	2.89	380	51.66
1445	1.2	181.58	2.89	377	48.10
1447	1.1	166.68	2.85	360	46.30
1450	1.0	151.84	2.79	340	44.66
1455	0.9	137.13	2.79	320	42.85
1460	0.8	122.31	2.72	300	40.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า

Perfor-mance / speed	Torque (N-m)	P_o (w)	I_m (A)	P_i (w)	η (%)
1415	1.6	237.08	2.68	420	56.45
1420	1.5	223.05	2.64	410	54.40
1425	1.4	208.92	2.57	390	53.57
1430	1.3	194.68	2.53	380	52.61
1435	1.3	195.35	2.50	373	52.26
1440	1.2	180.96	2.46	360	50.01
1445	1.1	166.45	2.43	340	49.00
1450	1.0	151.84	2.38	310	48.98
1455	0.9	137.13	2.35	290	47.29
1460	0.8	122.31	2.30	270	45.30

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test ของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า

Speed (rpm)	Torque (N-m)	
	Load Test	Acceleration Test
1440	3.8	3.62
1445	3.5	3.43
1450	3.2	3.22
1455	2.9	2.99
1460	2.6	2.72
1465	2.3	2.48
1470	2.0	2.21
1475	1.7	1.88
1480	1.3	1.55
1485	1.0	1.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า

Speed (rpm)	Torque (N-m)	
	Load Test	Acceleration Test
1425	3.5	3.57
1430	3.4	3.37
1435	3.1	3.16
1440	2.9	2.96
1445	2.8	2.76
1450	2.4	2.51
1455	2.2	2.27
1460	2.0	2.02
1465	1.8	1.78
1470	1.6	1.49
1475	1.5	1.21
1480	1.0	0.89

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test ของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า

Speed (rpm)	Torque (N-m)	
	Load Test	Acceleration Test
1442	1.3	1.30
1445	1.2	1.25
1447	1.1	1.22
1450	1.0	1.16
1455	0.9	1.08
1460	0.8	0.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า

Speed (rpm)	Torque (N-m)	
	Load Test	Acceleration Test
1415	1.6	1.86
1420	1.5	1.75
1425	1.4	1.66
1430	1.3	1.55
1435	1.3	1.44
1440	1.2	1.31
1445	1.1	1.19
1450	1.0	1.07
1455	0.9	0.94
1460	0.8	0.81

จากผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) เพื่อทำการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและคุณลักษณะกระแสไฟฟ้า-ความเร็วรอบดังแสดงในรูปที่ 4.65 ถึงรูปที่ 4.68 โดยในการทดสอบได้ทำการเปลี่ยนขนาดของล้อช่วยแรงให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งผลปรากฏว่า กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแสไฟฟ้า-ความเร็วรอบ ที่ได้จากการทดลองนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แม้ว่าค่าข้อมูลที่ได้จากล้อช่วยแรงบางตัวจะผิดพลาดไปบ้างอันเนื่องมาจากการคัปปลิ้งมอเตอร์,สัญญาณจาก DC Techogenerator และกระบวนการทำ curve fitting กราฟ แต่ก็แสดงให้เห็นว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยไม่ทำให้กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ และ คุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงเท่าใดนัก ส่วนวิธีที่สามารถยืนยันความน่าเชื่อถือของกราฟได้ก็คือ วิธีการทดสอบภาระเท่านั้น ซึ่งได้เปรียบเทียบค่าในตารางที่ 4.11 ถึงตารางที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการทดสอบแรงบิดขณะเริ่มหมุนโดยวิธียึดโรเตอร์ (Locked rotor test)

การทดสอบแรงบิดขณะเริ่มหมุนโดยวิธียึดโรเตอร์เพื่อให้ได้แรงบิดจริงจากการทดลอง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการเร่งความเร็วที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้โดยจะแสดงให้เห็นว่าการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วมอเตอร์นั้นเป็นวิธีการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำและง่ายต่อการทดสอบการหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งผลการทดสอบนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.15 - ตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบแรงบิดขณะเริ่มหมุนด้วยวิธีเร่งความเร็วกับ Locked rotor test ของ Split phase motor ขนาด 1/4 hp

External inertia ($kg.m^2$)	Torque (N.m)	
	Acceleration	Locked rotor
0.0325	2.92	2.85
0.04598	1.77	
0.0523	2.99	

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบแรงบิดขณะเริ่มหมุนด้วยวิธีเร่งความเร็วกับ Locked rotor test ของ Split phase motor ขนาด 1/2 hp

External inertia ($kg.m^2$)	Torque (N.m)	
	Acceleration	Locked rotor
0.05972	3.57	3.1
0.07926	3.82	
0.09339	3.01	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบแรงบิดขณะเริ่มหมุนด้วยวิธีเร่งความเร็วกับ Locked rotor test ของ Capacitor start motor ขนาด 1/4 hp

External inertia ($kg.m^2$)	Torque (N.m)	
	Acceleration	Locked rotor
0.0325	2.98	3.59
0.04598	3.74	
0.0523	3.97	

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบแรงบิดขณะเริ่มหมุนด้วยวิธีเร่งความเร็วกับ Locked rotor test ของ Capacitor start motor ขนาด 1/2 hp

External inertia ($kg.m^2$)	Torque (N.m)	
	Acceleration	Locked rotor
0.05972	3.82	3.4
0.07926	3.3	
0.09339	3.21	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส ชนิดสปลิตเฟสมอเตอร์และคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีเร่งความเร็วมอเตอร์ โดยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่มอเตอร์เพื่อเพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็ว โดยผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของสปลิตเฟสมอเตอร์จะมีค่าสูงกว่าชนิดคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์มากดังแสดงในรูปที่ 4.17 – 4.20 และจะเห็นว่าคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์จะใช้เวลาในการเร่งความจนเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัสสั้นกว่าสปลิตเฟสมอเตอร์ ณ ที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเดียวกัน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.49 – 4.52 จากผลของอัตราเร่งจะนำไปคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ตามสมการที่ 3.1 จากการคำนวณจะได้กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์โดยแสดงในรูปที่ 4.65 – 4.68 ซึ่งได้แสดงผลของกระแสไฟฟ้ารวมเปรียบเทียบกับแรงบิด ณ ความเร็วต่างๆ โดยแรงบิดของสปลิตเฟสมอเตอร์จะต่ำกว่าคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์แต่กระแสไฟฟ้ารวมของสปลิตเฟสมอเตอร์จะสูงกว่าคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์มากเป็นผลเนื่องมาจากค่าคาปาซิเตอร์ที่ต่ออนุกรมกับขดลวดช่วยของคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ทำให้มุมต่างเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้าขอลวดหลักกับกระแสไฟฟ้าขดลวดช่วยมีค่าเข้าใกล้ 90° มากกว่าสปลิตเฟสมอเตอร์ โดยได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.33 – 4.36 จากรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้ารวมยังได้แสดงให้เห็นว่าสปลิตเฟสมอเตอร์ใช้พลังงานในช่วงสตาร์ทมากเป็นผลทำให้เกิดความร้อนภายในมอเตอร์ในช่วงสตาร์ทมาก นั้นหมายถึงอายุการใช้งานจะสั้นกว่าชนิดคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์

