

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ โดยใช้เทคนิคของ

โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

INERTIA TECHNIQUE FOR EVALUATION TORQUE-SPEED CHARACTERISTICS OF SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR



โดย

นางสาวปิ่นจิตา

วงศ์ชาติ

นายปิยะณัฐ

วิริยะสกล

นายพงศกร

กฤตลักษณ์ธารี

นายไพฑูณ

หาคำ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิชิต ล้ายอง

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... **61855**

วัน,เดือน,ปี..... **2 4 ก.ค. 2549**

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ โดยใช้เทคนิคของ โมเมนต์ความเฉื่อย
ของมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

INERTIA TECHNIQUE FOR EVALUATION TORQUE-SPEED
CHARACTERISTICS OF SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR

ผู้จัดทำ

1. นางสาว ปิณฑิตา วงศ์ชาติ รหัสประจำตัว 44010298
2. นาย ปิยะณัฐ วิริยะ สกกล รหัสประจำตัว 44010303
3. นาย พงสกร กฤตลักษณ์ธารี รหัสประจำตัว 44010310
4. นาย ไพฑูรย์ หาดคำ รหัสประจำตัว 44010350



(รศ. พิฑิต คำทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบโดยใช้เทคนิค
ของโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

นางสาวปัทมา วงศ์ชาติ 44010298

นายปิยะณัฐ วิริยะสกุล 44010303

นายพงศกร กฤตลักษณ์ธารี 44010310

นายไพฑูณ หาดคำ 44010350

รศ.พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอเทคนิคในการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะแรงบิด - ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสด้วยวิธีเร่งความเร็วซึ่งอ้างอิงตาม IEEE Standard 114-2001 ซึ่งวิธีการทดสอบกระทำโดยการสตาร์ทมอเตอร์ที่อยู่ในสภาวะไร้ภาระ (no-load) ด้วยวิธีสตาร์ทตรง (direct on-line starting) และทำการบันทึกค่าแรงดัน , กระแส , ความเร็วรอบ และเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากความเร็วรอบศูนย์ถึงความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซึ่งโครน์สในสภาวะคงตัว (steady state) และนำข้อมูลความเร็วรอบมาทำการคำนวณหาค่าแรงบิดต่อไป ในการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของสถานะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าหมดไป ดังนั้นปริญญานิพนธ์นี้จึงนำเสนอเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ โดยการนำลวดช่วยแรงมาทำการค้ำปลิงกับเพลลาของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการเร่งความเร็วนานขึ้น ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ต่าง ๆ ได้แก่ กระแส-เวลา , อัตราเร็วเชิงมุม-เวลา , แรงบิด-เวลา , กระแส-ความเร็วรอบ และ แรงบิด-ความเร็วรอบ ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เพื่อหาแนวโน้มของข้อมูลของค่ายังผล (rms) ของกระแสและแนวโน้มของอัตราเร็วเชิงมุม ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบ จะถูกนำมาพิจารณาร่วมกับกราฟที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์, ค่าแรงบิดที่ได้จากการทดสอบภาระและการทดสอบสื่อกโรเตอร์เพื่อเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือได้ของผลการทดลอง ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง

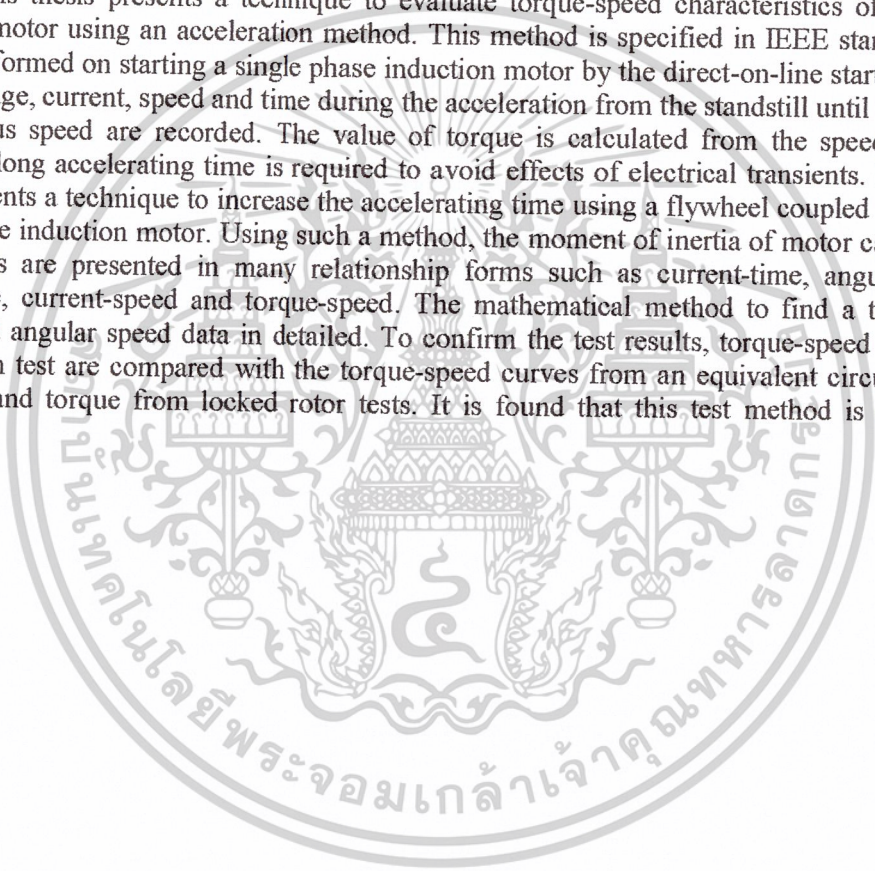
Inertia Technique for Evaluation Torque-Speed Characteristics of Single Phase Induction Motor

Pantita Wongchalee
Piyanat Viriyasakol
Pongsakorn Krittaluktaree
Paitoon Hartkam
Assoc. Prof. Pichit Lumyong

Advisor

ABSTRACT

This thesis presents a technique to evaluate torque-speed characteristics of a single phase induction motor using an acceleration method. This method is specified in IEEE standard I14-2001. Test is performed on starting a single phase induction motor by the direct-on-line starting at a no-load state. Voltage, current, speed and time during the acceleration from the standstill until the speed near a synchronous speed are recorded. The value of torque is calculated from the speed data. For this method, a long accelerating time is required to avoid effects of electrical transients. In addition, this thesis presents a technique to increase the accelerating time using a flywheel coupled to the shaft of a single phase induction motor. Using such a method, the moment of inertia of motor can be increased. Test results are presented in many relationship forms such as current-time, angular speed-time, torque-time, current-speed and torque-speed. The mathematical method to find a trend of an rms current and angular speed data in detailed. To confirm the test results, torque-speed curves from an acceleration test are compared with the torque-speed curves from an equivalent circuit, torque from load tests and torque from locked rotor tests. It is found that this test method is convenient and reasonable.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ รศ. พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณที่ ๆ เจ้าหน้าที่ห้องทดลอง ERML ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยเฉพาะคุณเจตนิพัทธ์ เจริญสุข ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้ความสะดวก ให้คำแนะนำและความรู้ความเข้าใจในภาคปฏิบัติเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งหากไม่ได้รับความเอื้อเฟื้อจากที่ ๆ แล้วปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คงสำเร็จลงไม่ได้

ขอขอบคุณ คุณไพสิฐ อภาสิวะ ที่ได้ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในส่วนของโปรแกรมการหาค่า rms หากปราศจากคุณ ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คงต้องล่าช้าไปอีกนาน

ขอบคุณเพื่อน ๆ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกคน ที่ทั้งให้คำปรึกษาและให้ความสะดวกต่าง ๆ จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จออกมาได้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้สมาชิกในกลุ่มทุกคนมีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ สมาชิกในกลุ่มทุกคนขอระลึกในพระคุณอันสูงสุดประมาธ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย	2
1.6 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส	4
2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว	4
2.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (Single phase Induction Motor : SPIM)	4
2.1.1.1 สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ 1 เฟส	4
2.1.1.2 ทฤษฎีสถาปัตยกรรมแม่เหล็กหมุนคู่ (Double revolving field theory)	5
2.2 ชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	10
2.2.1 มอเตอร์แบบแยกเฟส (Split Phase Motor)	10
2.2.2 มอเตอร์ชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor – start Motor)	10
2.2.3 มอเตอร์ชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Run Motor)	11
2.2.4 มอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor – Start Capacitor – Run Motor)	12
2.2.5 มอเตอร์แบบบังขั้ว (Shaded pole Motor)	12
2.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	13
2.3.1 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทาง	13
2.3.2 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลย์โดยประมาณ	16
2.3.2.1 No-load, Locked Rotor Tests	16

IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

2.3.2.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์	17
บทที่ 3 การหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	19
3.1 หลักการในการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด - ความเร็วรอบและการคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	19
3.2 เทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	19
3.3 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้ในการทดสอบ	20
3.4 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	21
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	22
4.1 บทนำ	22
4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	22
4.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส (1 Phase Induction Motor)	22
4.2.2 DC Tachogenerator	23
4.2.3 สล้อช่วยแรง (Flywheel)	24
4.2.4 Analyzing Recorder	25
4.2.5 แท่นทดสอบสำหรับมอเตอร์	25
4.2.6 Digital Power Meter	26
4.2.7 แท่นทดสอบวิธี Load Test สำหรับมอเตอร์	26
4.3 วิธีการทดสอบ	27
4.3.1 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation Test)	27
4.3.2 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration Test)	28
4.3.3 การทดสอบภาระของมอเตอร์ (Load Test)	28
4.3.4 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้หลักการ Double Revolving Field Theory	28
4.4 ผลการทดสอบ	28
4.4.1 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation Test)	28
4.4.2 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration Test)	34
4.4.2.1 รูปคลื่นกระแสของมอเตอร์ทั้ง 2 ชนิดในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว	34
4.4.2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า rms ของกระแส และ เวลาในมอเตอร์เร่งความเร็ว	36
4.4.2.3 การวิเคราะห์เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส	39
4.4.2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุม และ เวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วพร้อมกับกราฟของกระแสคลวดช่วย	48

V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

4.4.2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-เวลาเปรียบเทียบกับ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสขดลวดหลัก-เวลา และ กระแสของขดลวดช่วย-เวลา	54
4.4.2.6 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ และ กราฟคุณลักษณะกระแสขดลวดหลัก และ ขดลวดช่วย-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส	64
4.4.3 การทดสอบภาระของมอเตอร์ (Load Test)	66
4.4.4 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์	68
บทที่ 5 บทสรุป	73
บรรณานุกรม	76



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
4-1 พิกัดต่าง ๆ ของมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ	23
4-2 พิกัดต่าง ๆ ของมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ	23
4-3 มวลของล้อช่วยแรงและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ	24
4-4 มวลของล้อช่วยแรงและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ	24
4-5 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของมอเตอร์ ขนาด 1/2 แรงม้า	29
4-6 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของมอเตอร์ ขนาด 1/4 แรงม้า	29
4-7 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า	67
4-8 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า	67
4-9 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า	67
4-10 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า	68
4-11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสทุกขนาดที่ทำการทดสอบ	68
4-12 แสดงค่าสมรรถภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสทุกขนาดที่ทำการทดสอบ	68
4-13 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ parameter test ของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า	69
4-14 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ parameter test ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า	69
4-15 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ parameter test ของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า	69
4-16 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ parameter test ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า	70
4-17 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test ของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า	70
4-18 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า	70
4-19 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test ของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า	71

4-20 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ load test และ acceleration test
ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า

71



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้าที่
2-1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	5
2-2 การสั้น (หรือการกระเพื่อม) ของสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กหมุน	7
2-3 ภาพตัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	7
2-4 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุน ไปข้างหน้าและถอยหลัง	8
2-5 วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์	8
2-6 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว ค่าจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว จากการเปลี่ยนแปลง ของรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กหมุน ไปข้างหน้าและถอยหลัง	9
2-7 รูปคลื่นแรงดัน กระแส และกำลัง ไฟฟ้าของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเฟสเดียว	9
2-8 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดขดลวดแยก	10
2-9 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ	11
2-10 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ	11
2-11 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดเริ่มต้นหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ	12
2-12 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบบังขั้ว	13
2-13 สนามแม่เหล็กหมุน ไปข้างหน้าและถอยหลัง	13
2-14 วงจรสมมูลย์อย่างง่าย	16
2-15 วงจรสมมูลย์ขณะ โรเตอร์หมุนที่สภาวะ no-load ($s=0$)	16
2-16 วงจรสมมูลย์ขณะมอเตอร์อยู่หนึ่งที่สภาวะ locked-rotor ($s=1$)	17
3-1 รูปทรงของวัตถุที่ใช้สำหรับเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์	20
4-1 มอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ	22
4-2 มอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ	22
4-3 DC Tachogenerator ที่ใช้ในการทดสอบ	24
4-4 ล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ	25
4-5 Analyzing Recorder ที่ใช้ในการทดสอบ	25
4-6 แท่นสำหรับทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ	26
4-7 Digital power meter ที่ใช้ในการทดสอบ	26
4-8 แท่นสำหรับการทดสอบภาระของมอเตอร์	26
4-9 ไคอะแกรมการต่อวงจรสำหรับทดสอบมอเตอร์	27
4-10 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการ ทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
4-11 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m ²	30
4-12 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m ²	30
4-13 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m ²	31
4-14 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m ²	31
4-15 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m ²	32
4-16 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m ²	32
4-17 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m ²	33
4-18 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน	34
4-19 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน	35
4-20 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน	35
4-21 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน	35
4-22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.05973 kg-m ²	36
4-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m ²	36
4-24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m ²	36

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
4-25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.05973 kg-m ²	37
4-26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.07926 kg-m ²	37
4-27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.09339 kg-m ²	37
4-28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.0325 kg-m ²	38
4-29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.0523 kg-m ²	38
4-30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.0325 kg-m ²	38
4-31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.0523 kg-m ²	39
4-32 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น	40
4-33 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลักและกระแสรวมของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า หลังขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น	41
4-34 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น	42
4-35 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลักและกระแสรวมของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า หลังขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น	43
4-36 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น	44
4-37 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลักและกระแสรวมของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า หลังขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น	45
4-38 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น	46

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
4-39 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลักและกระแสรวมของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า หลังขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น	47
4-40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2	48
4-41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2	48
4-42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2	49
4-43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2	49
4-44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2	49
4-45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2	50
4-46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2	50
4-47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2	50
4-48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2	51
4-49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อย่อยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2	51
4-50 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า	52
4-51 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้า	52
4-52 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
4-53 กราฟเปรียบเทียบผลของค่า โมเมนต์ความเฉื่อยของ โรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลา ที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้า	53
4-54 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m ²	55
4-55 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m ²	56
4-56 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m ²	57
4-57 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m ²	58
4-58 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m ²	59
4-59 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m ²	60
4-60 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m ²	61
4-61 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m ²	62
4-62 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m ²	63
4-63 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อยช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m ²	64
4-64 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับ โมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่าง ๆ	64
4-65 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับ โมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่าง ๆ	65
4-66 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับ โมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่าง ๆ	65

4-67 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับ โหมดความถี่ยค่าต่าง ๆ



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปกติแล้วอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในครัวเรือน ส่วนใหญ่จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเป็นเครื่องต้นกำลัง ซึ่งการนำไปใช้งานนั้นจึงต้องพิจารณาคุณสมบัติ และความเหมาะสมของลักษณะงานที่แตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่มีการใช้อย่างกว้างขวางมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น Split phase motors และ Capacitor – Type Motors ซึ่งวิศวกรหรือผู้ที่ใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจำเป็นต้องทราบคุณลักษณะต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างชัดเจนจึงจะสามารถเลือกใช้มอเตอร์ได้ถูกต้องกับขนาดและประเภทของงาน คุณลักษณะที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำคือ คุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ (torque – speed characteristics)

วิธีการในการหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีหลายวิธีเช่น การคำนวณจากวงจรสมมูลย์ (equivalent circuit) หรือทำการวัดค่าแรงบิดโดยตรงแล้วนำค่าแรงบิดที่ทำการวัดได้ นำมาพล็อตกับข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบที่ต่าง ๆ กัน เป็นต้น วิธีการแต่ละอย่างต่างก็มีข้อดีและข้อเสียในตัวเอง ดังนั้นวิศวกรหรือผู้ที่ใช้งานมอเตอร์จึงต้องใช้วิจารณญาณในการเลือกใช้วิธีการทดสอบ เพื่อความสะดวกและความเหมาะสมกับประเภทของงาน

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิธีการที่ใช้ในการหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้มีการระบุไว้ใน IEEE standard 114-2001 มีด้วยกัน 4 วิธีคือ 1.วิธีการวัดค่าเอาต์พุต (output measurement) 2.วิธีการเร่งความเร็ว (acceleration) 3. วิธีการวัดค่าอินพุต (input measurement) และ 4. วิธีวัดค่าโดยตรง (direct measurement)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ (torque – speed characteristics) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยวิธีการเร่งความเร็ว (acceleration) ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่สามารถหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวได้ตลอดย่านความเร็วของมอเตอร์ตั้งแต่หุตุหนึ่ง จนกระทั่งความเร็วเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยใช้เวลาในการบันทึกข้อมูลที่สั้นมาก แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวิธีดังกล่าวคือผลกระทบจากสภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient), สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าและทางกล (noise) ที่ส่งผลกระทบต่อข้อมูลที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการนำเทคนิคทางด้านวิศวกรรม และ วิธีการทางสถิติมาช่วยในการกำจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าว เพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำเชื่อถือและสามารถนำไปประกอบการใช้งานจริงได้ เทคนิคที่จะทำให้อัตราจุดประสงค์ของงานวิจัยคือ อาศัยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้นำเสนอในปริญญานิพนธ์นี้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ (torque – speed characteristics) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยวิธีเร่งความเร็ว นั้น จำเป็นต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของสภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าไม่กระทบต่อข้อมูลความเร็วของมอเตอร์ ในช่วงเวลาที่เร่งความเร็ว ดังนั้นวิธีการที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบจากสภาวะทรานเซียนต์ดังกล่าว จึงต้องทำให้ช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ ยาวนานพอ ที่จะทำให้สภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าหมดไป ซึ่งการที่จะเพิ่มเวลาในการเร่งความเร็ว นั้น จำเป็นต้องทำให้ค่าคงตัวเวลาทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบ (torque – speed characteristics) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) เป็นการทดสอบโดยการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีสตาร์ทตรง (direct on – line starting) แล้วทำการบันทึกข้อมูลแรงดัน, กระแส ความเร็วรอบ และเวลาของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว ในการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอ ที่จะทำให้ผลของสภาวะทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) จากมอเตอร์หรือเครื่องมือวัดซึ่งจะส่งผลกระทบต่อข้อมูลต่าง ๆ ที่ทำการบันทึกนั้นหมดไป ดังนั้นแนวคิดที่ใช้ในการวิจัยคือการเพิ่มค่า โมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ โดยการนำล้อช่วยแรง (fly wheel) มาทำการคัปปลิง (coupling) เข้ากับเพลลาของมอเตอร์เพื่อทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์สูงขึ้น ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นด้วย