ในการทดสอบได้ทำการทดสอบเพื่อยืนยันกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์โดยวิธีเร่งความเร็ว ด้วยการทดสอบขับภาระที่ภาระต่างๆ โดยเปรียบเทียบในตารางที่ 4.11 – 4.14 และทดสอบล็อคโรเตอร์ที่พิกัดแรงดันโดยผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 4.15 – 4.18 และจากการทดสอบผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วมอเตอร์มีความแม่นยำและเวลาที่ใช้ไม่มากจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้วิธีหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในขั้นต่อไปจะทำการวิเคราะห์และประเมินหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจากภายนอกที่มีขนาดเหมาะสมกับมอเตอร์แต่ละขนาดเพื่อให้สะดวกต่อการทดสอบและข้อมูลที่ถูกต้องรวมถึงไม่ทำให้มอเตอร์เสียหาย และยังจะพัฒนาในส่วนของการเก็บข้อมูลความเร็วรอบในขณะที่มอเตอร์เร่งความเร็วตั้งแต่มอเตอร์หยุดยิ่งจนความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัสเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดมากขึ้นและมีค่าความผิดพลาดให้น้อยที่สุด

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] IEEE Standard 114-2001, IEEE Standard Test Procedure for Single-Phase Induction Motor

[2] Warachart Sae-kok, Pichit Lumyong, "Characteristics Evaluation of 3 Phase Induction Motors Based on an Accelertion Method with Increasing Moment of Inertia Techique" Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003 IEEE International Symposium on Aug. 2003 Page(s):93 – 98

[3] IEC Standard 34-12 1980 Part 12 : Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors for voltages up to and including 660 V

[4] JAMES S.WALKER "PHYSICS" Second Edition Pearson Education, Inc

[5] IEC Standard 34-2 1982 Part 2 : Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles)

[6] วรชาติ แซ่ก๊กและพิชิต ลำยอง "การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์" การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 199-204, พฤศจิกายน 2544

[7] Sae-kok W. Lumyong P., "Acceleration Test for Small Three-Phase Integral Horsepower Induction Motor-Techniques, Limitation, and Problems of the Test and Interpretation of the Results" Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. The Fifth International Conference on Volume 1, 17-20 Nov. 2003 Page(s):502 - 507

[8] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D.Umans "Electric Machinery" Sixth Edition Mcgraw-Hill, 2003

[9] Richard H. Engleman, William H. Middendorf. Handbook of Electric Motors. The United State of America : Marcel Dekker, Inc. 1995.

[10] M.G.Say. Alternating Current Machines. 5th Edition. Singapore : Longman Singapore Publishers Pte Ltd. 1983.

[11] Werner Leonhard. Control of Electrical Drives. 2nd Edition. Germany : Springer-Verleg Berlin Heidenberg. 1996.

[12] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale. Numerical Methods for Engineer with Programming and software Application. 3rd Edition, McGraw-Hill. 1998.

[13] Lawrence L Lapin. Probability and Statistics for Modern Engineering. 2nd Edition. The United States of America : PWS-KENT Publishing Company. 1990.

เอกสารนี้เป็นสิทธิ์ของ [illegible] ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] Syephen B. Vardeman. Statistics for Engineering Problem Solving. The United States of America : PWS Publishing Company. 1994.

[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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

กระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการคำนวณกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 บทนำ

จากข้อมูลแรงดัน, กระแส, และความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งบันทึกได้จากการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็นข้อมูลที่อยู่ในลักษณะข้อมูลดิบ ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ได้ทันที ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการคำนวณและทำการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว เพื่อให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานได้ทันที

ก.2 การคำนวณหาค่า rms ของสัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์

ข้อมูลของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่บันทึกได้ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วนั้นเป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบค่ากระแสและแรงดัน ณ เวลาใดๆซึ่งไม่สามารถนำมาประกอบการวิเคราะห์คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ทันที ดังนั้นต้องทำการแปลงข้อมูลกระแสและแรงดันดังกล่าวให้อยู่ในรูปของค่า rms เสียก่อน ซึ่งข้อมูลทั้ง 2 อย่างนั้นเป็นข้อมูลลักษณะเป็น periodic function ดังนั้นสมการในการคำนวณหาค่า rms ของข้อมูลที่เป็น periodic function แสดงดังสมการที่ ก1

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{0}^{0+T} f(t)^2\,dt} \qquad (ก1)$$

โดยที่ F_{rms} = ค่า rms ของ periodic function

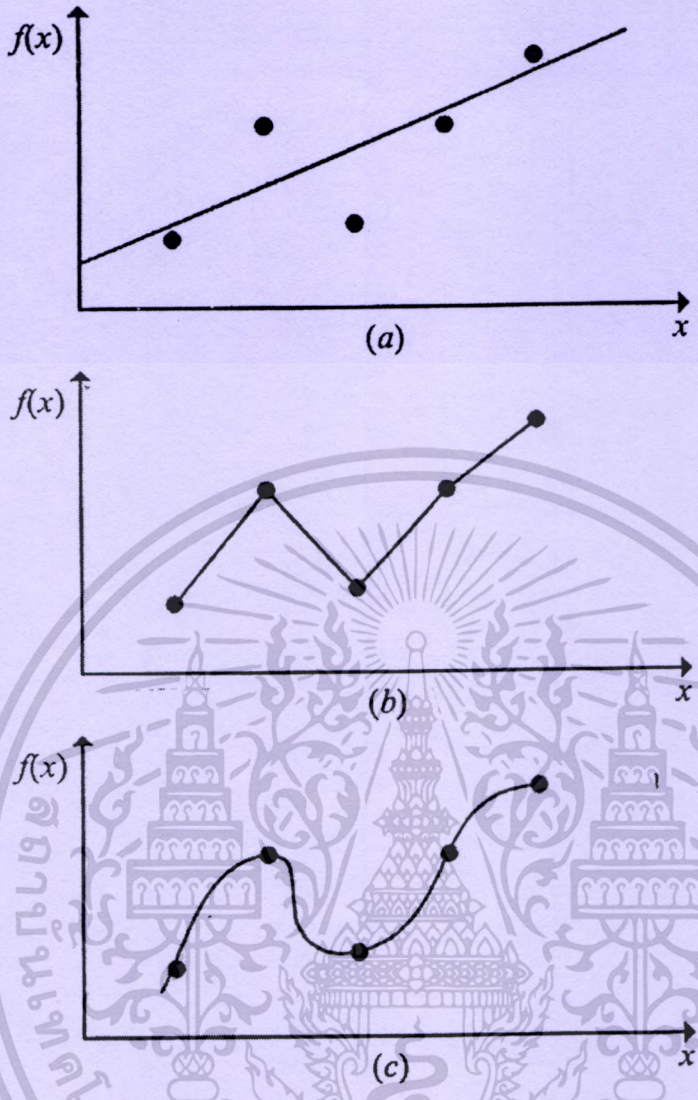
$f(t)$ = ค่าของฟังก์ชั่นแปรตามเวลา

T = คาบเวลาของ periodic function

ก.3 Curve Fitting

โดยปกติแล้วในการบันทึกข้อมูลที่เป็นข้อมูลต่อเนื่องข้อมูลที่ทำการบันทึกจะอยู่ในรูปแบบ discrete ดังนั้นจำเป็นต้องทำการปรับแต่ง curve ของข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม วิธีการในการปรับแต่ง curve ของข้อมูลให้เหมาะสมนั้นแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักได้แก่การทำ interpolation และการทำ least square regression รวมเรียกวิธีการทั้ง 2 วิธีการนี้ว่า curve fitting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก1 การปรับแต่ง curve ด้วยวิธีต่างๆ (a) least-square (b) linear interpolation (c) curvilinear interpolation

การปรับแต่ง curve ด้วยวิธี regression หรือการหาการถดถอยของ curve เป็นการหาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลวิธีหนึ่ง เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีการกระจายของข้อมูลมากในกรณีที่ข้อมูลที่ทำการบันทึกได้เป็นข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวน (noise) ดังนั้นแต่ละจุดของข้อมูลที่บันทึกได้อาจจะไม่ใช่ข้อมูลที่ถูกต้องก็ได้ ดังนั้นจึงต้องทำการหาแนวโน้มของข้อมูลโดยการหาสมการถดถอย (regression equation) ของข้อมูลดังกล่าวแล้วนำสมการที่ได้มาทำการพล็อตกราฟของข้อมูลนั้นๆการถดถอยนั้นมีอยู่หลายรูปแบบโดยแบ่งออกเป็น การถดถอยเชิงเดียว (simple regression), การถดถอยแบบเส้นตรง (multiple regression), และการถดถอยแบบเส้นโค้ง (curvilinear regression)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับแต่ง curve ด้วยวิธี interpolation กระทำโดยการลากเส้นผ่านจุดข้อมูลทุกจุด วิธีการ interpolation สามารถแบ่งแยกได้เป็นอีกหลายกรณี เช่น linear interpolation, curvilinear interpolation เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ ก1b และ ก1c จากรูปทั้งสองพบว่าหากข้อมูลที่ทำการบันทึกได้ทุกจุดไม่ใช่ค่าที่แท้จริงแล้ว (อาจเป็นสัญญาณรบกวนหรือความผิดพลาดจากการบันทึกข้อมูล) ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากวิธีนี้จะไม่ใช่ความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง ดังนั้นวิธี interpolation นี้จะเหมาะสมเฉพาะข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงสูงเท่านั้น

ก.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 ชุดและตัวแปรตาม 1 ชุด โดยอยู่ในรูปฟังก์ชั่น $Y=f(X)$ โดย X แทนตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ (independent variable) และ Y แทนตัวแปรตาม (dependent variable) ในกรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นเส้นตรงเรียกว่า การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (simple linear regression) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก1(a)

การถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression)เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 3 ชุดขึ้นไปโดยมรตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ 1 ชุดและตัวแปรตาม 2 ชุดขึ้นไป โดยรูปแบบของฟังก์ชั่นของการถดถอยเชิงซ้อนจะอยู่ในรูป $Y=f(X_1, X_2, X_3, ..., X_n)$ ในกรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นเส้นตรงเรียกว่า การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงซ้อน (multiple linear regression)

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

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้าที่ว่ากรณีที่ข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือการทดสอบข้อมูลที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อน (error) เกิดขึ้นทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามอาจไม่ใช่ความสัมพันธ์ที่ถูกต้องหรือทำให้ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเป็นสมการได้ ดังนั้นจึงต้องทำการหาแนวโน้มของความสัมพันธ์นั้น โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างแนวโน้มที่ทำการคำนวณได้กับข้อมูลที่ได้จากการบันทึกจริงมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งวิธีการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลโยที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อน (error) มีค่าน้อยที่สุดนี้เรียกว่าวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-squares method) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-squares method) มาใช้ในการหาสมการแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลต่างๆ

ก.4.1 การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (Simple Linear Regression)

ในการหาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีลักษณะการจัดเรียงข้อมูลเป็นเส้นตรงจะเรียกว่าการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (Simple Linear Regression) โดยมีสมการความสัมพันธ์ของข้อมูลของตัวแปรต้นและตัวแปรตาม $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2),..., (X_n, Y_n)$ เป็นดังนี้

$$y = a_0 + a_1 x + e \qquad (ก2)$$

โดยที่ a_0 = สัมประสิทธิ์ของสมการแทนจุดตัดแกน y

a_1 = สัมประสิทธิ์ของสมการแทนความชันของเส้นตรง

e = ความคลาดเคลื่อน (error) ระหว่างสมการถดถอยและข้อมูลจริง

จากสมการที่ ก2 ค่าความคลาดเคลื่อน (error) จะแทนผลต่างในแนวแกนของตัวแปรตาม โดยเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$e = y - a_0 - a_1 x \qquad (ก3)$$

จากสมการที่ ก3 สามารถแยกพจน์ทางด้านขวาของสมการออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่ได้จากการบันทึกจริงคือ y และส่วนที่เป็นสมการถดถอยคือ $a_0 + a_1 x$ ซึ่งมีลักษณะเป็นสมการเส้นตรงดังสมการที่ ก4

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x \qquad (ก4)$$

จากสมการที่ ก3 หนทางหนึ่งในการเลือกสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อที่นำมาใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามคือการทำให้ค่าความคลาดเคลื่อน (error) มีค่าน้อยที่สุด จากสมการที่ ก3 เมื่อแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของค่าความคลาดเคลื่อน (error) ในแต่ละจุดข้อมูลจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{i=1}^{n} e_i = \sum_{i=1}^{n} (y_i - a_0 - a_1 x_i) \qquad (ก5)$$

โดยที่ค่า n แทนจำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด จากสมการที่ ก5 พบว่าถ้ากำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่บันทึกได้กับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากสมการถดถอยมีค่าน้อยที่สุดนั้นยังไม่เพียงพอโดยพิจารณาจากรูปที่ ก2 (a)

จากรูปที่ ก2 (a) พบว่าเมื่อทำการ minimizes ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนให้มีค่าต่ำที่สุดแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะให้ความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดก็จริง แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนมีทั้งค่าบวกและค่าลบ ดังนั้นในกรณีของเส้นประแสดงให้เห็นถึงข้อเสียของวิธีนี้คือการให้ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเช่นกัน แต่ให้แนวโน้มที่ไม่ถูกต้อง

ในส่วนการ minimizes ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนดังแสดงในรูปที่ ก2 (b) มีสมการอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\sum_{i=1}^{n} |e_i| = \sum_{i=1}^{n} |y_i - a_0 - a_1 x_i| \qquad (ก6)$$

จากสมการที่ ก6 แสดงดังรูปที่ ก2b ซึ่งแสดงดังเส้นประทั้งสองเส้นแสดงให้เห็นว่าการฟิต curve ด้วยวิธี minimize ค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนจะให้เส้นแนวโน้มที่เหมาะสมมากกว่าหนึ่งเส้น

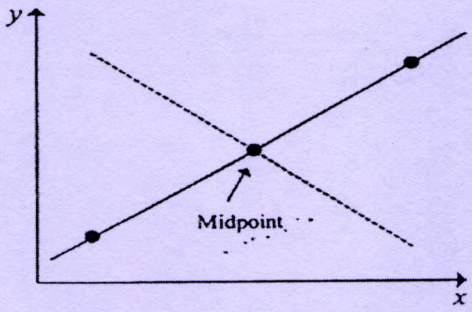
ส่วนวิธีการ minimax หรือการ minimizes ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากที่สุดนั้นเป็นการทำให้ระยะคลาดเคลื่อนระหว่างจุดข้อมูลที่มีการกระจายตัวออกห่างจากเส้นแนวโน้มมากที่สุดให้มีค่าน้อยที่สุดดังแสดงในรูปที่ ก2 (c) จากรูปดังกล่าว แนวเส้นประคือแนวเส้นแนวโน้มที่ทำการ minimax แล้วซึ่งปกติเส้นแนวโน้มที่แท้จริงควรจะเป็นเส้นทึบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากๆนั้น วิธี minimax จะให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจนัก