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยคือนำเสนอเทคนิค และกระบวนการในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยทำการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ขนาด 1/2 และ 1/4 แรงม้า 2 ชนิดคือ Split phase motors และ Capacitor – Type motors ในการทดสอบได้ทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ให้มีขนาดต่าง ๆ กัน 3 ขนาด แล้วใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการทำให้ข้อมูลมีความเหมาะสม ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์หาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ เพื่อความเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงค่า โมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ จากนั้นนำผลกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็วเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบภาระ (load test) และผลที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากวงจรสมมูลย์ มาเปรียบเทียบศึกษาว่าวงจรสมมูลย์ที่ใช้ นั้นมีความเหมาะสมถูกต้องเพียงใด เพื่อเป้าหมายในการศึกษาค้นคว้าและปรับปรุงให้วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีความสมบูรณ์ถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

1.6 วิธีการดำเนินงาน

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการวิจัยโดยมีการกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆ เป็นลำดับดังต่อไปนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส จากนั้นก็อธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสและนำเสนอวงจรสมมูลย์เพื่อใช้ในการคำนวณหาคุณลักษณะต่าง ๆ

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 หัวข้อคือการทดสอบห้วงความเร็ว (retardation test), การทดสอบการเร่งความเร็ว (acceleration test), การทดสอบภาระ (load test) และการทดสอบพารามิเตอร์ (parameter test)

บทที่ 5 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายก็จะเป็นการสรุปการทำงาน ผลที่ได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้ แนวทางในการพัฒนางานวิจัยเพิ่มเติม และแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้



บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นในช่วงกำลังเป็นเศษส่วนแอมป์และต่ำกว่าเศษส่วนแอมป์ ซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในสถานที่ต่างๆ เช่น บ้านเรือน สถานที่ทำงานและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น และสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวนั้นมีโครงสร้างที่ไม่ยุ่งยากและง่ายต่อการบำรุงรักษา โดยที่สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ

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

2.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (Single Phase Induction Motor : SPIM)

สำหรับโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวได้แสดงรูปที่ 2-1 (ก) จากโครงสร้างดังกล่าวนี้ไม่มีผลทำให้ไม่เกิดแรงบิดเริ่มต้น ดังนั้นมอเตอร์จึงไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้ อย่างไรก็ตามถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนไปได้นั้นจำเป็นต้องมีวิธีการช่วยให้เริ่มต้นหมุน และ สำหรับการพิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวในรายงานนี้ได้นำทฤษฎีสยามแม่เหล็กคู่เพื่ออ้างอิงในการวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของมอเตอร์

2.1.1.1 สยามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์หนึ่งเฟส

สยามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์หนึ่งเฟส สำหรับมอเตอร์หนึ่งเฟสในหนึ่งขั้วแม่เหล็กจะมีขดลวดเพียงหนึ่งขดเท่านั้น เมื่อมีขดลวดเพียงขดเดียว สยามแม่เหล็กแทนที่จะหมุนเช่นเดียวกับมอเตอร์สองเฟสและมอเตอร์สามเฟส แต่จะกลับขั้วจากขั้วเหนือ N เป็นขั้วใต้ S และกลับจากขั้วใต้เป็นขั้วเหนือกลับไปกลับมาเท่านั้น จะทำให้โรเตอร์สั่นและไม่หมุนด้วย

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

โดยการออกแบบให้ขดสตาร์ทมีค่าความต้านทานสูง ๆ และให้ขดรันมีค่าอินดักแตนซ์สูง จะทำให้กระแสที่ไหลเข้าขดลวดทั้งสองมีมุมต่างเฟสกันเกือบ 90 องศาไฟฟ้า คือกระแสที่ไหลผ่านขดสตาร์ทจะมีเฟสเดียวกับแรงดันที่ป้อน ส่วนกระแสที่ไหลผ่านขดรันจะมีมุมต่างเฟสกับแรงดันที่ป้อน 90 องศาไฟฟ้า เมื่อขดสตาร์ทเกิดขั้วเหนือ N ไปแล้ว 90 องศาไฟฟ้า ขดรันก็จะเกิดขั้วเหนือ N ขึ้นมาบ้าง ทำให้เกิด

สนามแม่เหล็กหมุนขึ้น โดยอาศัยหลักของมอเตอร์สองเฟสนั่นเอง เมื่อโรเตอร์หมุนได้ความเร็วตามที่คิดแล้ว ขดสตาร์ที่จะถูกตัดออกด้วยสวิตช์อัตโนมัติ

2.1.1.2 ทฤษฎีสานแม่เหล็กหมุนคู่ (Double revolving field theory)

หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว สามารถวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีสานแม่เหล็กหมุนคู่ตามรายละเอียดที่กล่าวถึงดังต่อไปนี้

พฤติกรรมของโรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง

การพิจารณา โรเตอร์ขณะหยุดนิ่งและขดลวดสเตเตอร์ ถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับดังรูปที่ 2-1 (ข) นั้นจะเห็นพฤติกรรมการสั่นสะเทือนหรือการกระเพื่อมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Pulsating magnetomotive force) และการสั่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Pulsating flux) ที่เกิดขึ้นตามแนวแกนขดลวดสเตเตอร์ โดยกระแสที่ไหลในวงจรโรเตอร์ เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กในโรเตอร์ (เช่นเดียวกับปฏิกิริยาหม้อแปลง) ส่งผลทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กใน โรเตอร์ตามแนวแกนของเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์ (ตามกฎของเลนซ์) โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองนั้นมีทิศทางที่ตรงข้ามกัน ดังนั้นมุมระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นหมายความว่า มอเตอร์ไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้เนื่องจากไม่มีการเกิดแรงบิดเริ่มต้น (Starting torque)



รูปที่ 2-1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

พฤติกรรมของโรเตอร์ขณะหมุน

ถ้าสมมุติให้โรเตอร์ทำการหมุน การหมุนของโรเตอร์เกิดขึ้นได้นั้นจำเป็นต้องมีวงจรช่วยเริ่มต้นหมุน ดังนั้นการเกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวนั้น จำเป็นต้องมีการกำหนดเงื่อนไขของการเริ่มต้นหมุนดังต่อไปนี้

การสั่นของสนามแม่เหล็ก (แรงเคลื่อนแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็ก)

เมื่อพิจารณาการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว นั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 องค์ประกอบหลักซึ่งจะมีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้ามและหมุนที่ความเร็วเดียวกัน คือความเร็วเชิงโคโรนัส สนามแม่เหล็กดังกล่าวพิสูจน์ได้โดยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ หรือใช้กราฟมาทำการวิเคราะห์

จากรูปที่ 2-2 ถ้ากำหนด OP เป็นเวกเตอร์ที่เกิดจากผลของการเคลื่อนที่สองส่วนซึ่งมีขนาดเท่ากัน โดยที่ f คือ การเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามีทิศทางตามเข็มนาฬิกา และ b คือ การเคลื่อนที่ถอยหลังมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นการหมุนของเวกเตอร์ทั้งสองเกิดขึ้นที่ความเร็วเดียวกันในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อกำหนดให้ OR คือ เวกเตอร์ที่เป็นผลรวมของเวกเตอร์สองส่วนที่มีขนาด +20P และ -20P โดยที่เวกเตอร์ทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกันและเป็นเวกเตอร์ที่แปรตามเวลาในฟังก์ชันไซน์ ดังนั้นถ้าการหมุนของเวกเตอร์ทั้งสองดังกล่าว นั้นหมุนด้วยความเร็วคงที่เดียวกันซึ่งการสั่นของสนามแม่เหล็ก (เขียนแทนด้วย เวกเตอร์ OR) ที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์นั้น ส่งผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสองทาง ดังนั้นการสั่นของเส้นแรงแม่เหล็กในสเตเตอร์ (Pulsating stator flux) Φ_s ตามแนวแกนของขดลวดสเตเตอร์ เป็นผลจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนสองทางคือ Φ_f และ Φ_b ดังรูปที่ 2-2 (ข)

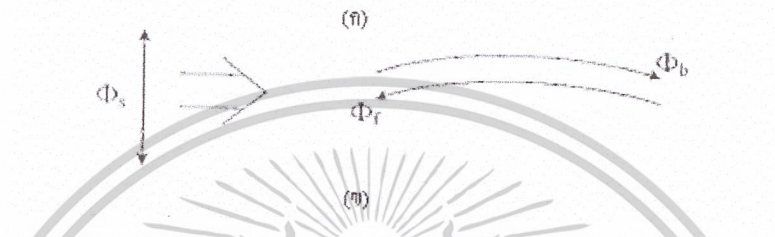
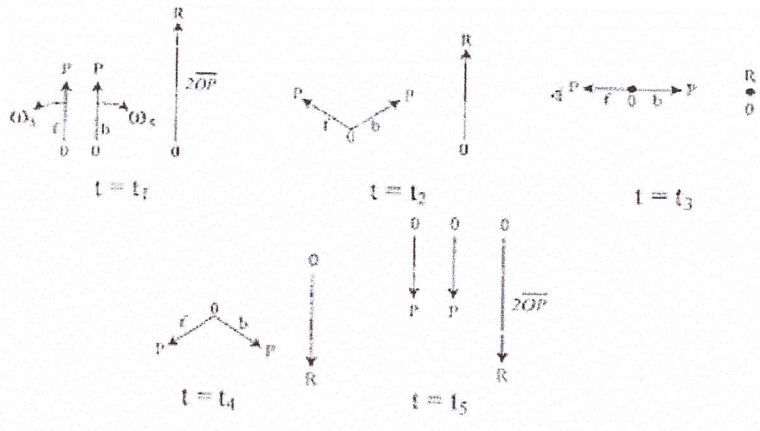
สำหรับสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณาขดลวดสเตเตอร์ ที่วางแบบกระจายในรูปสัญญาณไซน์ นั้นเป็นการวิเคราะห์ หักจากสมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetomotive Force:mmf) ในตำแหน่งของมุม θ ดังรูปที่ 2-3 และถ้ามหาเป็นสมการได้ดังนี้คือ

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

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

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

เมื่อ F_f คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนตามทิศทางของมุม θ และ F_b แทนแรงเคลื่อนแม่เหล็กตามทิศทางตรงข้ามกับ F_f สำหรับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองนั้น มีผลทำให้เกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่มีทิศทางตรงกันข้าม และองค์ประกอบของแรงบิดทั้งสองส่วนลดลงได้ดังรูปที่ 2-4 สำหรับในขณะมอเตอร์อยู่นิ่งนั้น แรงบิดไปข้างหน้าและแรงบิดถอยหลังมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นทำให้ผลของแรงบิดเริ่มต้นหมุนมีค่าเท่ากับศูนย์แต่ในขณะที่มีมอเตอร์หมุนที่ค่าความเร็วต่างๆ กัน แรงบิดทั้งสองส่วนไม่เท่ากัน ส่งผลทำให้มอเตอร์หมุนไปได้ตามทิศทางของการหมุน



รูปที่ 2-2 การสั้น (หรือการกระพือม) ของสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กหมุน

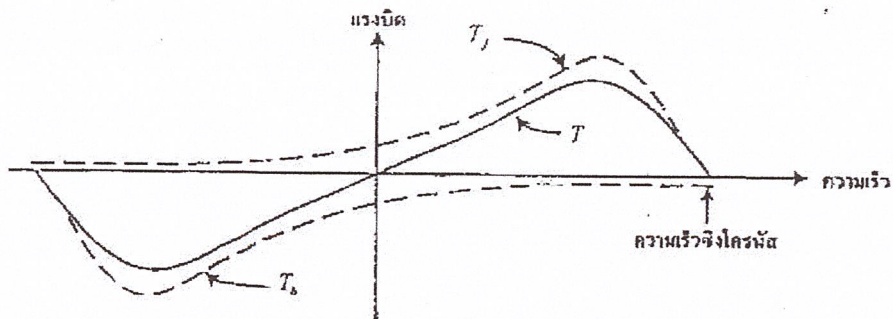


รูปที่ 2-3 ภาพตัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

สลลิป (Slip)

ถ้าสมมุติว่า โรเตอร์หมุนตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าด้วยความเร็ว n_r รอบต่อนาทีและความเร็วซิงโครนัส คือ n รอบต่อนาที ดังนั้นค่าสลลิปของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้ากำหนดตามสมการ 2.3

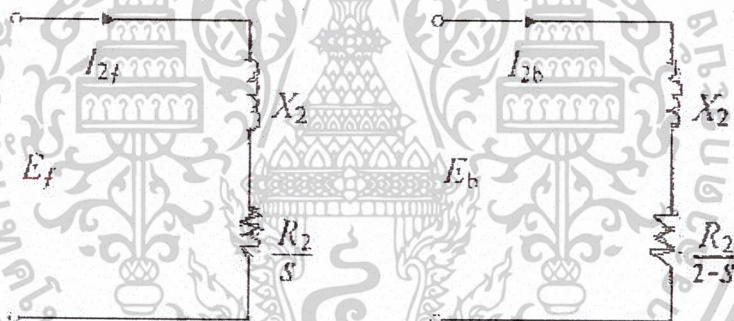
$$S_f = \frac{N - N_r}{N} = S \tag{2.3}$$



รูปที่ 2-4 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง

การหมุนของ โรเตอร์ในทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กหมุน ไปข้างหน้าเรียกว่า สนามแม่เหล็กหมุน ถอยหลัง และค่าสลิปกำหนดได้ดังนี้ คือ

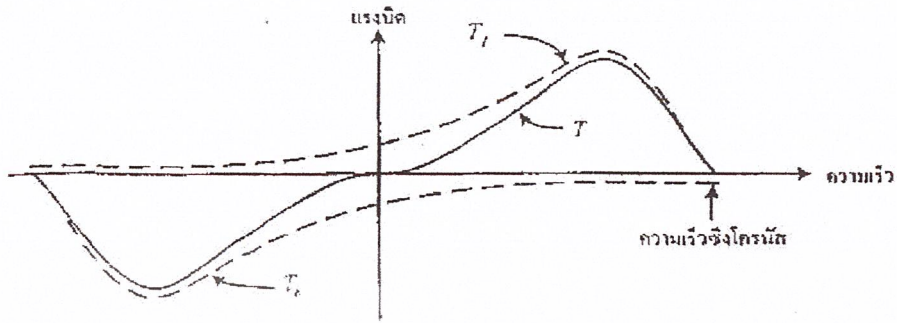
$$S_b = \frac{N - (-N_r)}{N} = 2 - S \quad (2.4)$$



รูปที่ 2-5 วงจรสมมูลของโรเตอร์

สำหรับวงจร โรเตอร์เส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า และเส้นแรงแม่เหล็กหมุนถอยหลัง ดังรูปที่ 2-5 นั้น ขณะ โรเตอร์อยู่นิ่งิมที่แกนซ้ที่ถึเกิดขึ้นจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนทั้งสองมีค่าเท่ากัน ส่งผลทำให้กระแส เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองเท่ากัน คือ $I_{2f} = I_{2b}$ และทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองที่เกิดขึ้นมีขนาด เท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ (ทิศทางตรงกันข้าม) ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็ก Φ_f และ Φ_b ที่เกิดขึ้นใน ช่องอากาศจึงมีขนาดเท่ากันด้วย โดยพฤติกรรมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้น ยังมีผลทำให้เส้นแรง แม่เหล็กหมุนถอยหลังลดลงอีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ความเร็วของมอเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็ก หมุนไปข้างหน้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กหมุนถอยหลังลดลง อย่างไรก็ตามขณะที่โรเตอร์หมุนิมที่ แกนซ้ของวงจร โรเตอร์ (ในรูปที่ 2-5) นั้นไม่เท่ากัน ซึ่งกระแสโรเตอร์ $I_{2b} > I_{2f}$ (ทำให้ค่าประกอบกำลังต่ำ)

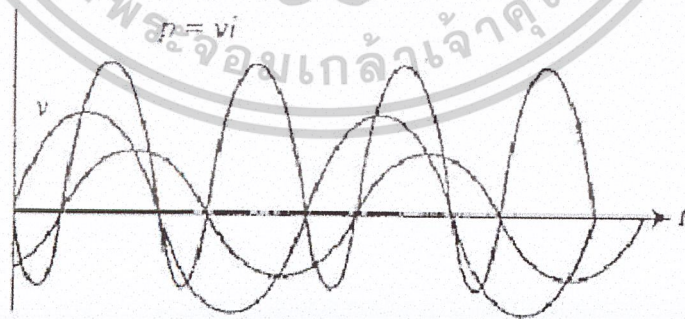
และขณะ โรเตอร์เคลื่อนที่แรงบิดไปข้างหน้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ในทางตรงข้ามกันแรงบิดถอยหลังมีค่าลดลง ทำให้คุณลักษณะแรงบิด - ความเร็ว ในรูปที่ 2-4 เปลี่ยนไปเป็นรูปที่ 2-6 ซึ่งมีค่าแรงบิดชั่วขณะ



รูปที่ 2-6 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว ค่าจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว จากการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง

การสั่นของแรงบิด (Torque Pulsation)

การสั่นของแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวนั้นเกิดขึ้น ที่ค่าความถี่ของกำลังชั่วขณะ มีค่าเป็นสองเท่าของความถี่ที่แหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 2-7 จากเหตุผลข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าการสั่นของแรงบิดเกิดขึ้นขณะที่ความถี่ของสเตเตอร์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าด้วยเช่นกัน และการสั่นของแรงบิดที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลจากการกระทำร่วมกันของ Φ และ mmf ที่หมุนตัดผ่านในทิศทางตรงกันข้ามขณะที่ความเร็วซิงโครนัสเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เช่น การกระทำร่วมกันของ Φ_s กับ F_b และ Φ_b กับ F_s ของโรเตอร์นั้นส่งผลทำให้แรงบิดมีค่าคงที่ สำหรับผลจากการสั่นของแรงยังทำให้เกิดเสียงดัง เรียกว่า humming effect และการสั่นของแรงบิดสามารถทำให้ลดน้อยลงได้ โดยใช้แผ่นยางรองหรือวัสดุที่เป็นยางรอบมาตรฐานของมอเตอร์ เป็นต้น



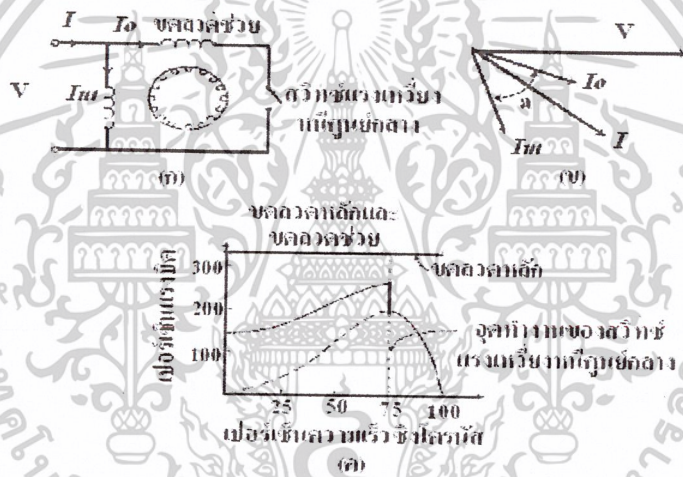
รูปที่ 2-7 รูปคลื่นแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเฟสเดียว

2.2 ชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีด้วยกันหลายชนิดซึ่งมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป ในแต่ละชนิดสามารถอธิบายได้จากหลักการที่ทำให้เกิดการต่างเฟสระหว่างกระแสที่ไหลในขดลวดหลัก และขดลวดช่วย แต่ในบางครั้งเราเรียกชื่อรวมกันว่า มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้ คือ

2.2.1 มอเตอร์แบบแยกเฟส (Split – Phase Motor)

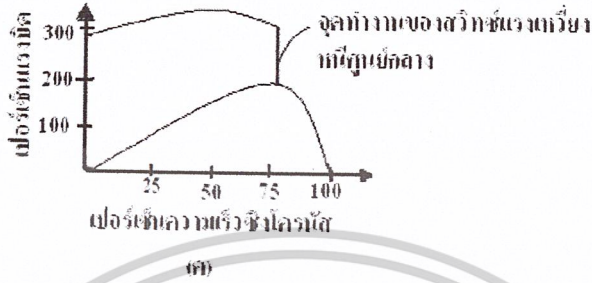
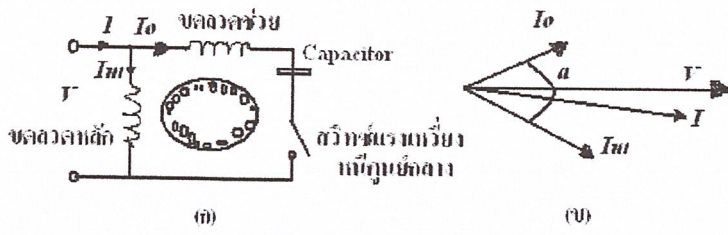
โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดแยกเฟส แสดงไว้ในรูปที่ 2-8 (ก) ขดลวดช่วยมีอัตราส่วนค่าความต้านทานต่อรีแอกแตนซ์สูงกว่าขดลวดหลัก โดยที่กระแสซึ่งไหลผ่านขดลวดทั้งสองมีเฟสต่างกันดังรูปที่ 2-8 (ข) การทำให้อัตราส่วนของค่าความต้านทานต่อรีแอกแตนซ์ของขดลวดช่วยมีค่าสูงนั้นเพื่อใช้ในระหว่างการเริ่มหมุนของมอเตอร์เท่านั้น หลังจากนั้นเมื่อมอเตอร์หมุนไปแล้วจนกระทั่งมีความเร็วที่ 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส ขดลวดช่วยถูกตัดออกด้วยสวิทช์แรงเหวี่ยง (Centrifugal Switch) สำหรับคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็ว แสดงไว้ดังรูปที่ 2-8 (ค) มอเตอร์ชนิดนี้มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนต่ำจนถึงปานกลาง



รูปที่ 2-8 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดขดลวดแยก

2.2.2 มอเตอร์ชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor – Start Motor)

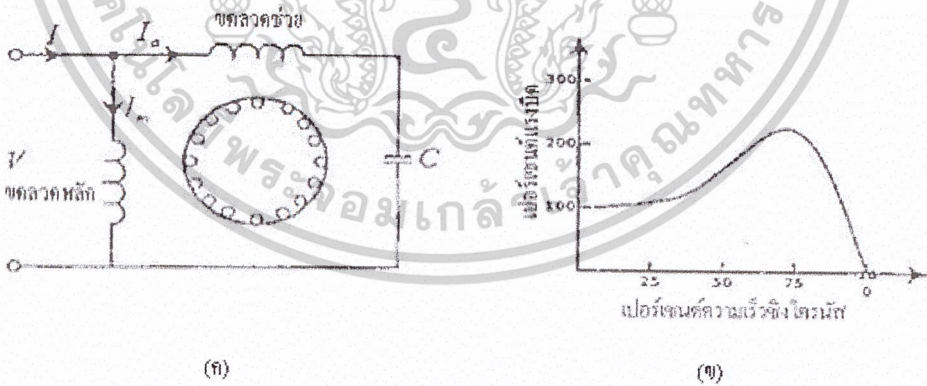
มอเตอร์ชนิดนี้มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนสูงมาก เนื่องจากได้ต่อตัวเก็บประจุนุกรมเข้ากับขดลวดช่วย ดังรูปที่ 2-9 (ก) นั่นคือการเพิ่มมุมเฟสระหว่างกระแสที่ไหลในขดลวดทั้งสองดังรูปที่ 2-9 (ข) สำหรับคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็ว 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส สวิทช์แรงเหวี่ยงจะตัดขดลวดช่วยออก



รูปที่ 2-9 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

2.2.3 มอเตอร์ชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor – Run Motor)

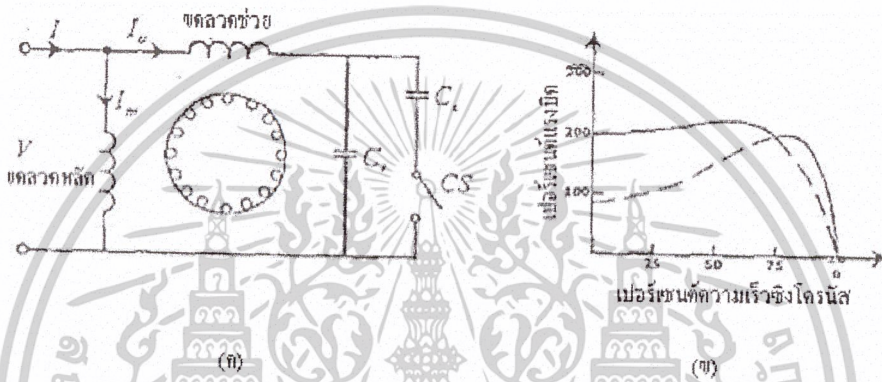
มอเตอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างดังรูปที่ 2-10 (ก) โดยที่ตัวเก็บประจุถูกต่ออนุกรมกับขดลวดช่วยและไม่ถูกตัดออกหลังจากที่มอเตอร์หมุนไปแล้ว ซึ่งโครงสร้างและลักษณะวงจรแบบนี้สามารถลดต้นทุนให้ต่ำลงได้ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีสวิตช์แรงเหวี่ยง ที่สำคัญ โครงสร้างลักษณะเช่นนี้ทำให้สามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลัง การสั่น และประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้ดีขึ้นเนื่องจากมอเตอร์ทำงาน (หมุน) เป็นแบบมอเตอร์สองเฟส ซึ่งทำให้มอเตอร์หมุนได้เร็วขึ้นสำหรับคุณลักษณะของแรงบิด – ความเร็ว แสดงไว้ในรูปที่ 2-10 (ข)



รูปที่ 2-10 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

2.2.4 มอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor – Start Capacitor – Run Motor)

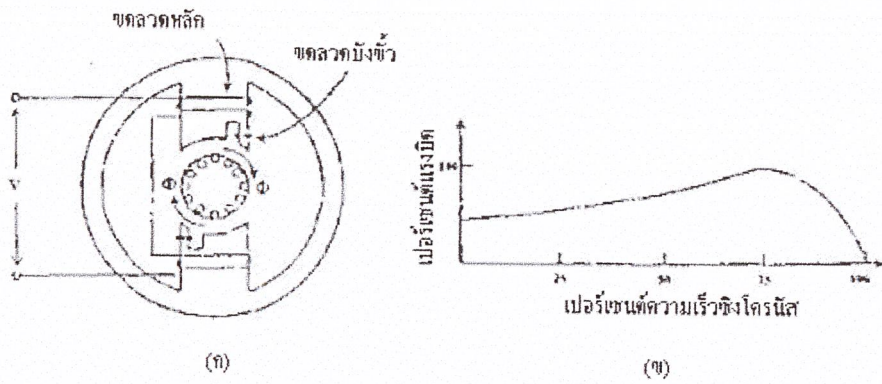
โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้จะมีตัวเก็บประจุสองตัวประกอบอยู่ในวงจร โดยที่ตัวแรกจะใช้เพื่อการเริ่มต้นส่วนอีกตัวหนึ่งใช้ขณะมอเตอร์หมุน ดังรูปที่ 2-11 (ก) ตามทฤษฎีนั้น จุดที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มต้นหมุนและสมรรถนะของมอเตอร์ขณะหมุน สามารถกำหนดได้โดยตัวเก็บประจุทั้งสองตัวเก็บประจุเริ่มต้นหมุน C_s มีขนาดใหญ่และเป็นชนิด ac electrolytic ส่วนตัวเก็บประจุขณะมอเตอร์หมุน C_r ถูกต่ออนุกรมอย่างถาวรกับขดลวดเริ่มต้นหมุนซึ่งมีขนาดเล็กเป็นชนิด paper oil สำหรับคุณลักษณะของแรงบิด – ความเร็วแสดงในรูปที่ 2-11 (ข) มอเตอร์ชนิดดังกล่าวนี้มีราคาแพงเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตามถือได้ว่าเป็นมอเตอร์ที่มีสมรรถนะที่ดีที่สุดชนิดหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว



รูปที่ 2-11 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

2.2.5 มอเตอร์แบบบังขั้ว (Shaded – pole Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้โครงสร้างของขั้วแม่เหล็ก (Pole) ที่สเตเตอร์แบบบังขั้วดังรูปที่ 2-12 (ก) โดยที่ขั้วขึ้นดังกล่าวนี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน และมีส่วนหนึ่งที่ถูกปิดล้อมด้วยวงแหวนทองแดงเรียก Shading coil สำหรับขดลวดหลักพันอยู่บนขั้วขึ้นของมอเตอร์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำบน Shading coil เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนขั้วบัง (Shaded) ล้าหลังส่วนที่ไม่ได้ถูกปิดล้อม ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนขั้วบังมีค่าสูงสุด หลังจากเส้นแรงในส่วนที่ไม่ถูกปิดล้อมมีค่าถึงจุดสูงสุดก่อน สำหรับวงจรสมมูลย์เมื่อพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนที่ไม่ได้ถูกปิดล้อมจะต่างเฟสกับส่วนขั้วบัง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนที่จากส่วนที่ไม่ถูกปิดล้อมไปยังส่วนขั้วบังยังให้เกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุน และคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็ว แสดงไว้ดังรูปที่ 2-12 (ข) มอเตอร์แบบบังขั้วส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นในช่วงประมาณ 1/20 แรงม้า



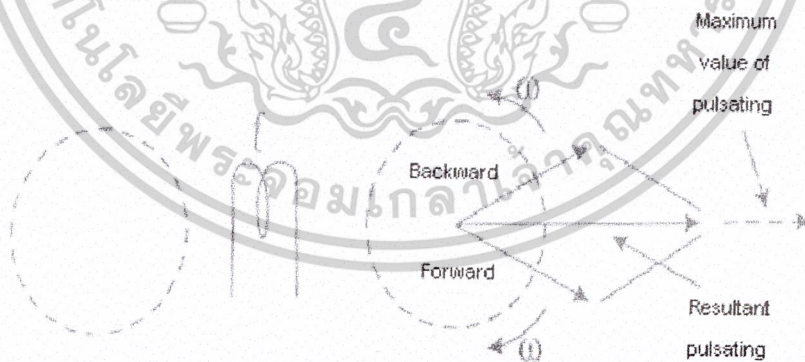
รูปที่ 2-12 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบบังขั้ว

2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ในส่วนนี้เป็นการพิจารณาคุณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยอาศัยการวิเคราะห์จากวงจรสมมูลภายใต้เงื่อนไขของการทำงานในสภาวะคงตัว ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.3.1 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทาง

การกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียว ทำให้เกิดการกระเพื่อมของสนามแม่เหล็กดังกล่าวข้างต้นมาแล้ว ซึ่งการพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนั้นด้วยการแบ่งสนามแม่เหล็กหมุนออกเป็นสองส่วนที่มีทิศทางตรงข้ามกัน โดยที่แต่ละส่วนมีค่า mmf สูงสุดที่สเตเตอร์เท่ากับ $1/2$ ของสนามแม่เหล็กหมุนทั้งหมดที่ความเร็วเชิงมุม คือ ω และองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กหมุนทั้งสองที่เกิดขึ้นตามแนวแกนของขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 2-13



รูปที่ 2-13 สนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง

เมื่อพิจารณาขดลวดสเตเตอร์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทางเห็นได้ว่า สนามแม่เหล็กหมุนแต่ละส่วนทำให้เกิดแรงดันสมดุลขึ้นในขดลวดโรเตอร์ และผลลัพธ์ของกระแสโรเตอร์คือ ผลรวมของกระแสที่

ไหลในบริเวณคิวดรอปคลอดโรเตอร์ (closed rotor winding) ที่กำหนดโดยแรงดันแต่ละส่วน ถ้าแบ่งวงจรสมมูลย์ของโรเตอร์ออกเป็นสองส่วนซึ่งตั้งฉากกัน และกำหนดให้กระแสที่ไหลในโรเตอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลังคือ I_f และ I_b ตามลำดับ ดังนั้นกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าทีเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสสมดุลคือ

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

สำหรับกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลังทีเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสสมดุลคือ

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

ดังนั้นผลลัพธ์ของกระแสที่ไหลในคอยล์ d และ q คือ

$$I_d = I_f + I_b \tag{2.5}$$

ดังนั้น

$$I_q = j(I_f - I_b)$$

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

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

$$\tag{2.6}$$

และกำลังในช่องอากาศที่กำหนด โดยสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลังคือ

$$P_{gf} = I_f^2 R_f \tag{2.7}$$

$$P_{gb} = I_b^2 R_b \tag{2.8}$$

สำหรับแรงบิดกำหนดได้ดังนี้คือ

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega} \tag{2.9}$$

$$T_b = \frac{P_{gb}}{\omega} \tag{2.10}$$

และผลรวมของแรงบิดคือ

$$T = T_f - T_b = \frac{I_1^2}{\omega} (R_f - R_b) \quad (2.11)$$

สำหรับกำลังทางกลที่เกิดขึ้นกำหนดได้ดังนี้คือ

$$P_{mech} = T\omega_r = T\omega(1-s) \quad (2.12)$$

$$= I_1^2 (R_f - R_b)(1-s) \quad (2.13)$$

$$= (P_{gf} - P_{gb})(1-s) \quad (2.14)$$

และกำลังทางด้านเอาต์พุตคือ

$$P_{out} = P_{mech} - P_{rot} \quad (2.15)$$

โดยที่ P_{rot} ประกอบด้วยการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลมบวกกับการสูญเสียที่แกนรวมเป็นการสูญเสียเนื่องจากการหมุน สนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศทั้งสองทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน ดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากทองแดงในโรเตอร์ ($I^2 R$) คือ ผลรวมเชิงตัวเลขของการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กแต่ละส่วน โดยที่การสูญเสียเนื่องจากทองแดงในโรเตอร์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหนึ่งและถอยหลังกำหนดได้ดังนี้

$$P_{2f} = sP_{gf} \quad (2.16)$$

$$P_{2b} = (2-s)P_{gb} \quad (2.17)$$

และผลรวมของการสูญเสียเนื่องจากทองแดงในโรเตอร์คือ

$$P_2 = sP_{gf} + (2-s)P_{gb} \quad (2.18)$$

ผลรวมของกำลังในช่องอากาศ เนื่องจากองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศทั้งสองสามารถกำหนดได้ดังนี้คือ

$$P_g = P_{gf} + P_{gb} \quad (2.19)$$

2.3.2 การวิเคราะห์วงจรสมมูลโดยประมาณ

2.3.2.1 No-Load, Locked Rotor Tests

วงจรสมมูลของขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 1 เฟสขณะหมุนที่สลิป $s=0$ แสดงดังรูปที่ 2-15 การทดสอบจะกำหนดโดยค่าความต้านทาน resistance และ reactance ด้วย 3 วิธีคือ no-load test, locked rotor test และ DC test

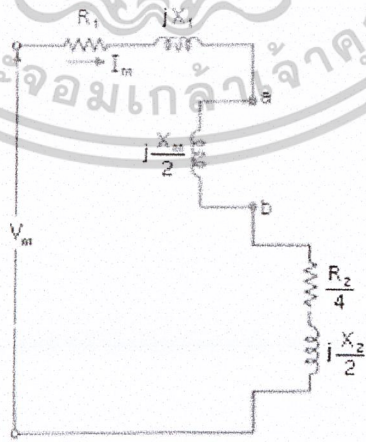
การทดสอบ no-load กระทำโดยการจับมอเตอร์ในสถานะที่ไม่มี load ด้วยค่าแรงดันและความถี่ที่พิกัด จากนั้นทำการวัดค่ากระแสและกำลังแล้วนำมาทำการวิเคราะห์จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 2-15

การทดสอบ locked-rotor กระทำโดยการลือคส่วนของโรเตอร์ไว้ในขณะที่ค่อย ๆ ป้อนแรงดันให้กับมอเตอร์ จนกระทั่งถึงค่ากระแสที่พิกัด จากนั้นก็ทำการบันทึกค่าแรงดัน, กระแส และ กำลังแล้วนำมาทำการวิเคราะห์จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 2-16

การทดสอบ DC test เพื่อวัดค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์

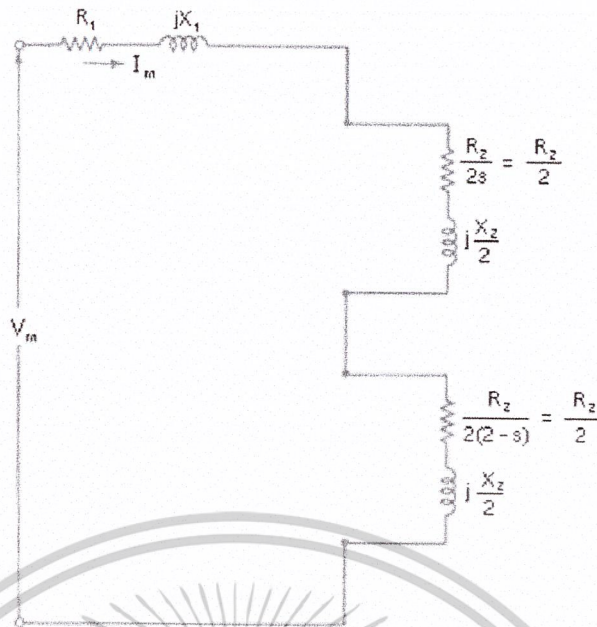


รูปที่ 2-14 วงจรสมมูลอย่างง่าย



รูปที่ 2-15 วงจรสมมูลขณะโรเตอร์หมุนที่สภาวะ no-load ($s=0$)

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2-16 วงจรสมมูลขณะมอเตอร์อยู่ที่สภาวะ *locked-rotor* ($s=1$)

2.3.2.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูล

การทดสอบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลถูกเรียกว่า *direct method* ซึ่งไม่ได้รับผลของการสูญเสียของแกนเหล็ก (core loss) การทดสอบ *no-load (nl)* ค่า *series reactance* (X_0) ของวงจร กำหนดโดย

$$X_0 = \frac{\sqrt{(V_{nl} I_{nl})^2 - P_{e,nl}^2}}{I_{nl}^2} \quad (2.20)$$

X_0 คือผลรวมของค่า *series reactance*

$$X_0 = X_l + 0.5X_m + 0.5X_2 \quad (2.21)$$

ค่า *leakage reactance* ที่สเตเตอร์และ โรเตอร์ โดยปกติจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงได้ค่าจากการวัดด้วยวิธี *locked-rotor (lr)*

$$X_l = X_2 = \frac{X_{lr}}{2} \quad (2.22)$$

X_r คือผลรวมของ series reactance จากการวัดด้วยวิธี locked-rotor

$$X_{br} = \frac{\sqrt{(V_{br} I_{br})^2 - P_{e,br}^2}}{I_{br}^2} \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.21) และ (2.22) ค่า magnetizing reactance (X_m) กำหนดได้ดังนี้คือ

$$X_m = 2X_0 - 1.5X_{br} \quad (2.24)$$

ค่าความต้านทานอนุกรมของขดลวดหลักเมื่อทำการล๊อคโรเตอร์กำหนดได้ดังนี้คือ

$$R_{lr} = \frac{P_{e,lr}}{I_{lr}^2} \quad (2.25)$$

ดังนั้นค่าความต้านทานของโรเตอร์ (R_2) เมื่อถ่ายโอนไปยังด้านสเตเตอร์คือ

$$R_2 = (R_{lr} - R_1) \left(\frac{X_2 + X_m}{X_m} \right)^2 \quad (2.26)$$

ซึ่ง R_1 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์จากการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