เพื่อที่จะกำจัดปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นจากการหาแนวโน้มของ curve ทั้ง 3 วิธี วิธีการที่เหมาะสมที่สุดคือการ minimizes ค่ากำลังสองของค่าคงามคลาดเคลื่อนโดยสมการจะอยู่ในรูปแบบดังนี้

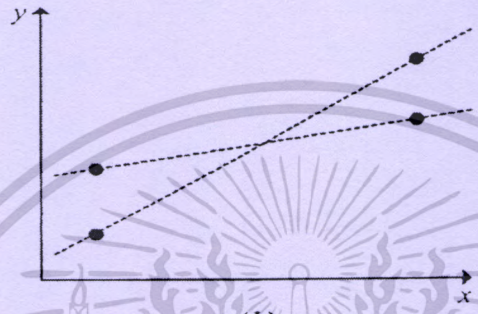
$$SSE = \sum_{i=1}^{n} e_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \hat{y}_i \right)^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - a_0 - a_1 x_i \right)^2 \qquad (ก7)$$

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

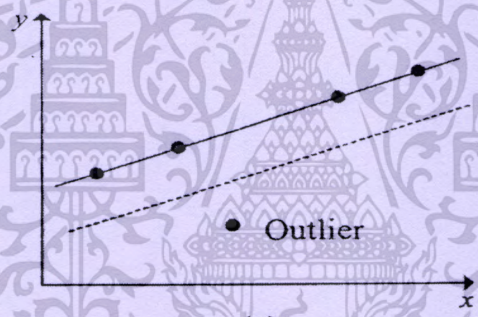
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



(c)

รูปที่ ก2 ตัวอย่างการปรับแต่ง curve ในลักษณะต่างๆ (a) minimizes ผลรวมของค่าคลาดเคลื่อน (b) minimizes ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (c) minimizes ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าสูงที่สุด

ดังที่กล่าวมาแล้วในสมการที่ ก3 สมการของแนวโน้มของข้อมูลจะอยู่ในรูปของ $a_0 + a_1 x$ ดังนั้นเป้าหมายที่สำคัญคือการหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 โดยการทำ partial derivative สมการที่ ก7 เทียบตัวแปรทั้งสองตัว

$$\frac{\partial SSE}{\partial a_0} = -2\sum(y_i - a_0 - a_1 x_i) \qquad \text{(ก8)}$$

$$\frac{\partial SSE}{\partial a_1} = -2\sum[(y_i - a_0 - a_1 x_i)x_i]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ ก8 เพื่อทำการหาค่าต่ำสุดดังนั้น derivative จะต้องเท่ากับ 0 ดังนั้นจะได้

$$0 = \sum y_i - \sum a_0 - \sum a_1 x_i \qquad (ก9)$$
$$0 = \sum y_i x_i - \sum a_0 x_i - \sum a_1 x_i^2$$

จากสมการที่ ก9 ค่า $\sum a_0$ มีค่าเท่ากับ na_0 ดังนั้นเมื่อทำการย้ายข้างสมการและจัดให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมจะได้

$$na_0 + \left(\sum x_i\right)a_1 = \sum y_i \qquad (ก10)$$
$$\left(\sum x_i\right)a_0 + \left(\sum x_i^2\right)a_1 = \sum x_i y_i \qquad (ก11)$$

จากสมการที่ ก10 และสมการที่ ก11 เมื่อทำการแก้สมการทั้งสองจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 ดังนี้

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \qquad (ก12)$$
$$a_1 = \frac{n\sum x_i y_1 - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2} \qquad (ก13)$$

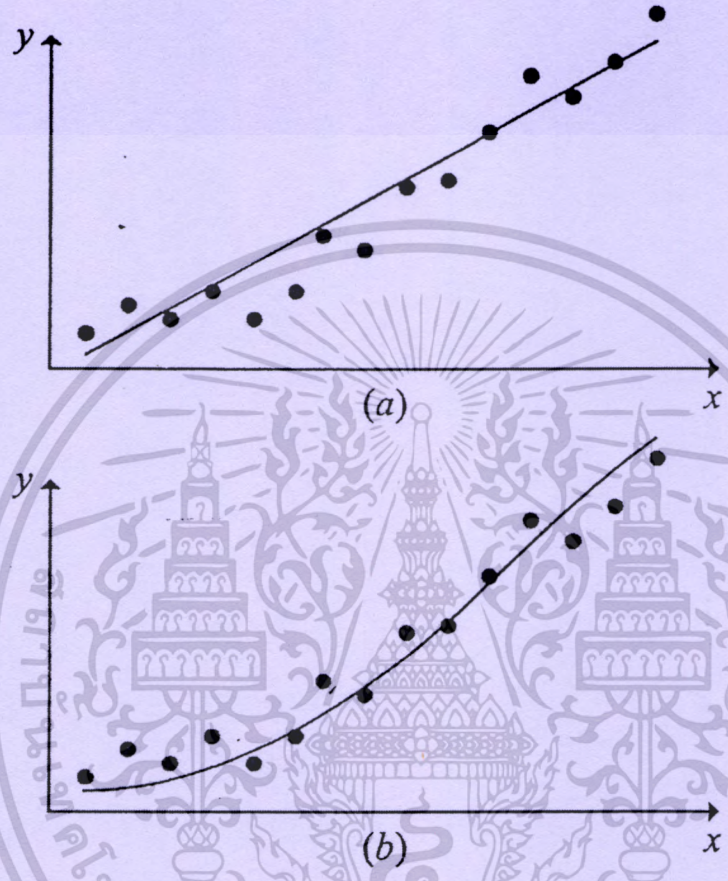
ก.4.2 การถดถอยแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียล (Polynomial Regression)

ข้อมูลทางด้านวิศวกรรมโดยทั่วไปแล้วส่วนมากจะไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นการหาแนวโน้มข้อมูลโดยแทนด้วยสมการเส้นตรงนั้นยังไม่เพียงพอกับการจัดเรียงตัวของข้อมูลดังแสดงในรูปที่ ก3 โดยจากรูปที่ ก3(a) กราฟแนวโน้มที่ได้จากสมการถดถอยแบบเส้นตรง (linear regression equation) ยังไม่เพียงพอกับการจัดเรียงของข้อมูลเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ ก3(b) ซึ่งเป็นกราฟแนวโน้มที่ได้จากสมการถดถอยแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียล (polynomial regression) ซึ่งการถดถอยที่เป็นในลักษณะเส้นโค้งแบบโพลีโนเมียลนี้เรียกว่า polynomial regression ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression) ดังตัวอย่างสมการโพลีโนเมียลกำลังสองคือ

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + e \qquad (ก14)$$
$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + e \qquad (ก15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ ก14 ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการโพลีโนเมียลกำลังสองเมื่อเปรียบเทียบกับสมการเชิงเส้นแบบหลายตัวแปรดังสมการที่ ก15 โดยที่ $x \equiv x_1$ และ $x^2 \equiv x_2$



รูปที่ ก3 เปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการถดถอย (a) linear regression, (b) polynomial regression

สมการโดยทั่วไปของเส้นโค้งโพลีโนเมียล

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots + a_m x^m + e \qquad (ก16)$$

m แทนเลขชี้กำลังสูงสุดของโพลีโนเมียลจากสมการที่ ก16 สมการถดถอยแบบโพลีโนเมียลคือ $a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots + a_m x^m$ ซึ่งค่ากำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในรูปแบบคล้ายกับกรณีเส้นตรง

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots + a_m x^m \qquad (ก17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ ก17 เมื่อพิจารณาที่เลขชี้กำลังของสมการโพลีโนเมียลพบว่าถ้าเลขชี้กำลังสูงของโพลีโนเมียลมีค่าเท่ากับ 1 แล้วสมการดังกล่าวจะกลายเป็นสมการถดถอยแบบเส้นตรงโดยทันที