บทที่ 3

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 หลักการในการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบและการคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในปฏิญญาฉบับนี้ได้นำเสนอการหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยอาศัยการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์ (acceleration method) ซึ่งวิธีดังกล่าวกระทำโดยการสตาร์ทมอเตอร์ที่สภาวะไร้ภาระ (no load) ด้วยวิธีสตาร์ทตรง (direct start) แล้วทำการบันทึกข้อมูลความเร็วรอบ, แรงดัน, กระแสและเวลาในการเร่งความเร็วในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากหยุดนิ่งจนความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส จากนั้นนำข้อมูลความเร็วรอบที่บันทึกได้คำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณหาแรงบิดนั้นเป็นไปตามสมการที่ 3.1

$$T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} - T_l \quad (3.1)$$

T_m = แรงบิดเร่งของมอเตอร์ (N-m)

T_l = แรงบิดภาระของมอเตอร์ (N-m)

J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

ω = ความเร็วของโรเตอร์ (rad/s)

เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วเป็นการทดสอบที่สภาวะไร้ภาระ (no load) ดังนั้นจากสมการที่ 3.1 เทอมของแรงบิดภาระ T_l จึงถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสมการที่ 3.1 เหลือเพียง

$$T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3.2)$$

3.2 เทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เนื่องจากการทดสอบหาคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วรอบของมอเตอร์จำเป็นต้องมีช่วงเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลของทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (electrical transient) จากมอเตอร์และเครื่องมื่อวัดซึ่งจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลแรงบิดของมอเตอร์นั้นหมดไป ดังนั้นจำเป็นต้องทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์นั้นแสดงดังสมการที่ 3.3

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{1}{T_m - T_l} d\omega \quad (3.3)$$

t = เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์จาก ω_1 ไปสู่ ω_2

J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

T_m = แรงบิดเร่งของมอเตอร์ (N-m)

T_l = แรงบิดภาระของมอเตอร์ (N-m)

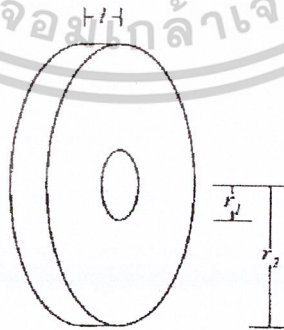
เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วนี้จะทำการทดสอบที่สภาวะไร้ภาระ (no load) ดังนั้นค่าแรงบิดของภาระของมอเตอร์ในสมการที่ 3.3 จึงกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ และจากสมการที่ 3.3 เมื่อทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (J) ให้แก่มอเตอร์จะทำให้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์มีค่ามากขึ้น ดังนั้นในการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำกระทำได้โดยการคับปลิง (coupling) วัตถุทรงกระบอกเข้ากับเพลลาของมอเตอร์ ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ ภายหลังจากเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์ของมอเตอร์แล้วนั้นแสดงดังสมการที่ 3.4

$$T_m = (J + J_l) \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3.4)$$

J_l = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เพิ่มให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

3.3 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้ในการทดสอบ

จากหัวข้อ 3.2 ได้กำหนดรูปร่างของวัตถุที่ใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์โดยให้เป็นรูปทรงกระบอกซึ่งแสดงดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 รูปทรงของวัตถุที่ใช้สำหรับเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรูปทรงดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 3.5

$$J_1 = \frac{1}{2} mr^2 \quad (3.5)$$

m = มวลของวัตถุทรงกระบอก (kg)

r = รัศมีของทรงกระบอก (m)

l = ความหนาของทรงกระบอก (m)

3.4 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วิธีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น กระทำโดยการใช้ล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่าหนึ่งมาทำการคัปปลิง (coupling) เข้ากับเพลลาของมอเตอร์ซึ่งวิธีการในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ สามารถคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) ซึ่งขั้นตอนการทดสอบกระทำตาม IEC standard 34-2 โดยทำการเดินเครื่องมอเตอร์ที่สภาวะคงตัว (steady state) และมีการคัปปลิงล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่าหนึ่งเข้าที่เพลลามอเตอร์ จากนั้นทำการปลดแหล่งจ่ายออกแล้วทำการบันทึกความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลงจนกระทั่งความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงถึงประมาณ 95% ของความเร็วที่กัก ภายหลังจากทำการปลดแหล่งจ่ายออกจากขั้วของสเตเตอร์ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ (T_m) จะมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นสมการแรงบิดในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลงเป็นดังนี้

$$(J_m + J_1) \frac{d\omega_{r1}}{dt} + D\omega_{r1} = 0 \quad (3.6)$$

$$(J_m + J_2) \frac{d\omega_{r2}}{dt} + D\omega_{r2} = 0 \quad (3.7)$$

J_m = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

J_1, J_2 = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงตัวที่ 1 และ 2 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

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

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

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

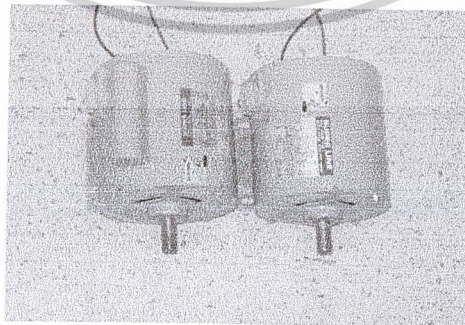
ในส่วนของบทนี้จะนำเสนอการทดสอบ ผลการทดสอบในรูปแบบต่าง ๆ และการคำนวณหาคุณลักษณะแรงบิดความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสพร้อมคุณลักษณะอื่น ๆ ด้วย

4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส (1 Phase Induction Motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกสร้างขึ้น โดยอ้างอิงมาตรฐาน 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



รูปที่ 4-2 มอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ

พิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-1 และ 4-2 ตามลำดับ

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 4-1 พิกัดต่างๆ ของมอเตอร์ขนาด 1/2 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

ตารางที่ 4-2 พิกัดต่างๆ ของมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า ที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.2 DC Tachogenerator

DC Tachogenerator เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงประเภทหนึ่ง โดย DC Tachogenerator ที่นำมาใช้สำหรับทดสอบเป็นประเภทที่มีแปรงถ่าน โดยสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความเร็วรอบของ DC Tachogenerator แสดงดังสมการที่ 4.1

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

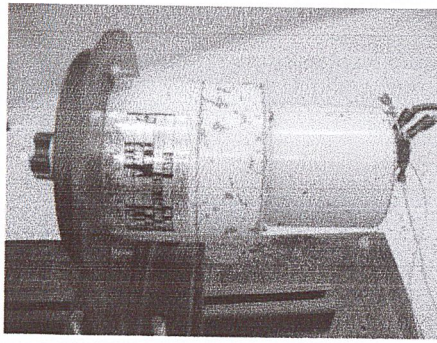
โดยที่ V = แรงดันเอาต์พุตของ DC Tachogenerator (V)

k = ค่าคงที่การแปรผันระหว่างแรงดันและอัตราเร็วเชิงมุม (V/(rad/s))

ω = อัตราเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/s)

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

DC Tachogenerator ที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่าคงที่การแปรผันระหว่างแรงดันและอัตราเร็วเชิงมุมประมาณ 0.02988 (V/(rad/s))



รูปที่ 4-3 DC Tachogenerator ที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.3 ล้อช่วยแรง (Flywheel)

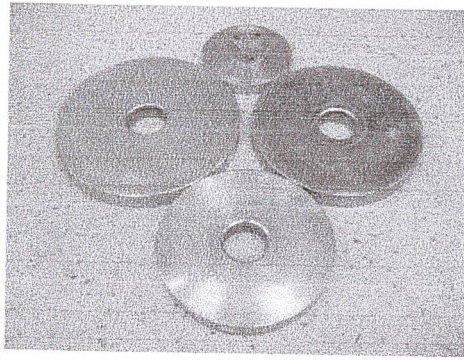
ในปริิฤณยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อย 3 ค่าสำหรับมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้าคือขนาด 10, 11.38, 12.66 kg และ 2 ค่าสำหรับมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้าคือขนาด 7.1, 8.86 kg เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกัน โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดดังต่อไปนี้

มวล (kg)	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (kg-m ²)
10	0.05972
11.38	0.07926
12.66	0.09339

ตารางที่ 4-3 มวลของล้อช่วยแรงและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ

มวล (kg)	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (kg-m ²)
7.1	0.0325
8.86	0.0523

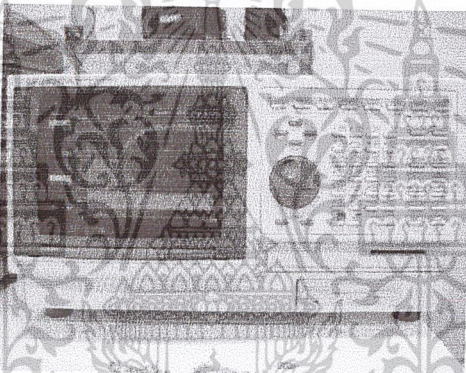
ตารางที่ 4-4 มวลของล้อช่วยแรงและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4-4 ล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.4 Analyzing Recorder

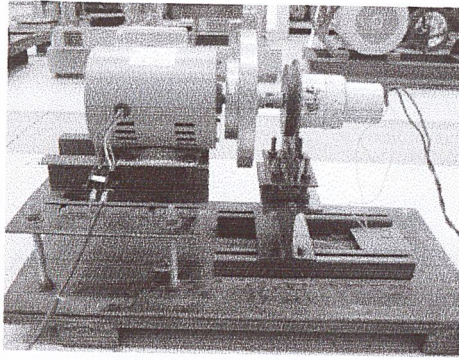
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลแรงดัน , กระแส , ความเร็วรอบ , และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ
แต่ละครั้ง รูปแบบของ analyzing recorder แสดงดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 Analyzing Recorder ที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.5 แทนทดสอบวิธีเร่งความเร็วสำหรับมอเตอร์

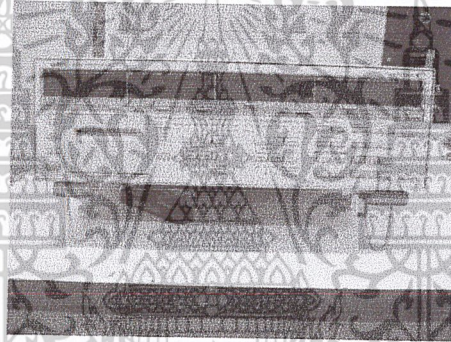
แทนทดสอบสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ได้นำล้อช่วยแรงมาคลี่ปลีกับเพลามอเตอร์โดยตรง
และคลี่ปลีเข้ากับ DC Tachogenerator ดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 แทนสำหรับการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

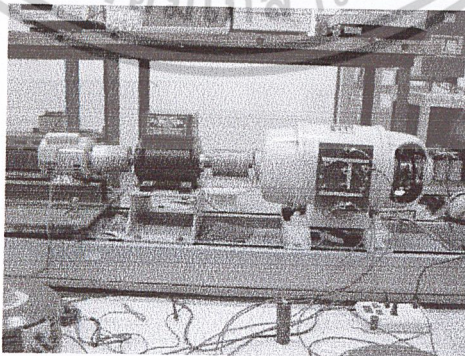
4.2.6 Digital Power Meter

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้บันทึกข้อมูลแรงดัน, กระแส, กำลัง, power factor เพื่อนำค่าเหล่านี้ไปทำการคำนวณเพื่อหาค่าแรงบิด, ประสิทธิภาพ, และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์ ดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 Digital power meter ที่ใช้ในการทดสอบ

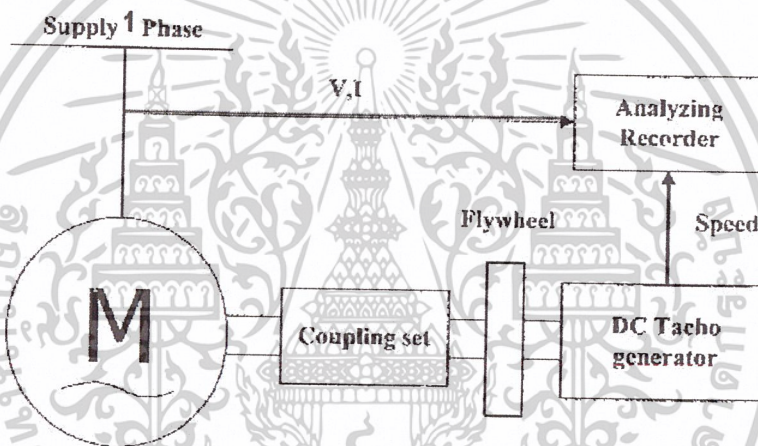
4.2.7 แทนทดสอบวิธี Load Test สำหรับมอเตอร์



รูปที่ 4-8 แทนสำหรับการทดสอบภาระของมอเตอร์

4.3 วิธีการทดสอบ

ในการทดสอบได้ทำการต่อมอเตอร์ โดยทำการต่อแหล่งจ่ายผ่าน analyzing recorder เพื่อบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ก่อนที่จะเข้าสู่มอเตอร์ โดยได้อะแกรมการต่อวงจรสำหรับทดสอบแสดงดังรูปที่ 4-9 ในการทดสอบจะต้องมีการทดสอบหลักอยู่ 2 ประเภทคือ การทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็วและการทดสอบด้วยวิธีการหน่วงความเร็ว ภายหลังจากการทดสอบทั้ง 2 แล้ว ก็จะทำการทดสอบกับภาระ (load test) เพื่อหาคุณลักษณะแรงบิด - ความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงความเร็วพิกัดถึงความเร็วในสถานะไร้ภาระ (no-load) ซึ่งมีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วจริง โครนต์ นอกจากนี้ก็ยังทำการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยใช้หลักการ Double Revolving Field Theory โดยการทดสอบทั้ง 2 อย่างนี้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบและเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือได้ของกราฟคุณลักษณะแรง - ความเร็วรอบของมอเตอร์จากการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็ว โดยรายละเอียดของการทดสอบทั้งหมดสามารถแจกแจงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4-9 ไดอะแกรมการต่อวงจรสำหรับทดสอบมอเตอร์

4.3.1 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation Test)

การทดสอบหน่วงความเร็วเป็นการทดสอบโดยอ้างอิงตาม IEC standard 34-2 การทดสอบกระทำโดยการเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำ จนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์เข้าสู่สถานะคงตัว จากนั้นทำการปลดแหล่งจ่ายออกแล้วทำการบันทึกความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์อยู่ในย่าน 100%-95% ของพิกัดความเร็วรอบ ภายหลังจากได้ข้อมูลของความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลง ให้นำข้อมูลดังกล่าวมาทำการหาแนวโน้มของข้อมูล โดยในการทดสอบจะทำการทดสอบโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยที่ทราบค่า และทำการทดสอบอย่างน้อย 2 ครั้ง โดยแต่ละครั้งต้องเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ต่างกัน จากนั้นนำข้อมูลแนวโน้มดังกล่าวมาทำการคำนวณแก้สมการ 2 ตัวแปรตามสมการที่ 3.6 และ 3.7 เพื่อทำการหาค่า โมเมนต์ความเฉื่อยและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานชนิด

4.3.2 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration Test)

การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วเป็นการทดสอบโดยอ้างอิงตาม IEEE standard 114-2001 ในการทดสอบจะทำการต่อมอเตอร์โดยป้อนแรงดัน 1 เฟสเท่ากับ 220 โวลต์ จากนั้นทำการสตาร์ทมอเตอร์จากสถานะเริ่มต้นที่แตกต่างกันคือ สถานะที่โรเตอร์หยุดนิ่งและสถานะที่โรเตอร์หมุนกลับทิศ ด้วยวิธีสตาร์ทตรง (direct-on-line starting) ในการทดสอบแต่ละครั้งจะทำการเปลี่ยนขนาดของล้อช่วยแรงให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่าง ๆ กัน เพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่อผลการทดลอง โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงมีขนาดดังแสดงในตารางที่ 4-3 และ 4-4 ในการทดสอบนั้นจะทำการบันทึกข้อมูลแรงดัน , กระแส , ความเร็วรอบ และเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์เข้าสู่สถานะคงตัว ที่ความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed)

4.3.3 การทดสอบภาระของมอเตอร์ (Load Test)

ในการทดสอบภาระของมอเตอร์ ทำการทดสอบโดยการคัปปลิ้งมอเตอร์เข้ากับเครื่องวัดแรงบิดและ DC Generator จากนั้นก็ค่อย ๆ เพิ่มแรงดันทีละขนาดให้กับทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ และ DC Generator จนถึงค่าพิกัดกระแสของมอเตอร์แต่ละตัว เพื่อจ่ายไฟให้กับภาระทางไฟฟ้าแล้วทำการบันทึกผลด้วย Digital power meter ดังแสดงในรูปที่ 4-8

4.3.4 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้หลักการ Double Revolving Field Theory

การทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์กระทำเช่นเดียวกับวิธีการทางทฤษฎี ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การทดสอบที่สถานะ ไร้อภาระ (No-load)
2. การทดสอบล๊อคโรเตอร์ (Locked Rotor Test)
3. การทดสอบ V-I (V-I Method)

โดยทุกขั้นตอนจะทำการบันทึกผลด้วย Digital power meter แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณตามสูตรทางทฤษฎี

4.4 ผลการทดสอบ

4.4.1 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation Test)

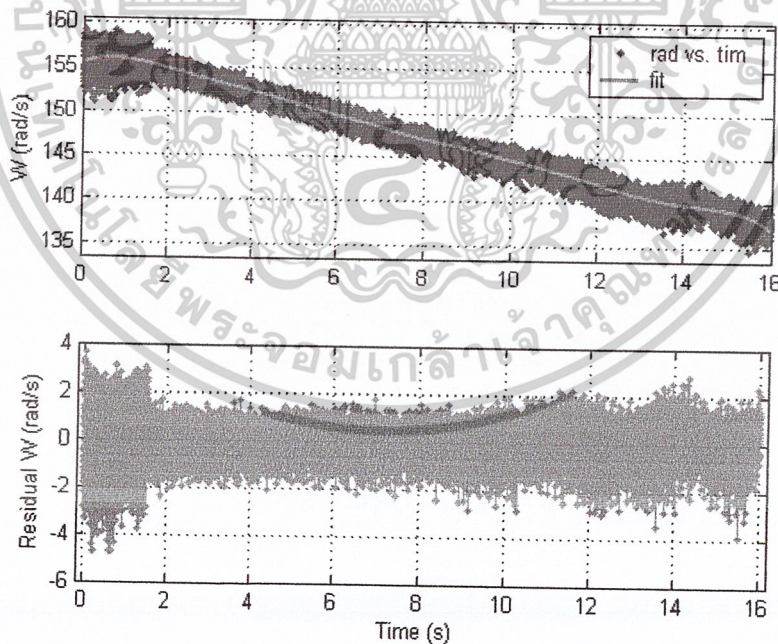
ผลการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว จะได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของ โรเตอร์และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเหน็ดของระบบทดสอบ