จากสมการที่ ก16 ผลต่างกำลังสองของข้อมูลจริงและข้อมูลจากสมการถดถอยคือ

$$SSE = \sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \hat{y}_i\right)^2 = \sum_{i=1}^{n}\left(y - a_0 - a_1x_i - a_2{x_i}^2 - \ldots - a_m{x_i}^m\right)^2 \qquad (ก18)$$

ในการหาสัมประสิทธิ์ของสมการโพลีโนเมียลจะอยู่ในรูปแบบ

$$\begin{aligned}
\frac{\partial SSE}{\partial a_0} &= -2\sum\left(y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2{x_i}^2 - \ldots - a_m{x_i}^m\right)\\
\frac{\partial SSE}{\partial a_1} &= -2\sum x_i\left(y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2{x_i}^2 - \ldots - a_m{x_i}^m\right)\\
\frac{\partial SSE}{\partial a_2} &= -2\sum {x_i}^2\left(y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2{x_i}^2 - \ldots - a_m{x_i}^m\right) \qquad (ก19)\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
\frac{\partial SSE}{\partial a_m} &= -2\sum {x_i}^m\left(y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2{x_i}^2 - \ldots - a_m{x_i}^m\right)
\end{aligned}$$

จากสมการที่ ก19 กำหนดให้ผลการคำนวณหาสมการอนุพันธ์เท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อจัดรูปแบบสมการที่ ก19 ใหม่จะได้สมการที่ ก20

$$\begin{aligned}
(n)a_0 + \left(\sum x_i\right)a_1 + \left(\sum {x_i}^2\right)a_2 + \ldots + \left(\sum {x_i}^m\right)a_m &= \sum y_i\\
\left(\sum x_i\right)a_0 + \left(\sum {x_i}^2\right)a_1 + \left(\sum {x_i}^3\right)a_2 + \ldots + \left(\sum {x_i}^{m+1}\right)a_m &= \sum x_iy_i\\
\left(\sum {x_i}^2\right)a_0 + \left(\sum {x_i}^3\right)a_1 + \left(\sum {x_i}^4\right)a_2 + \ldots + \left(\sum {x_i}^{m+2}\right)a_m &= \sum {x_i}^2y_i \qquad (ก20)\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
\left(\sum {x_i}^m\right)a_0 + \left(\sum {x_i}^{m+1}\right)a_1 + \left(\sum {x_i}^{m+2}\right)a_2 + \ldots + \left(\sum {x_i}^{m+m}\right)a_m &= \sum {x_i}^my_i
\end{aligned}$$

จากสมการที่ ก20 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าคือ $a_0, a_1, a_2, \ldots, a_m$ เพื่อทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวสามารถทำได้โดยการแก้สมการ m ตัวแปรโดยจำนวนสัมประสิทธิ์จะขึ้นกับค่าเลขชี้กำลังสูงสุดของสมการโพลีโนเมียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4.3 การพิจารณาความเหมาะสมของสมการถดถอย

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

$$S_{y|x} = \sqrt{\frac{SSE}{n-(m+1)}} \qquad (ก21)$$

โดยที่ค่า n แทนจำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด, m แทนเลขชี้กำลังสูงสุดของสมการโพลีโนเมียลและค่า $n-(m+1)$ เรียกว่าระดับความเป็นอิสระ (degree of freedom) (ภาคผนวก ก) ซึ่งแทนจุดที่เป็นอิสระดังนั้นในกรณีที่เป็นสมการเส้รตรงค่า standard error of estimate จะมีค่าเท่ากับค่า standard deviation ของตัวอย่างของประชากรและจะมีค่าระดับความเป็นอิรสระเท่ากับ $n-2$

$$S_{y|x} = \sqrt{\frac{SSE}{n-2}} \qquad (ก22)$$

ในการพิจารณาค่า standard error of estimate ถ้าหากว่าค่าที่ได้มีค่าต่ำแสดงว่ามีการกระจายข้อมูลรอบเส้นสมการถดถอยต่ำ แต่หากว่าค่าที่ได้มีค่าสูงแสดงว่ามีการกระจายของข้อมูลรอบๆเส้นสมการถดถอยสูงเช่นกัน วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีหนึ่งในการพิจารณาความเหมาะสมในการเลือกสมการถดถอยเพื่อใช้ในการ fit curve

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

$$r^2 = \frac{SSY - SSE}{SSY} \qquad (ก23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ ก23 ค่า SSY คือค่า total sum of square of about the mean หรือ total unexplained variation ซึ่งค่า SSY มีรูปแบบสมการดังนี้

$$SSY = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \qquad (ก24)$$

ในส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSY และค่า SSE แสดงดังสมการ

$$(SSY - SSE) = \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2 \qquad (ก25)$$

ดังนั้นเมื่อจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบของค่าตัวแปรตาม y จะได้

$$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \qquad (ก26)$$

ดังนั้นค่า r^2 เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของค่า y จะได้

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})} \qquad (ก27)$$

ค่า r^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าค่า r^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 มากเท่าใดแสดงว่า curve ที่ได้จากสมการถดถอยนั้นมีความเหมาะสมในแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองชุดมาก แต่หากว่าค่า r^2 มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า curve ที่ได้จากสมการถดถอยดังกล่าวไม่เหมาะสมสำหรับการแสดงแนวโน้มของข้อมูลนั้นๆ

ในกรณีที่สมการถดถอยเป็นสมการโพลีโนเมียล เมื่อต้องการหาสมการโพลีโนเมียลที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการ fit curve นั้น การใช้ค่า r^2 ยังไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบเพื่อยืนยันความเหมาะสมของสมการถดถอยแบบโพลีโนเมียลที่นำมาใช้ในการแสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ของข้อมูลดังกล่าวเพิ่มขึ้น โดยการทำ Partial F Test มีวิธีการทดสอบดังนี้

จากสมการที่ ก25 กำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{regression } SS = (SSY - SSE) = \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \qquad (ก28)$$

เรียกสมการที่ ก28 ว่า regression sum of square ในการพิจารณาหาค่าดีกรีสูงสุดที่เหมาะสมที่จะใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองชุด โดยการเพิ่มดีกรีของโพลีโนเมียลไปครั้งละ 1 ดีกรีและทำการทดสอบว่าดีกรีที่เพิ่มขึ้นมามีนัยสำคัญมากกว่ากรณีไม่เพิ่มดีกรีหรือไม่ โดยในการทำการทดสอบ Partial F Test นี้ต้องทำการหาค่า extra sum of square โดยค่าดังกล่าวอยู่ในรูป

$$SS\left(x^{m+1}\middle|x,x^2,...,x^m\right) = SS\left(x,x^2,...,x^m,x^{m+1}\right) - SS\left(x,x^2,...,x^m\right) \qquad (ก29)$$

จากสมการที่ ก29 พจน์ทางด้านซ้ายของสมการ $SS\left(x^{x+1}\middle|x,x^2,...,x^m\right)$ 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

$$MSresidual\left(x,x^2,...,x^m\right) = \frac{residualSS\left(x,x^2,...,x^m,x^{m+1}\right) + SS\left(x^{m+1}\middle|x,x^2,...,x^m\right)}{df_{res}+1} \qquad (ก30)$$

df_{res} = ค่าระดับความเป็นอิสระของ residual

จากนั้นทำการทดสอบหาค่า F โดยสมการ

$$F\left(x^{m+1}\middle|x,x^2,...,x^{m+1}\right) = \frac{SS\left(x^{m+1}\middle|x,x^2,...,x^m\right)/1}{MSresidual\left(x,x^2,...,x^m,x^{m+1}\right)} \qquad (ก31)$$