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

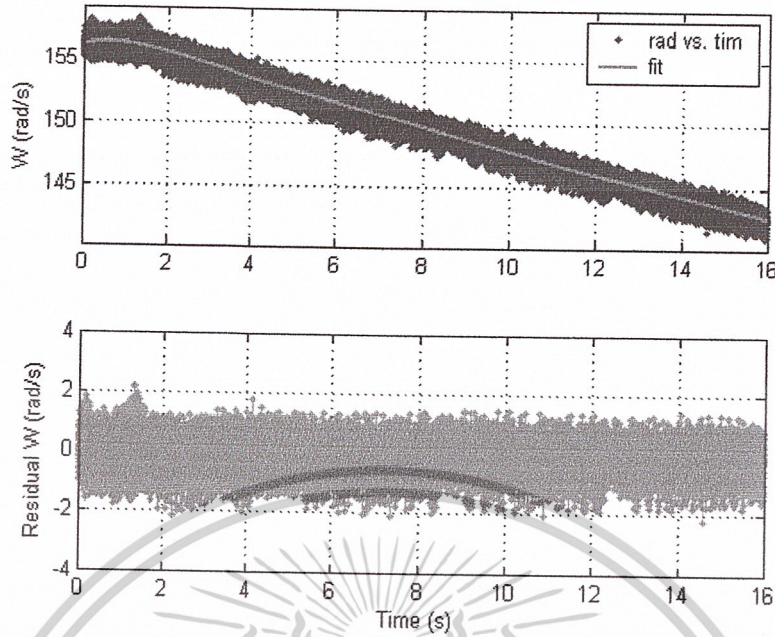
ตารางที่ 4-5 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า

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

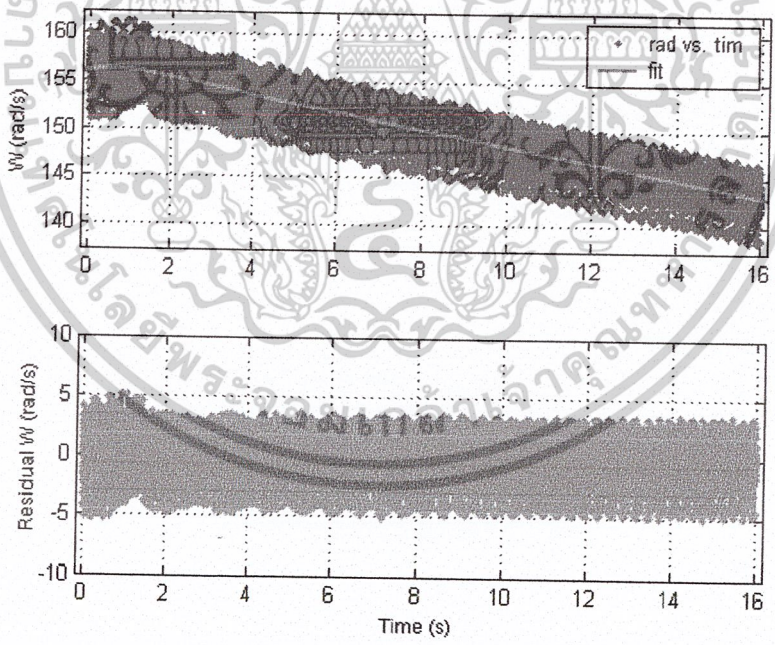
ตารางที่ 4-6 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า



รูปที่ 4-10 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2

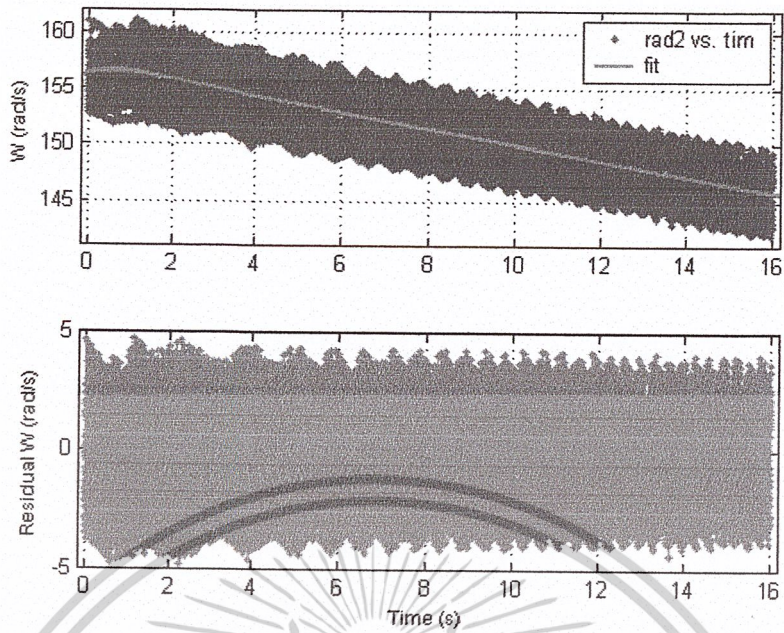


รูปที่ 4-11 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2

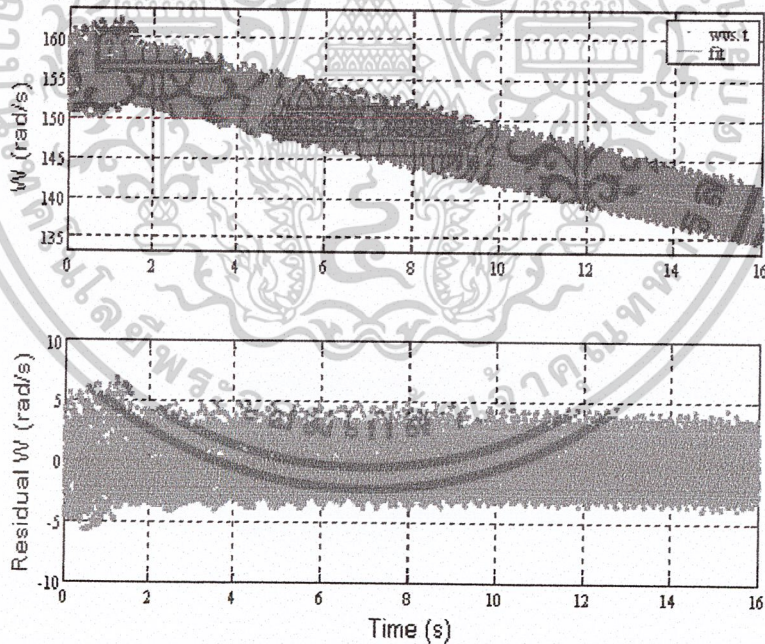


รูปที่ 4-12 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2

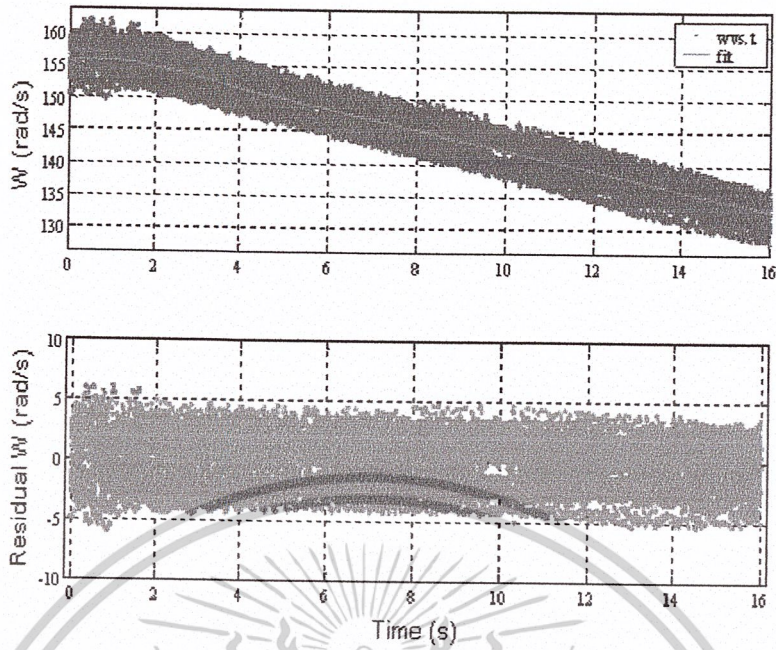
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



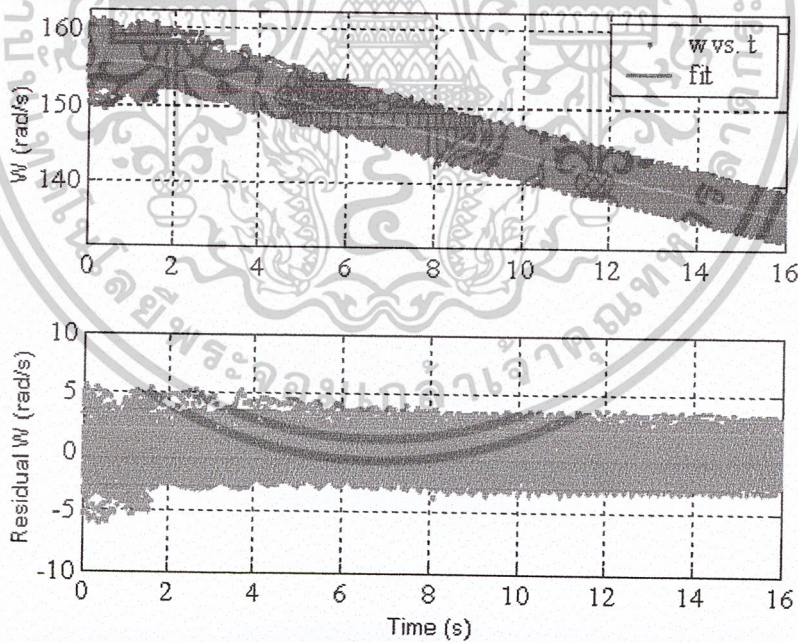
รูปที่ 4-13 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบ
กับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2



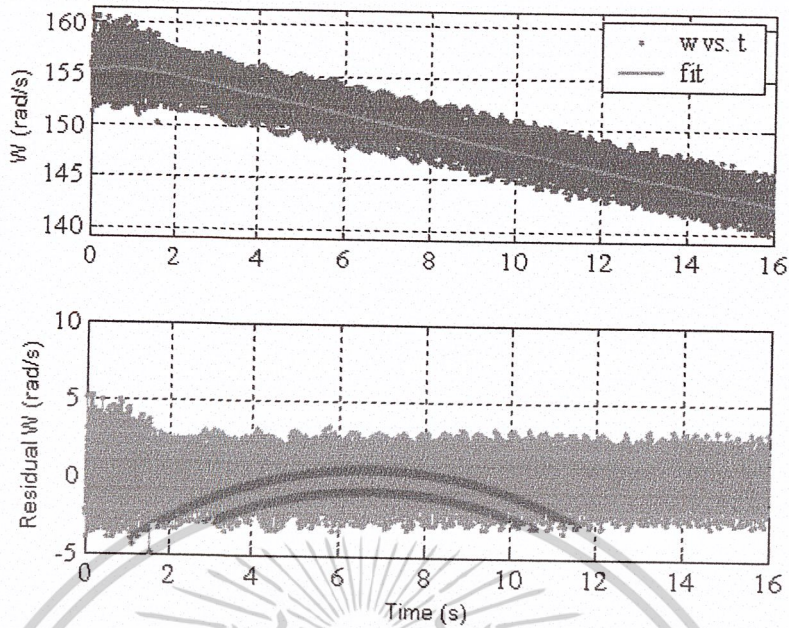
รูปที่ 4-14 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับ
ล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2



รูปที่ 4-15 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบกับ
ล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2



รูปที่ 4-16 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบ
กับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2

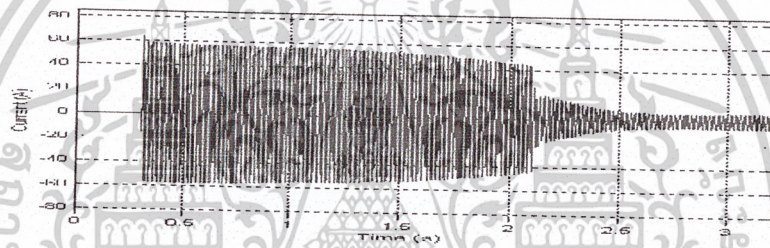
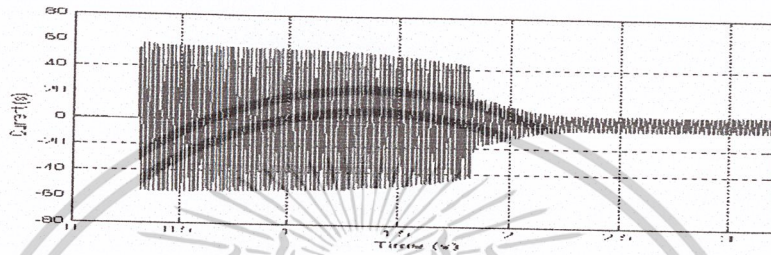
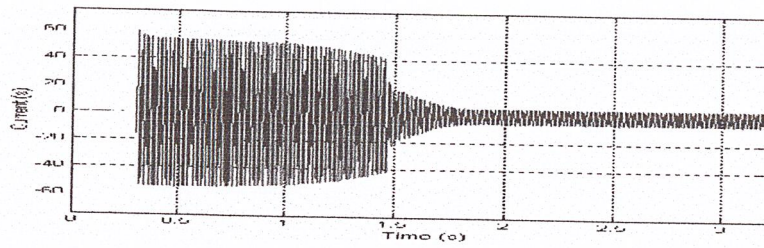


รูปที่ 4-17 ผลการทดสอบ retardation test ของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้าเมื่อทำการทดสอบ
กับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2

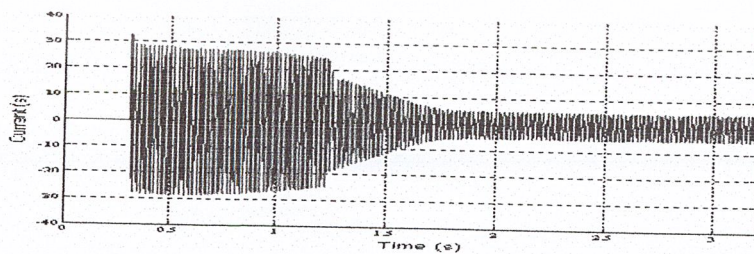
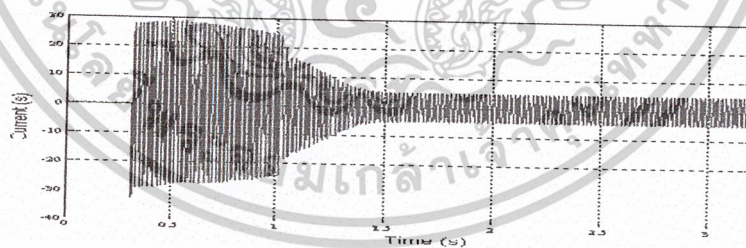
จากผลการทดลองในรูปที่ 4-10 ถึงรูปที่ 4-17 เป็นการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) ซึ่งแต่ละรูปแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วรอบลง โดยเส้นสีแดงในแต่ละรูปเป็นเส้นแนวโน้มการลดความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้วิธี polynomial regression โดยพล็อตร่วมกับข้อมูลจริง ส่วนรูปล่างจะเป็นค่า error ที่ได้จากผลต่างระหว่างข้อมูลจริงกับค่าที่ได้จากสมการแนวโน้ม ซึ่งการพิจารณาความเหมาะสมของเส้นแนวโน้มสามารถพิจารณาจากความสมมาตรของข้อมูล error ได้ภายหลังได้เส้นแนวโน้มของแต่ละการทดสอบแล้วเมื่อนำมาทำการคำนวณตามสมการที่ 3.6 และ 3.7 จะได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ (J_m) ดังแสดงในตารางที่ 4-5 และ 4-6

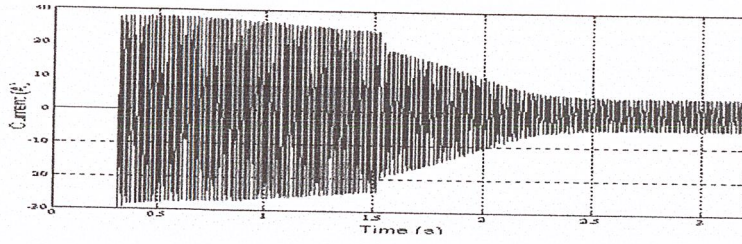
4.4.2 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration Test)

4.4.2.1 รูปคลื่นกระแสของมอเตอร์ทั้ง 2 ขนาดในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว

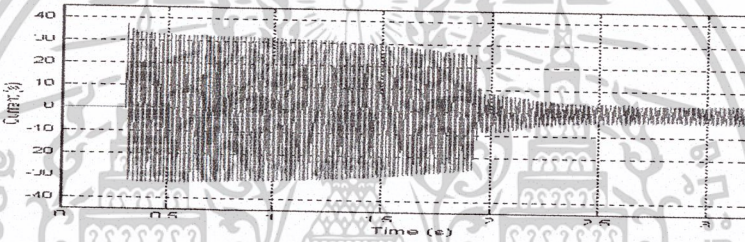
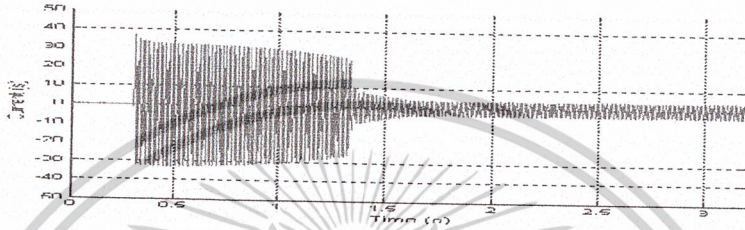


รูปที่ 4-18 รูปคลื่นกระแสของเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับสล็อตช่วยแรงขนาดต่างๆ กัน

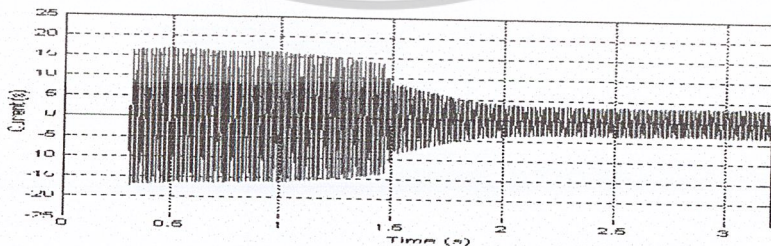
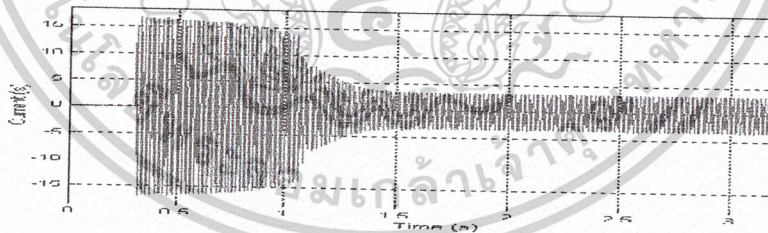




รูปที่ 4-19 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ *Capacitor Start* ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับ
 สล่อช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน

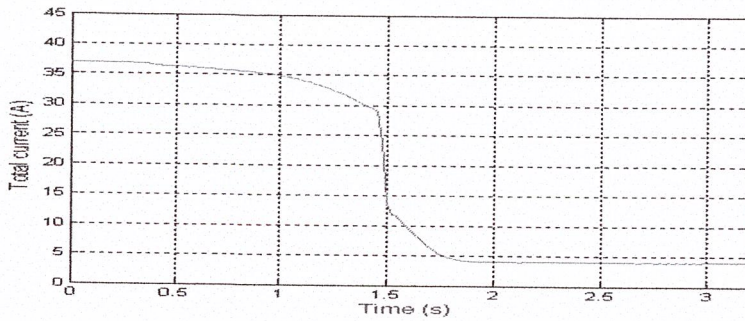


รูปที่ 4-20 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ *Split Phase* ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับสล่อ
 ช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน

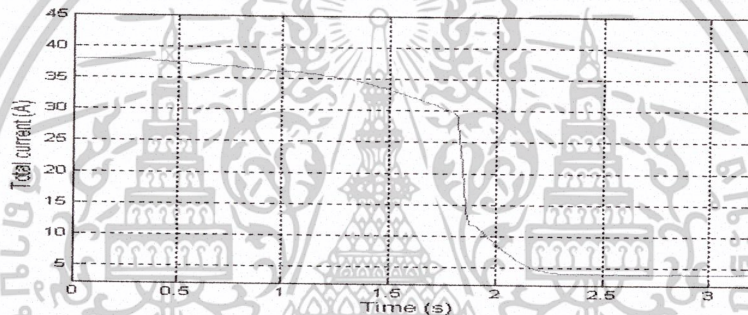


รูปที่ 4-21 รูปคลื่นกระแสขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์ *Capacitor Start* ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับ
 สล่อช่วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน

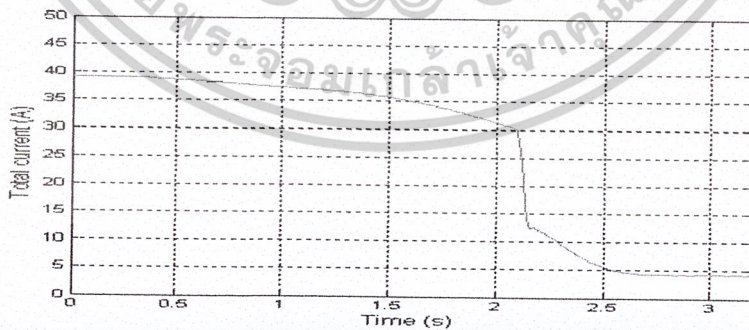
4.4.2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า rms ของกระแส และ เวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว



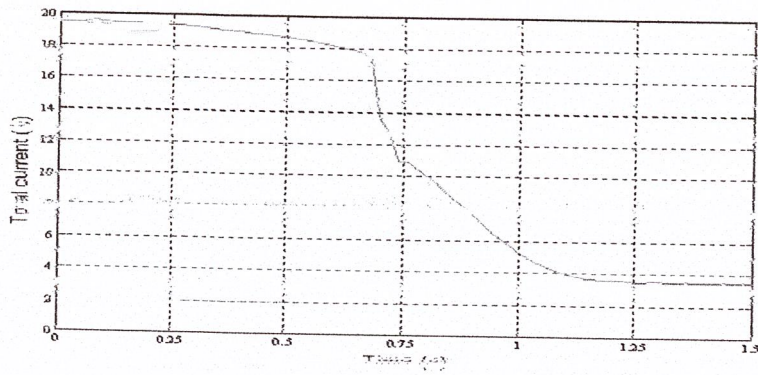
รูปที่ 4-22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ *Split phase* ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ
ล้อช่วยแรงขนาด 0.05973 kg-m^2



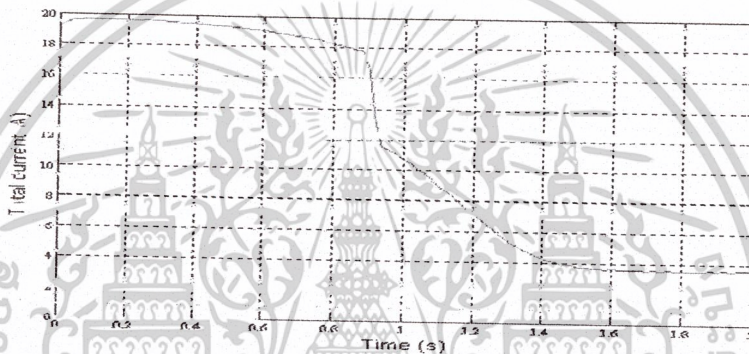
รูปที่ 4-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ *Split phase* ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ
ล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2



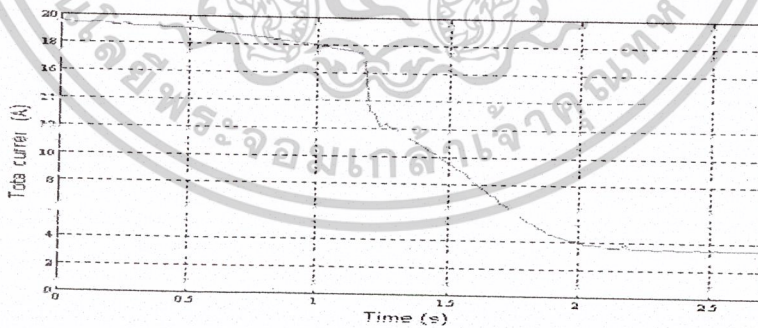
รูปที่ 4-24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ *Split phase* ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ
ล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2



รูปที่ 4-25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ *Capacitor start* ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05973 kg-m^2

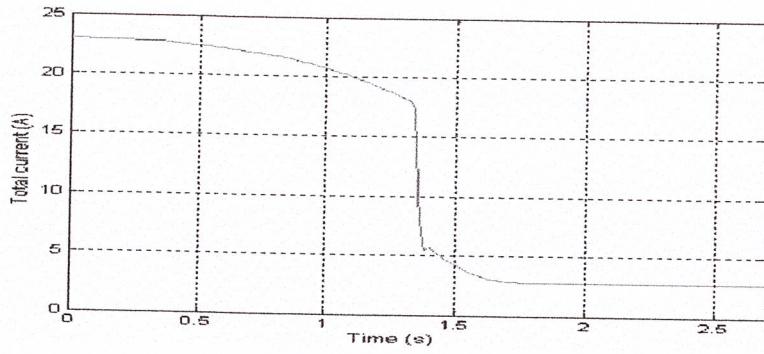


รูปที่ 4-26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ *Capacitor start* ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2

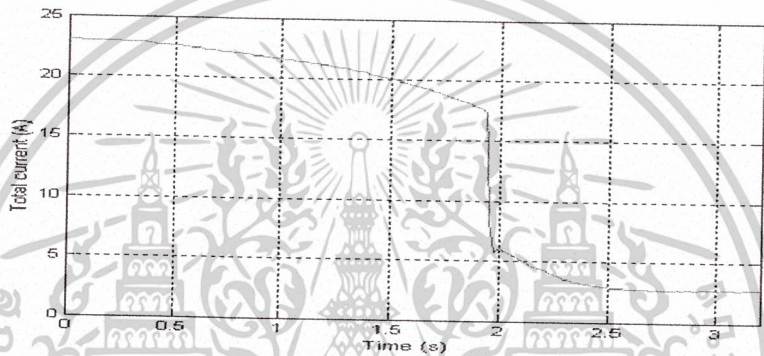


รูปที่ 4-27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ *Capacitor start* ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อ

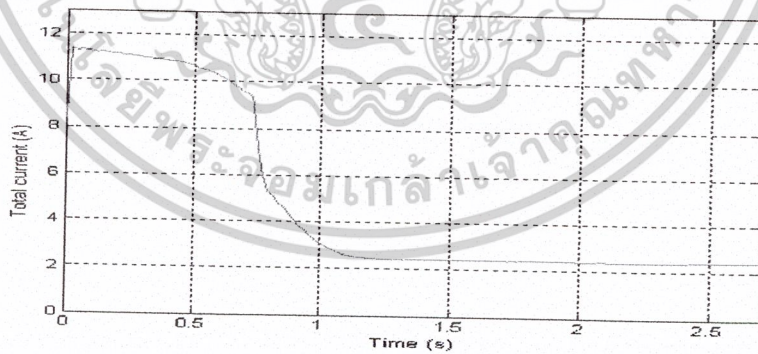
ทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2



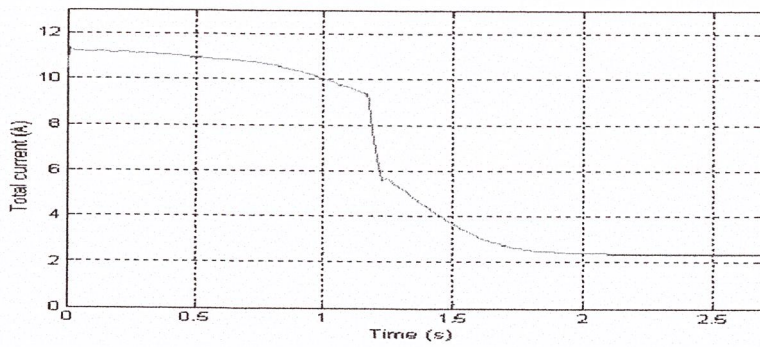
รูปที่ 4-28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ
 สือช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2



รูปที่ 4-29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับ
 สือช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2



รูปที่ 4-30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อ
 ทดสอบกับสือช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2



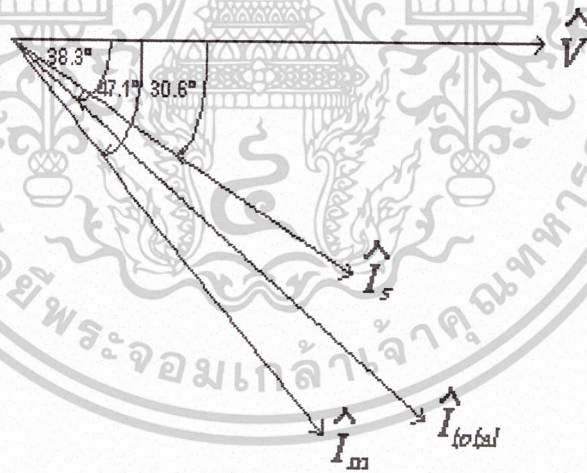
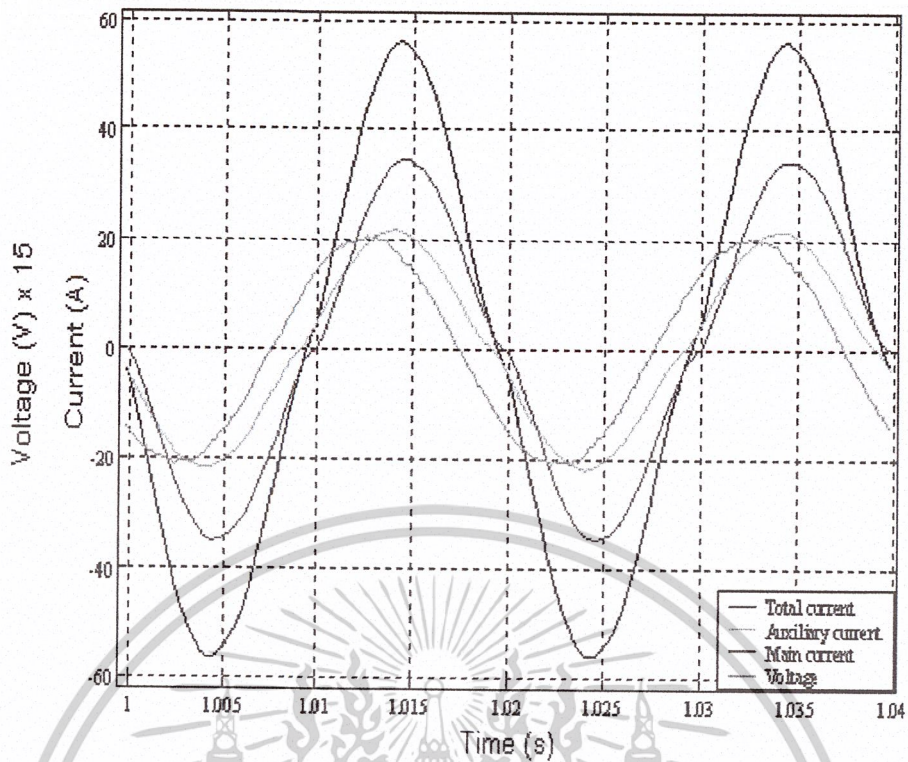
รูปที่ 4-31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของมอเตอร์ *Capacitor start* ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2

จากผลการทดลองในรูปที่ 4-18 ถึงรูปที่ 4-21 เป็นการนำเสนอรูปคลื่นของกระแสของมอเตอร์ทั้ง 2 ขนาดในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว โดยกราฟแต่ละรูปเป็นการทดสอบกับล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่างๆ กัน

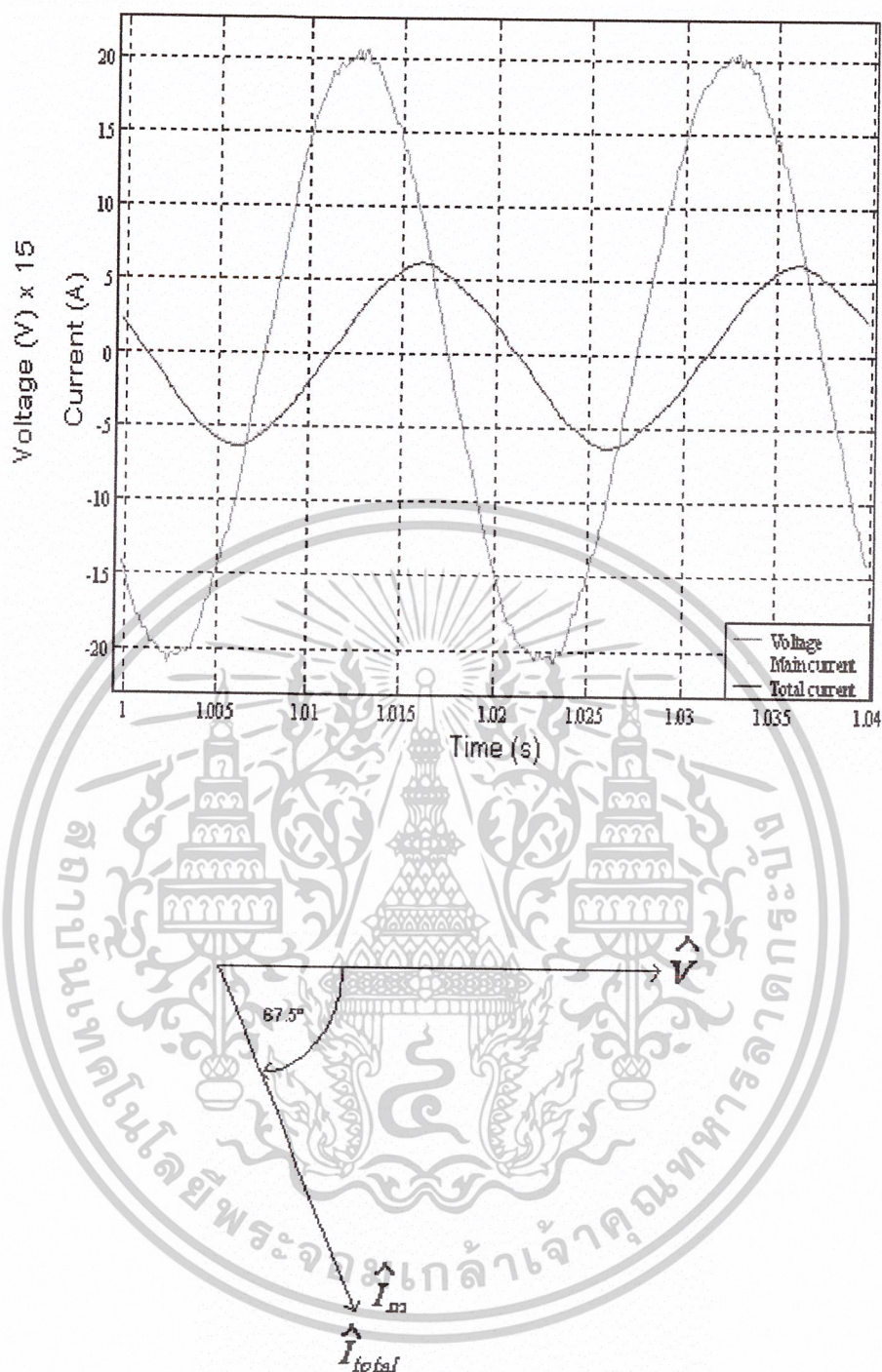
ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 4-22 ถึงรูปที่ 4-31 เป็นการนำเสนอผลการคำนวณค่า rms ของคลื่นกระแสในรูปที่ 4-18 ถึงรูปที่ 4-21

4.4.2.3 การวิเคราะห์เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

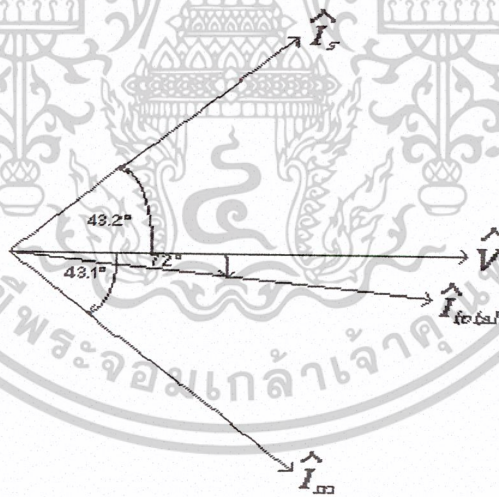
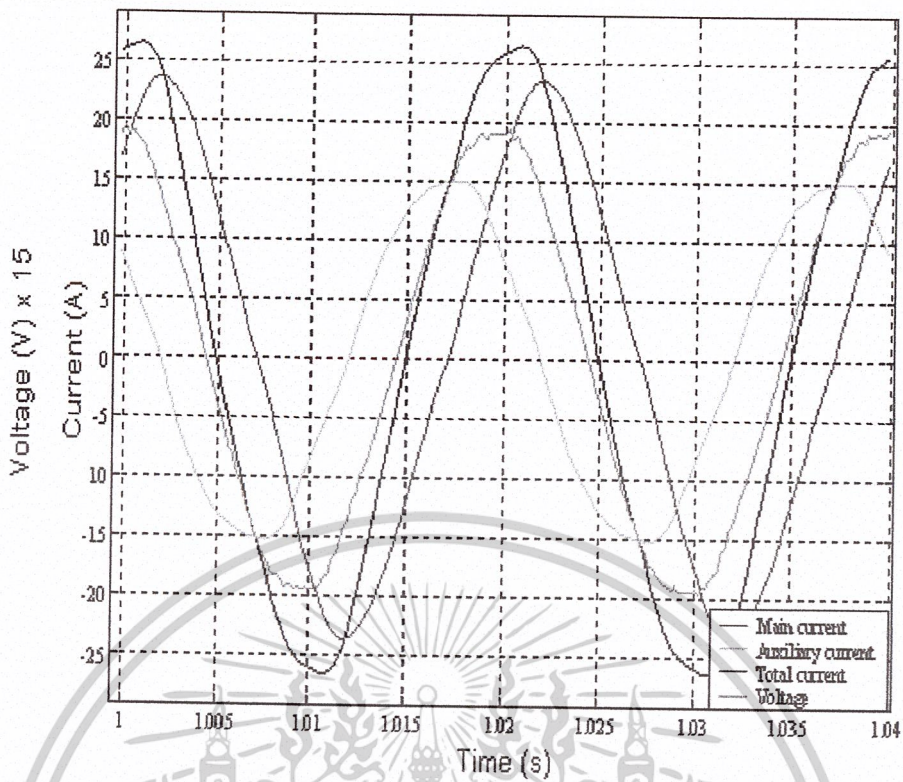
ในส่วนของการวิเคราะห์จะทำการพล็อตรูปคลื่นของแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, กระแสของขดลวดช่วย และส่วนของกระแสรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยจะวิเคราะห์ในช่วงที่กระแสขดลวดช่วยทำงาน จุดก่อนและหลังถูกตัดออกจากวงจรด้วยสวิตช์แรงเหวี่ยง และนำเสนอผลของการวิเคราะห์ด้วยเฟสเซอร์ของรูปกราฟแต่ละรูป ซึ่งแสดงผลดังแสดงตามรูปที่ 4-32 ถึงรูปที่ 4-39