จากสมการที่ ก31 นำค่า F ที่ได้มาทำการทดสอบสมมติฐาน (hypothesis test) โดยขั้นแรกต้องกำหนดช่วงความเชื่อมั่น (confident interval) ไว้และตั้งสมมติฐานหลัก H_0 และตั้งสมมติฐานทางเลือก H_1 ดังนี้

$H_0 : x^{m+1}$ = ไม่มีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มเข้าไปในสมการโพลีโนเมียล

$H_1 : x^{m+1}$ = มีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มเข้าไปในสมการโพลีโนเมียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดสอบโดยการตรวจสอบค่าความน่าจะเป็นโดยพิจารณาจากพื้นที่ใต้กราฟของเส้นโค้งการกระจายแบบ F (F distribution curve)

โดยปกติแล้วกำหนดช่วงความเชื่อมั่นไว้ 95% ซึ่งถ้าหากว่าค่าความน่าจะเป็นที่ได้มีค่าน้อยกว่า 5% หรือน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า H_1 เป็นจริงแสดงว่า x^{m+1} มีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มเข้าไปในสมการโพลีโนเมียล แต่ถ้าค่าความน่าจะเป็นที่ได้มีค่ามากกว่า 5% หรือมากกว่า 0.05 แสดงว่า H_0 เป็นจริงแสดงว่า x^{m+1} ไม่มีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มเข้าไปในสมการโพลีโนเมียล

ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ถ้าทำการเพิ่มเลขชี้กำลังเข้าไปจนกระทั่งค่าความน่าจะเป็นมากกว่า 0.05 แล้วให้หยุดและเลขชี้กำลังสูงสุดของสมการจะเป็นค่าสุดท้ายที่ให้ค่าความน่าจะเป็นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05

ก.4.4 การถดถอยแบบเส้นโค้งที่สามารถเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้นได้

นอกจากการถดถอยแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียล (polynomial regression) ยังมีสมการเส้นโค้งในรูปแบบอื่นซึ่งโดยรูปแบบที่นำเสนอนี้จะสามารถเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้ ยกตัวอย่างเช่น exponential equation, power equation, และ saturation-growth-rate equation ดังแสดงในสมการที่ ก23, ก33, และ ก34 ตามลำดับ

$$y = ae^{bx} \tag{ก32}$$

$$y = ax^{b} \tag{ก33}$$

$$y = a\frac{x}{b+x} \tag{ก34}$$

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีสมการที่ต้องใช้สมการในรูปแบบของสมการที่ ก32 คือสมการที่ ก12 และ ก13 จากสมการที่ ก32 การที่จะจัดรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นสามารถทำได้โดยการหาค่าลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm) ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\ln y = \ln a + bx \ln e \tag{ก35}$$

จากสมการที่ ก35 ค่า $\ln e = 1$ ดังนั้นสมการที่ 4.35 จะกลายเป็น

$$\ln y = \ln a + bx \tag{ก36}$$

จากสมการที่ ก35 และ ก36 เมื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ ก4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังทำการแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงแล้วจากนั้นทำการปรับแต่ง curve ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-square method) โดยทำการหาสมการถดถอยเส้นตรงดังแสดงในหัวข้อที่ ก.4.1 ซึ่งจะได้สมการอยู่ในรูป

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x \qquad \text{(ก37)}$$

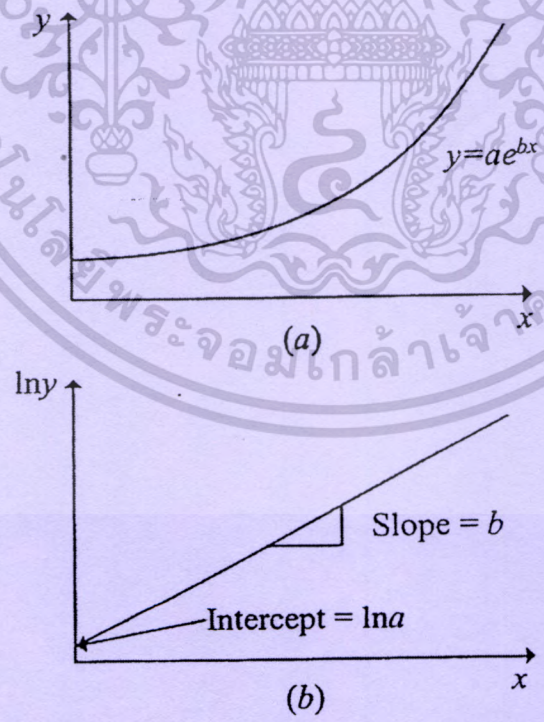
จากนั้นใช้ least-square method ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 เมื่อได้ค่า a_0 และ a_1 นำค่าดังกล่าวไปแทนในสมการที่ ก36

$$a_0 = \ln a \qquad \text{(ก38)}$$

$$a_1 = b \qquad \text{(ก39)}$$

$$\hat{y} = \ln y \qquad \text{(ก40)}$$

จากนั้นทำการหาฟังก์ชันเอกโปเนนเชียลของสมการที่ ก36 จำด้สมการแนวโน้มของข้อมูลดิบที่ต้องการฟิต



รูปที่ ก4 การแปลงรูปสมการจากสมการเอกซ์โปเนนเชียล (a) เป็นสมการเส้นตรง (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. เจตนิพัทธ์ เจริญสุข, วีระศักดิ์ วงศ์วิวัติ และ พิชิต ลำยอง "การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์" ประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 28 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 20-21 ตุลาคม 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์

Torque-Speed Characteristics Evaluation of 1 Phase Induction Motor Using an Acceleration Method

เจตนิพัทธ์ เจริญสุข วีระกักดิ์ วงศ์วิวัฒ และพิชิต ล้ายอง
ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทร/โทรสาร 0-2326-4175 E-mail:Jetnipatking@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส ตลอดย่านความเร็วตั้งแต่มอเตอร์หยุดนิ่งจนกระทั่งความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส โดยอาศัยวิธีการเร่งความเร็ว ซึ่งระบุไว้ใน IEEE standard 114-2001 [1] โดยเทคนิคการเพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วด้วยวิธีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่มอเตอร์โดยดัปปลิ้งล้อช่วยแรงเข้ากับเพลาของมอเตอร์โดยตรง ซึ่งได้ทำการทดสอบกับสปลิตเฟสมอเตอร์และคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ โดยผลการทดสอบจะแสดงผลของแรงบิดและกระแสไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่างๆ ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างสปลิตเฟสมอเตอร์และคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ โดยผลที่ได้สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ ที่เหมาะสมในการเลือกใช้งาน

คำสำคัญ: คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ, มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Abstract

This paper presents a method to evaluate torque-speed characteristics of single phase induction motors from a standstill to a speed near a synchronous speed using an acceleration method. This method is specified in IEEE standard 114-2001 [1]. A technique to increase a starting time using a flywheel direct coupled to the shaft of single phase induction motors is proposed. The split phase motors and the capacitor start motors are tested. The test results are shown torque and current at various speed. Which compare the split phase motors and the capacitor start motors. Finally, the appropriate of torque-speed characteristics for the operation are illustrated.

Keyword: Torque-Speed Characteristics, Induction Motor

1. บทนำ

ในบ้านเรือนที่พักอาศัยทั่วไป เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังส่วนมากจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ซึ่งการเลือกใช้มอเตอร์ทั้งขนาดและชนิดยังมีอีกมากที่เลือกใช้อย่างไม่เหมาะสมทำให้สิ้นเปลืองพลังงานอย่างมาก ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส 2 ชนิด คือ แบบสปลิตเฟสมอเตอร์และคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ ชนิดละ 2 ขนาด คือ 1/4 แรงม้าและ 1/2 แรงม้า โดยใน IEEE 114-2001 ได้ระบุไว้ 4 วิธี ได้แก่ 1.วิธีวัดค่าเอาท์พุท (output measurement) 2.วิธีเร่งความเร็ว (acceleration) 3.วิธีวัดค่าอินพุท (input measurement) 4.วิธีวัดค่าโดยตรง (direct measurement) ซึ่งในบทความนี้ได้เสนอวิธีที่ 2 คือ วิธีเร่งความเร็ว (acceleration) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้เวลาในการทดสอบนานและค่าใช้จ่ายไม่สูง

2. ทฤษฎีการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1 การคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในบทความนี้นำเสนอการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์ (acceleration method) ซึ่งจะทำการบันทึกข้อมูลในช่วงที่มอเตอร์ทำการเร่งความเร็วตั้งแต่สภาวะโรเตอร์หมุนกลับทิศจนถึงความเร็วเข้าใกล้ซิงโครนัส [2] โดยการทดสอบจะทำการบันทึกข้อมูลความเร็วรอบ, แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าและเวลาในการเร่งความเร็ว

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้กับมอเตอร์เพื่อเพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่จะเพิ่มให้กับมอเตอร์มีระบุไว้ใน IEC standard 34-12 [3] เมื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยภายนอกให้กับมอเตอร์แล้วสมการที่ใช้คำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์จะได้เป็นดังสมการที่ 1

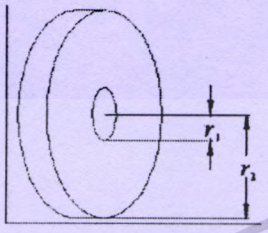
$$T_m = (J_m + J_{ext})\frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \qquad (1)$$

T_m = แรงบิดของมอเตอร์ (N.m)
$D\omega_r$ = แรงบิดจากความหนืด (N.m)
J_m = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ ($kg.m^2$)
J_{ext} = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยภายนอกที่เพิ่มให้มอเตอร์ ($kg.m^2$)
ω_r = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยภายนอกให้แก่มอเตอร์

ในการทดสอบได้กำหนดรูปร่างของวัตถุที่ใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่มอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของล้อช่วยแรง

โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงดังรูปจะแสดงดังสมการที่ 2 [4]

$$J_{ext} = \frac{1}{2} m(r_1^2 + r_2^2) \qquad (2)$$

m = มวลของวัตถุ (kg)

r_1 = รัศมีภายในของวัตถุ (m)

r_2 = รัศมีภายนอกของวัตถุ (m)

2.3 วิธีการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่โรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด

วิธีการในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ สามารถคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) ซึ่งขั้นตอนการทดสอบกระทำตาม IEC standard 34-2 [5] โดยทำการเดินเครื่องมอเตอร์ที่สภาวะคงตัว (steady state) และมีการคัปปลิ้งล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่าหนึ่งเข้าที่เพลามอเตอร์ จากนั้นทำการปลดแหล่งจ่ายออก แล้วทำการบันทึกความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลง จนกระทั่งความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงถึงประมาณ 95% ของความเร็วพิกัด ภายหลังจากทำการปลดแหล่งจ่ายออกจากขั้วของสเตเตอร์ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ (T_m) จะมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นสมการแรงบิดในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลงเป็นดังนี้

$$(J_m + J_1)\frac{d\omega_{r1}}{dt} + D\omega_{r1} = 0 \qquad (3)$$

$$(J_m + J_2)\frac{d\omega_{r2}}{dt} + D\omega_{r2} = 0 \qquad (4)$$

J_m = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์ (kg-m^2)

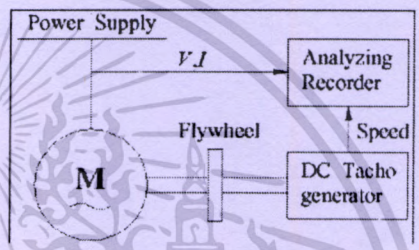
J_1, J_2 = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงตัวที่ 1 และ 2 (kg-m^2)

$D\omega_r$ = แรงบิดเนื่องจากความหนืด (N-m)

3. การทดลองและผลการทดลอง

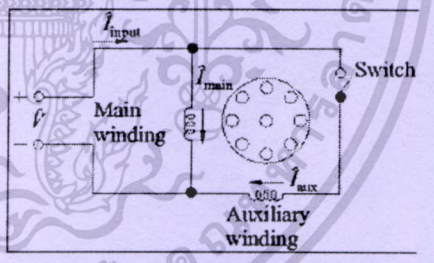
3.1 วิธีการทดลอง

ได้ทำการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส ขนาด 1/4 และ 1/2 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็กชนิดสปลิตเฟสมอเตอร์และคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ โดยใช้ DC Tachogenerator ในการวัดความเร็วของมอเตอร์และใช้ Analyzing Recorder ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น AR1100A ในการบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้า,กระแสไฟฟ้าขดลวดหลัก (main winding current), กระแสไฟฟ้าขดลวดช่วย (auxiliary winding current), กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า (input current) และความเร็วมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2

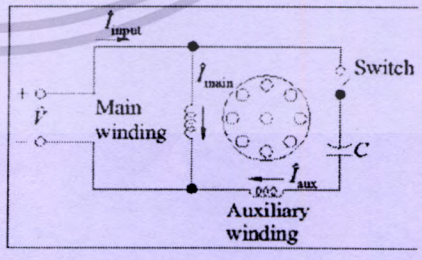


รูปที่ 2 แผนผังการทดสอบ

ในส่วนของรูปที่ 3 และ 4 จะแสดงวงจรการต่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่างๆ ของสปลิตเฟสมอเตอร์และคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ โดยจะแตกต่างตรงที่สปลิตเฟสมอเตอร์จะไม่มีคาปาซิเตอร์ต่ออนุกรมกับขดลวดช่วย



รูปที่ 3 วงจรของสปลิตเฟสมอเตอร์

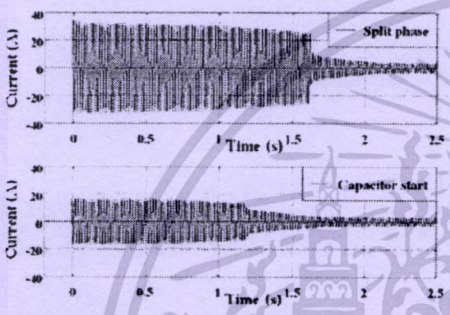


รูปที่ 4 วงจรของคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์

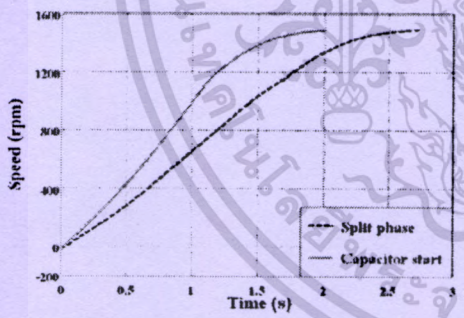
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะที่แตกต่างของสปลิตเฟสมอเตอร์กับคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ โดยผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของสปลิตเฟสมอเตอร์จะมีค่าสูงและยาวนานกว่าชนิดคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์มากดังแสดงในรูปที่ 5 และจะเห็นว่าคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์จะใช้เวลาในการเร่งความเร็วจนเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัสสั้นกว่าสปลิตเฟสมอเตอร์ ณ ที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเดียวกัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 6