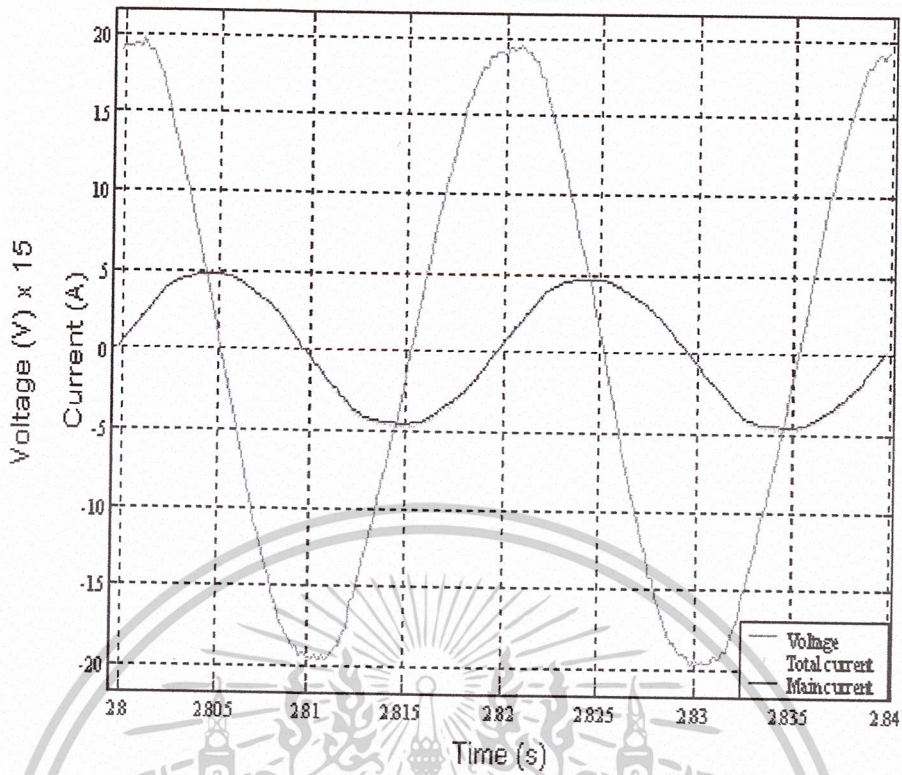
รูปที่ 4-32 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น



รูปที่ 4-33 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลักและกระแสรวมของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า หลังขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น

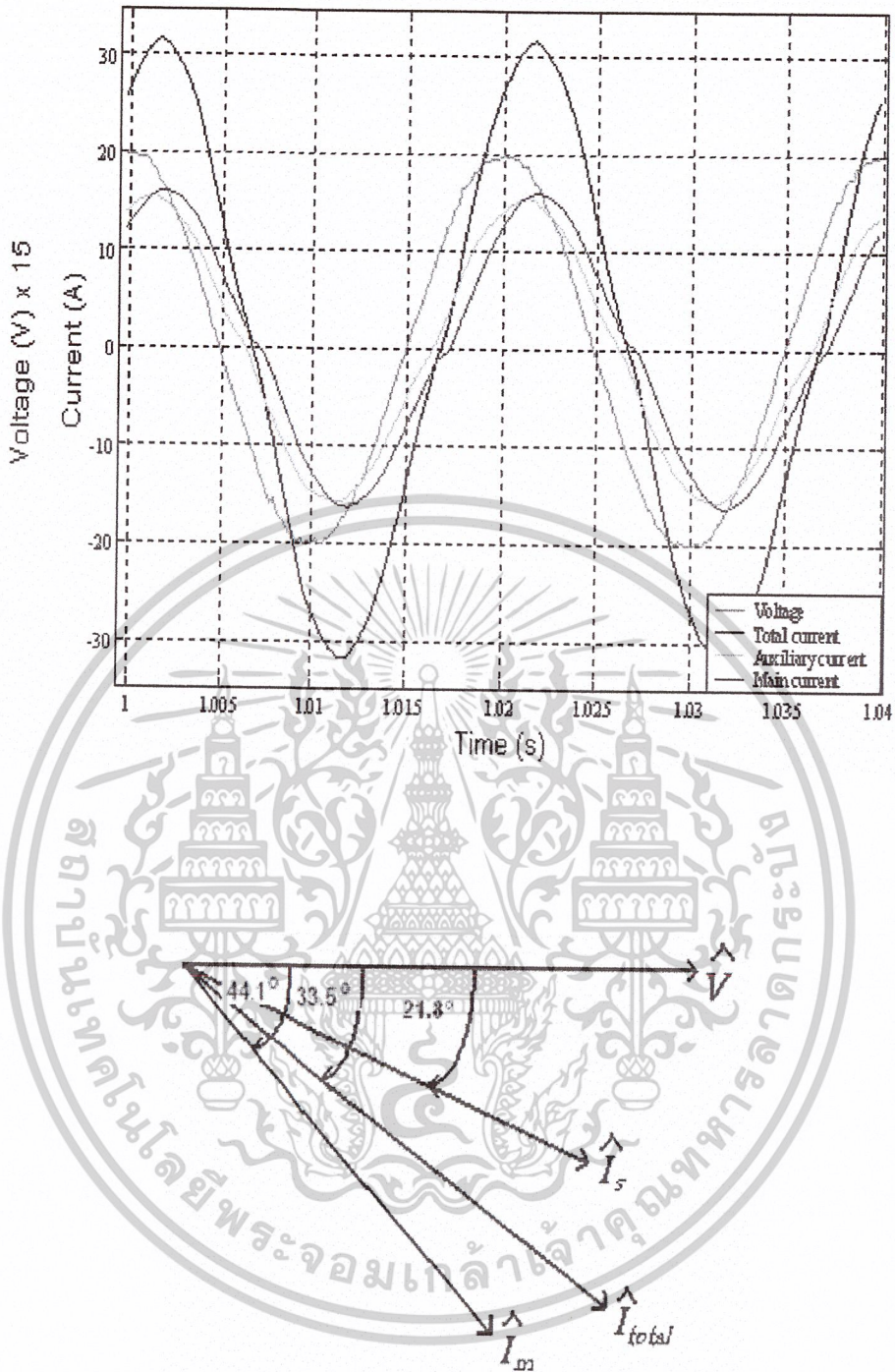


รูปที่ 4-34 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ *capacitor start* ขนาด 1/2 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น

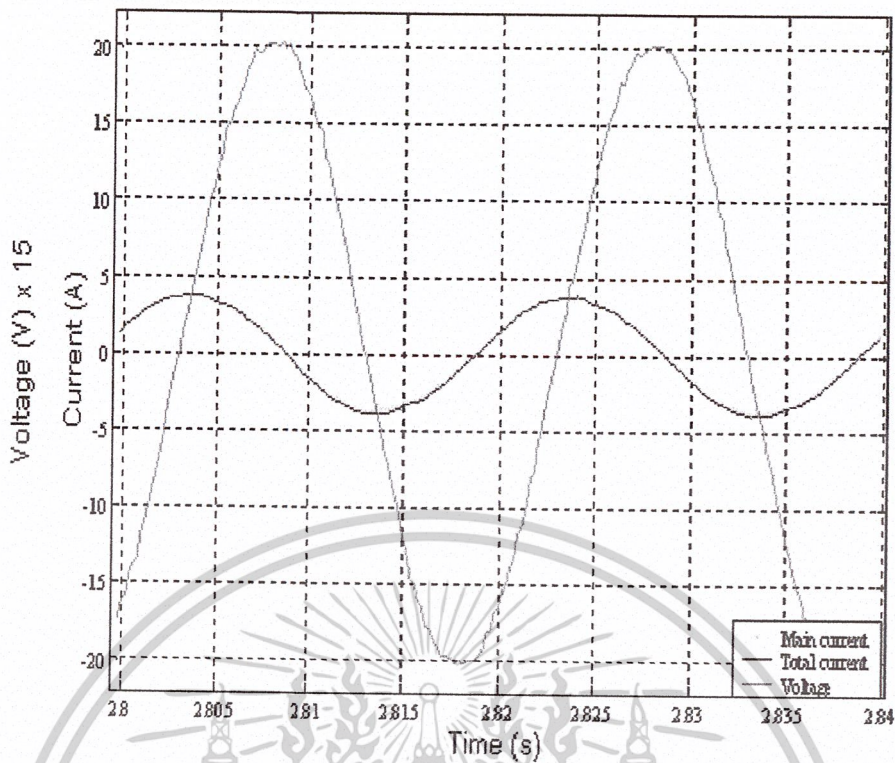


รูปที่ 4-35 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลักและกระแสรวมของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า หลังขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น

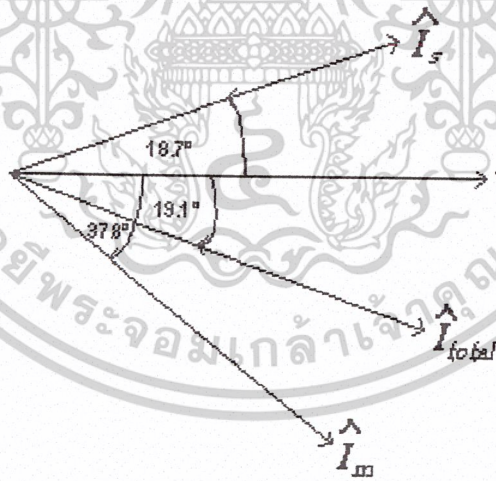
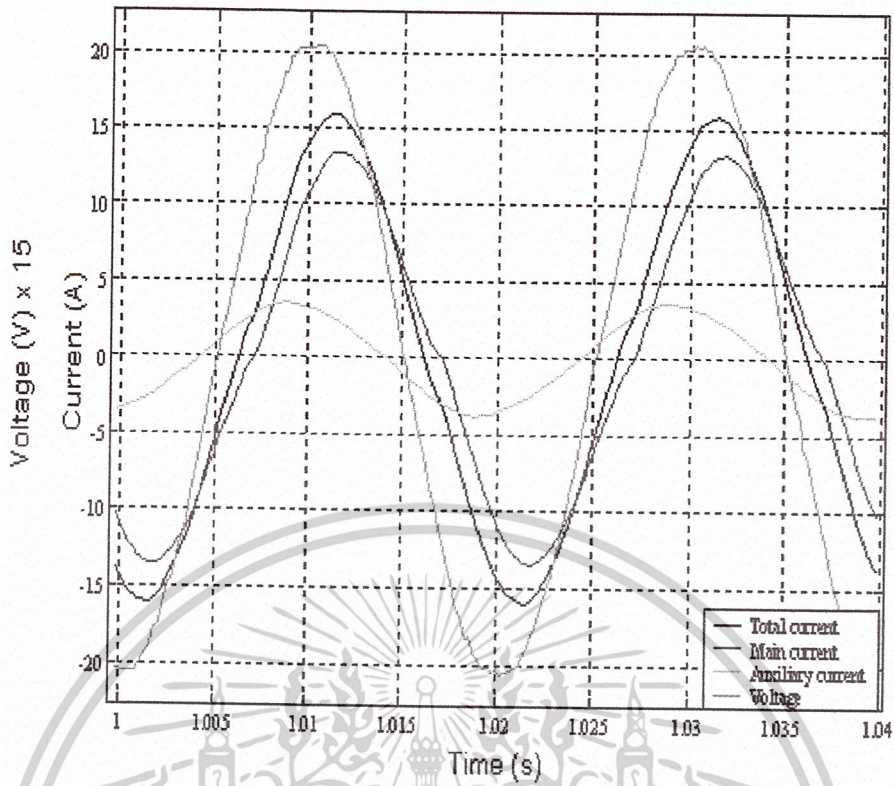
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-36 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น

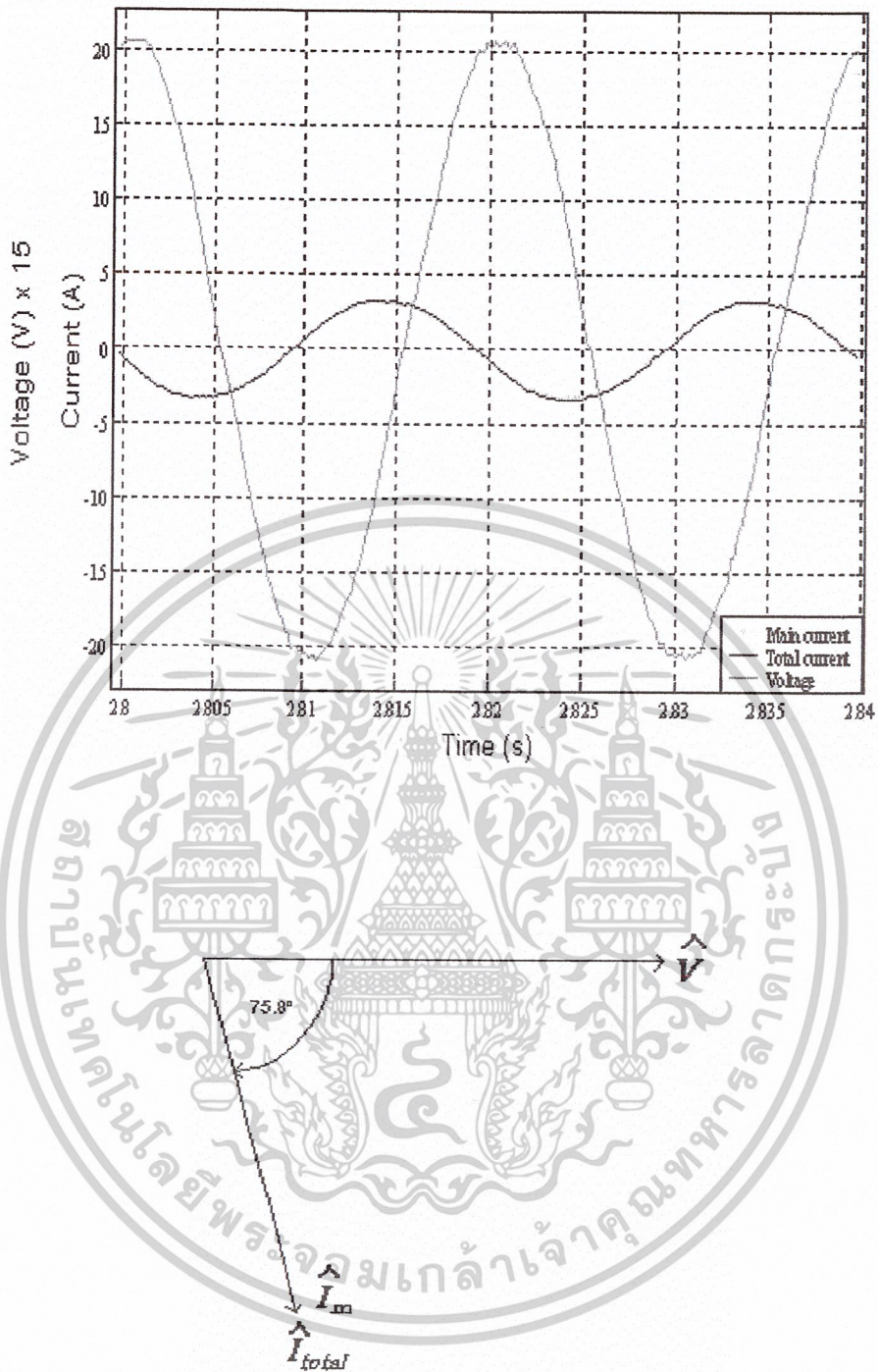


รูปที่ 4-37 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลักและกระแสรวมของมอเตอร์ *split phase* ขนาด 1/4 แรงม้า หลังขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น



รูปที่ 4-38 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดช่วยและกระแสรวมของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า ก่อนขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น

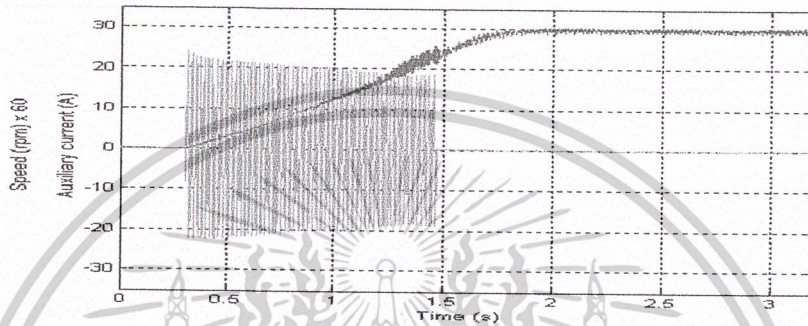
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



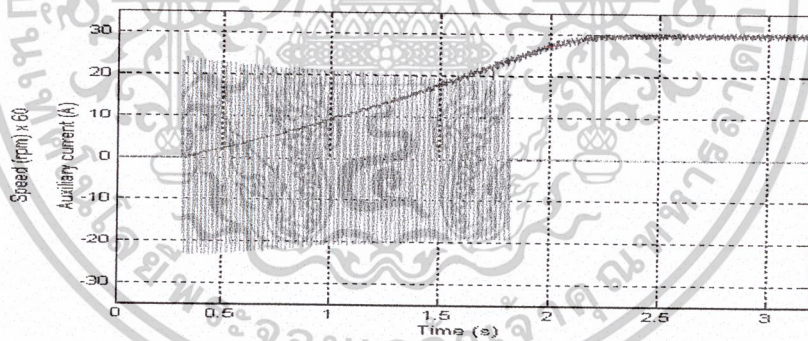
รูปที่ 4-39 กราฟแสดงแรงดัน, กระแสของขดลวดหลักและกระแสรวมของมอเตอร์ *capacitor start* ขนาด 1/4 แรงม้า หลังขดลวดช่วยตัดออก และเฟสเซอร์ของรูปคลื่น

ในส่วนต่อไปจะเป็นการนำเสนอผลการทดลอง ในรูปแบบของข้อมูลของอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ ในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วพร้อมกับพล็อตกระแสของขดลวดช่วย โดยจะทำการนำเสนอผลการทดลองใน รูปที่ 4-40 ถึงรูปที่ 4-49 ซึ่งการพิจารณาผลการทดลองนั้นสามารถอาศัยวิธีการเช่นเดียวกับการพิจารณาค่า rms ของกระแส