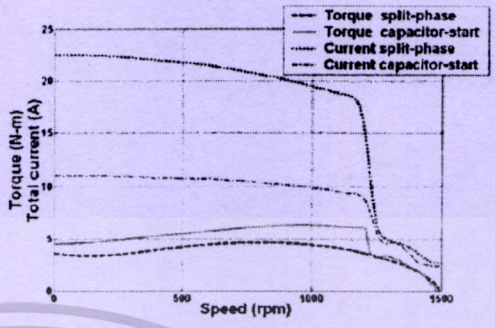


รูปที่ 5 กราฟกระแสไฟฟ้าป้อนเข้า-เวลา ของสปลิตเฟสมอเตอร์และคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ ขนาด 1/4 แรงม้า



รูปที่ 6 กราฟความเร็วรอบ-เวลา ของสปลิตเฟสมอเตอร์และคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ ขนาด 1/4 แรงม้า

จากรูปที่ 6 ผลของอัตราเร่งจะนำไปคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามสมการที่ 1 ผลจากการคำนวณจะได้กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งได้แสดงผลของกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าเปรียบเทียบกับแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ณ ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 7 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกระแสป้อนเข้า-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า

ในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 นำเสนอผลการเปรียบเทียบระหว่างสปลิตเฟสมอเตอร์กับคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ ขนาด 1/4 แรงม้า และ 1/2 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบหากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ โดยแสดงมุมต่างเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้าขดลวดหลักกับกระแสไฟฟ้าขดลวดช่วย และพลังงานกับเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจนความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส รวมถึงแรงบิดขณะสตาร์ท ณ ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับ 0 ที่ได้จากการทดสอบเร่งความเร็ว (Acc) และการทดสอบล็อคโรเตอร์ (Lock)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบมอเตอร์ ขนาด 1/4 แรงม้า

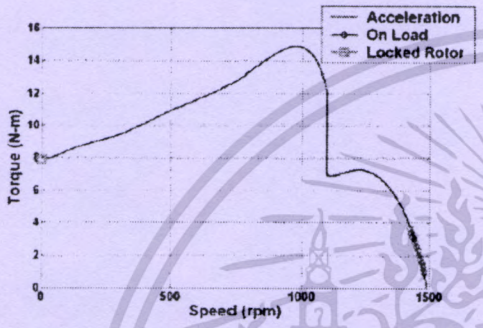
ชนิดมอเตอร์	มุมระหว่าง I_{main} กับ I_{aux}	เวลา (s)	พลังงาน (J)	แรงบิด (N-m)	
				Acc.	Lock.
Split phase	23.4°	2.34	4767.6	3.59	3.75
Capacitor start	80.1°	1.60	2767.5	4.5	4.41

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบมอเตอร์ ขนาด 1/2 แรงม้า

ชนิดมอเตอร์	มุมระหว่าง I_{main} กับ I_{aux}	เวลา (s)	พลังงาน (J)	แรงบิด (N-m)	
				Acc.	Lock.
Split phase	18.54°	3.11	12351.7	7.13	6.77
Capacitor start	111.6°	2.53	6464.8	8.01	7.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบโดยวิธีเร่งความเร็วมอเตอร์จึงทำการทดสอบขับภาระเพื่อเปรียบเทียบแรงบิด-ความเร็วรอบ ในช่วงที่มอเตอร์ไม่มีภาระจนถึงความเร็วที่มอเตอร์ขับภาระเต็มพิกัด และยังได้ทำการทดสอบล็อคโรเตอร์ที่พิกัดแรงดัน เพื่อเปรียบเทียบแรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์ โดยได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 และผลการทดสอบล็อคโรเตอร์แสดงในช่วงหลังของตารางที่ 1 และ 2



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ ขนาด 1/2 แรงม้า

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส ชนิดสปลิตเฟสมอเตอร์และคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์โดยวิธีเร่งความเร็วมอเตอร์ จากผลการทดสอบแรงบิดของสปลิตเฟสมอเตอร์จะต่ำกว่าคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์แต่กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าของสปลิตเฟสมอเตอร์จะสูงกว่าคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์มากเป็นผลเนื่องมาจากค่าคาปาซิเตอร์ที่ต่ออนุกรมกับขดลวดช่วยของคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ทำให้มุมต่างเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้าขดลวดหลักกับกระแสไฟฟ้าขดลวดช่วยมีค่าเข้าใกล้ 90° มากกว่าสปลิตเฟสมอเตอร์ โดยได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และ 2 และจากตารางจะเห็นว่าสปลิตเฟสมอเตอร์ใช้พลังงานในช่วงสตาร์ทมากเป็นผลทำให้เกิดความร้อนภายในมอเตอร์ในช่วงสตาร์ทมาก นั่นหมายถึงอายุการใช้งานจะสั้นกว่าชนิดคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์

จากผลการทดสอบขับภาระที่ภาระต่างๆในรูปที่ 8 และผลการทดสอบล็อคโรเตอร์ที่พิกัดแรงดันในตารางที่ 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วมอเตอร์มีความแม่นยำและเวลาที่ใช้ไม่มากจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้วิธีหนึ่ง

เอกสารอ้างอิง

[1] IEEE Standard 114-2001, IEEE Standard Test Procedure for Single-Phase Induction Motor

[2] Warachart Sae-kok, Pichit Lumyong, "Characteristics Evaluation of 3 Phase Induction Motors Based on an Accelertion Method with Increasing Moment of Inertia Techique" Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003 IEEE International Symposium on Aug. 2003 Page(s):93 – 98

[3] IEC Standard 34-12 1980 Part 12 : Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors for voltages up to and including 660 V

[4] JAMES S.WALKER "PHYSICS" Second Edition Pearson Education, Inc

[5] IEC Standard 34-2 1982 Part 2 : Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles)

[6] วรชาติ แซ่ก๊กและพิชิต ลำยอง "การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์" การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 199-204, พฤศจิกายน 2544

[7] Sae-kok W. Lumyong P., "Acceleration Test for Small Three-Phase Integral Horsepower Induction Motor-Techniques, Limitation, and Problems of the Test and Interpretation of the Results" Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. The Fifth International Conference on Volume 1, 17-20 Nov. 2003 Page(s):502 - 507

[8] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D.Umans "Electric Machinery" Sixth Edition Mcgraw-Hill, 2003

เจตนิพัทธ์ เจริญสุข สำเร็จการศึกษา วศ.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ทำงานวิจัยด้านการแปรรูปพลังงานและ เครื่องจักรกลไฟฟ้า

วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒ สำเร็จการศึกษา วศ.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและรองคณบดีฝ่ายกิจการนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. โดยทำงานวิจัยทางด้านการแปรรูปพลังงาน, เครื่องจักรกลไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

พิชิต ลำยอง สำเร็จการศึกษา วศ.บ. และวศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและหัวหน้าศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. โดยทำงานวิจัยทางด้านการแปรรูปพลังงาน, เครื่องจักรกลไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายเจตนิพัทธ์ เจริญสุข เกิดเมื่อวันที่ 6 มีนาคม พ.ศ.2524 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547 โดยในปี พ.ศ. 2548 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิจัย สังกัดศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้