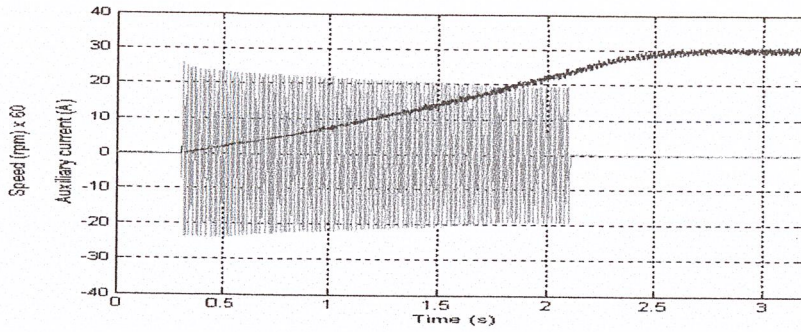
4.4.2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และ เวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว พร้อมกับกราฟของกระแสขดลวดช่วย



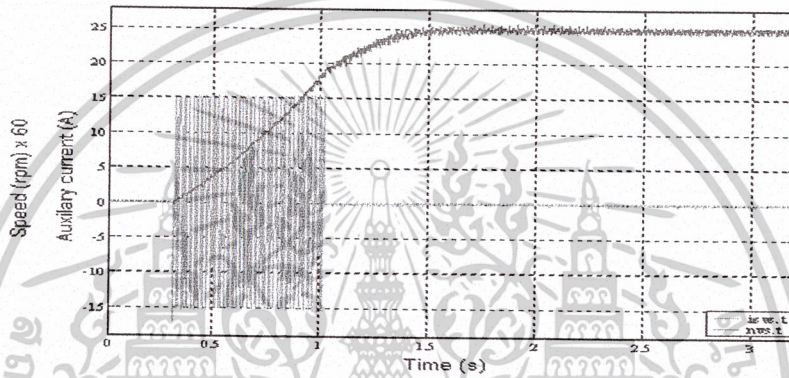
รูปที่ 4-40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2



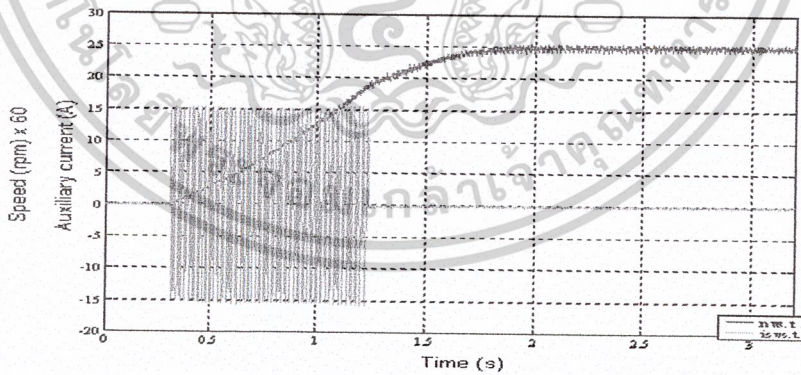
รูปที่ 4-41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2



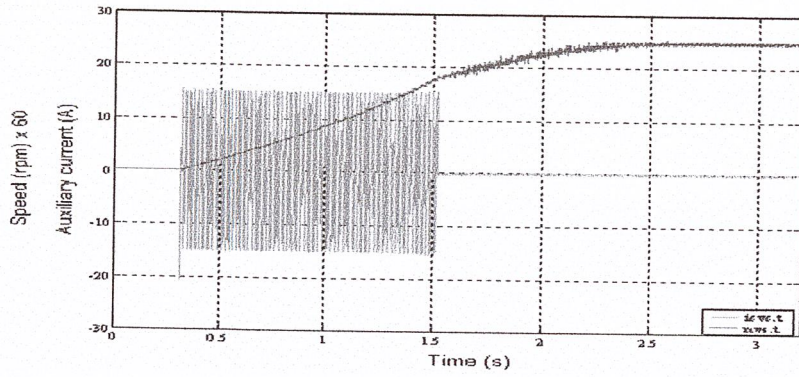
รูปที่ 4-42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2



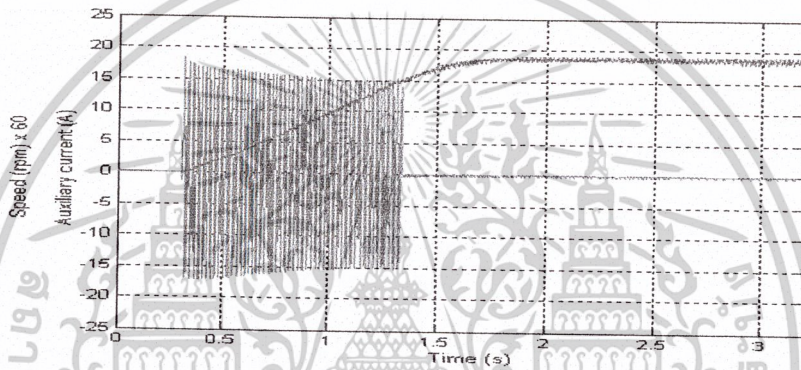
รูปที่ 4-43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2



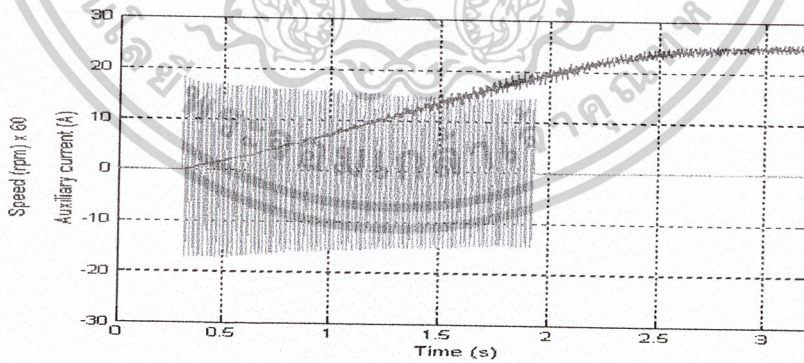
รูปที่ 4-44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสขดลวดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2



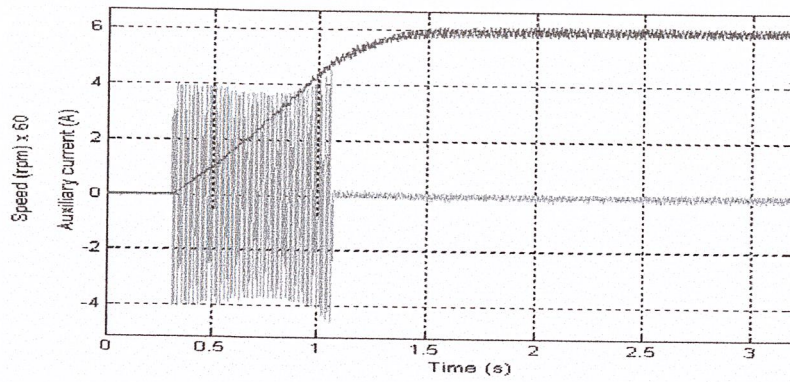
รูปที่ 4-45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสลดความเร็วของมอเตอร์ *Capacitor start* ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2



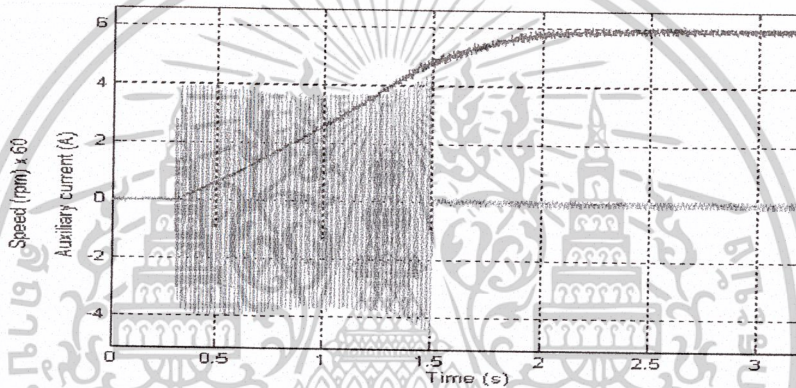
รูปที่ 4-46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสลดความเร็วของมอเตอร์ *Split Phase* ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2



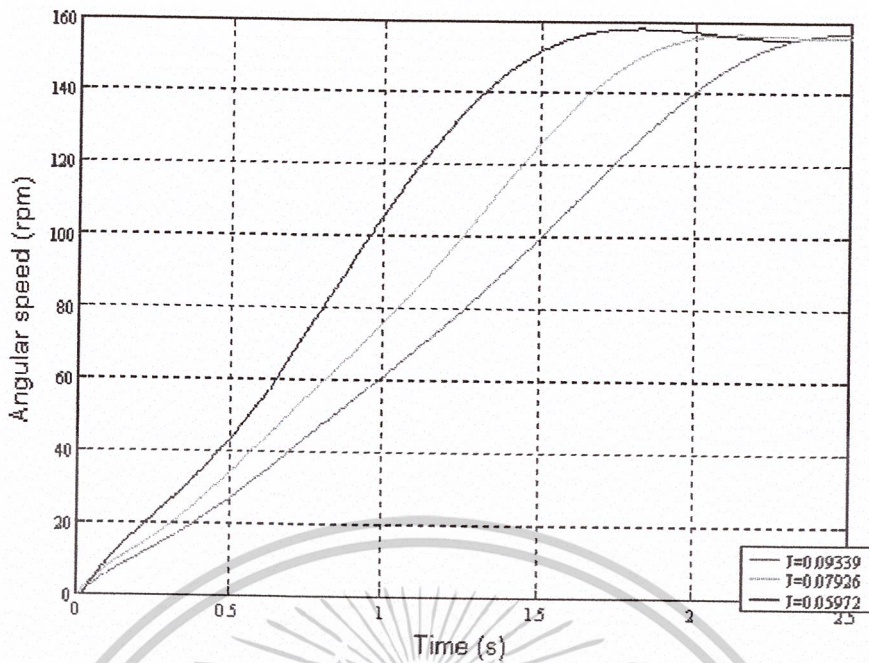
รูปที่ 4-47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสลดความเร็วของมอเตอร์ *Split Phase* ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2



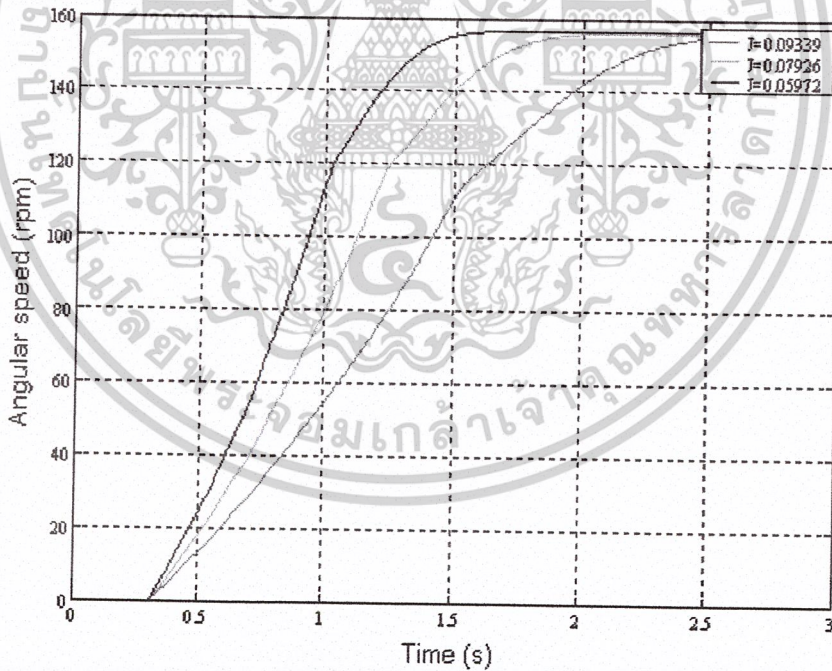
รูปที่ 4-48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสคลดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2



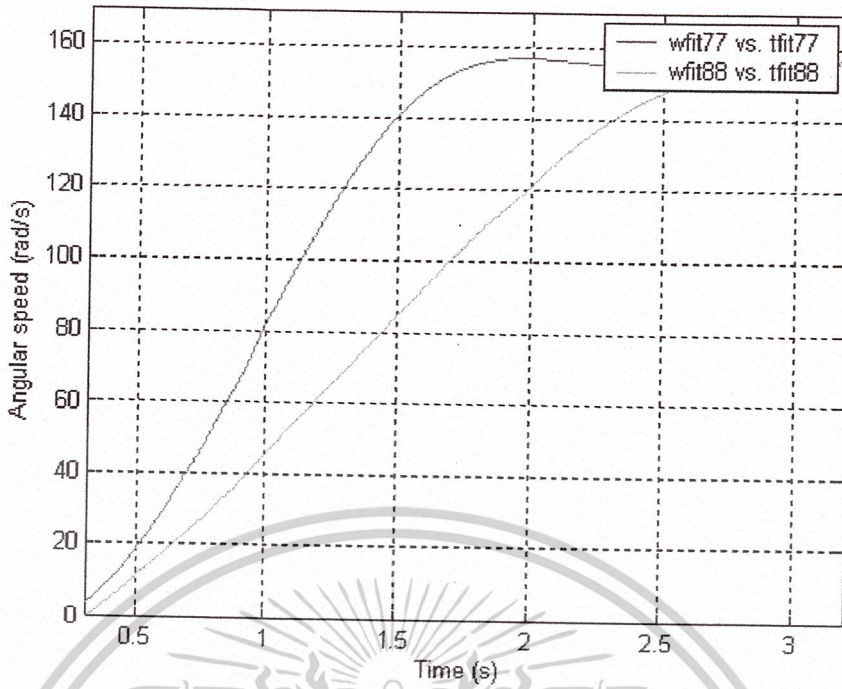
รูปที่ 4-49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาพร้อมกับกระแสคลดช่วยของมอเตอร์ Capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2



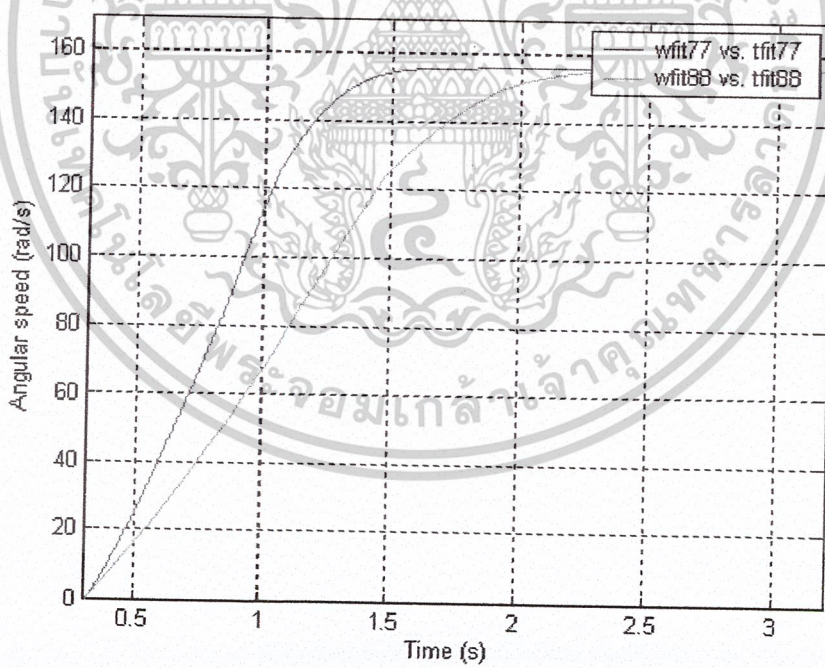
รูปที่ 4-50 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/2 แรงม้า



รูปที่ 4-51 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/2 แรงม้า



รูปที่ 4-52 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Split Phase ขนาด 1/4 แรงม้า



รูปที่ 4-53 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ Capacitor Start ขนาด 1/4 แรงม้า

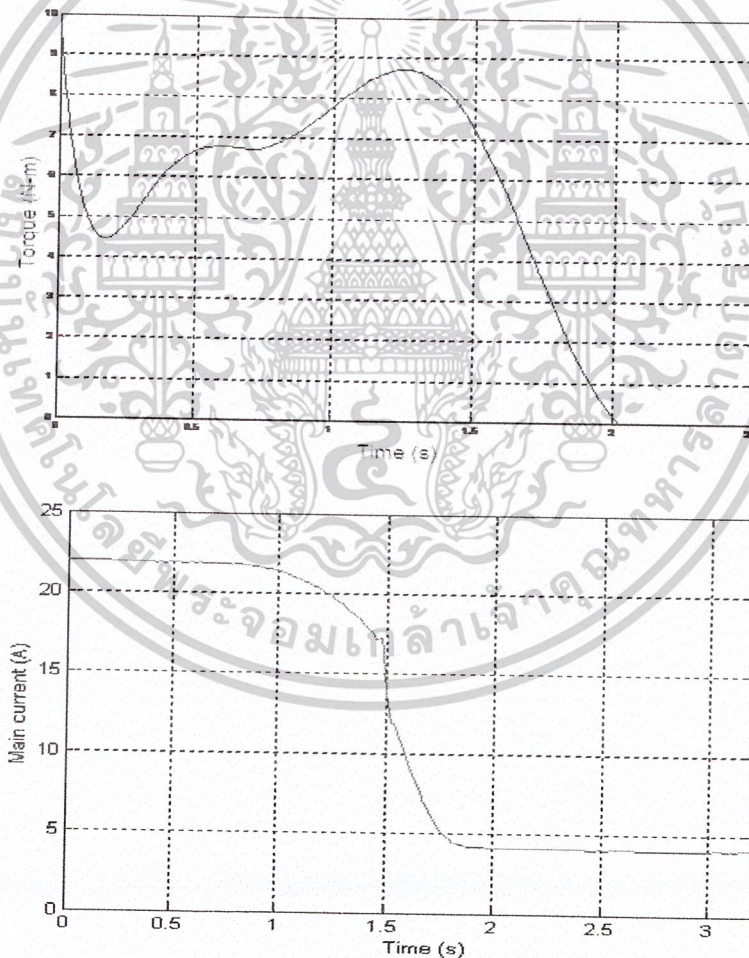
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

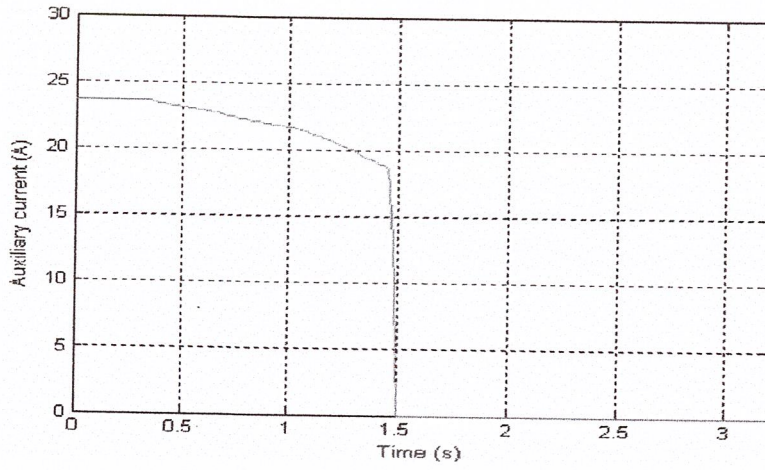
จากรูปที่ 4-50 ถึงรูปที่ 4-53 เป็นการแสดงผลของสมการที่ 3.3 ซึ่งเป็นสมการที่แสดงให้เห็นถึงผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบต่อเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์มีค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้เวลาในการเร่งความเร็วมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

4.4.2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-เวลาเปรียบเทียบกับ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของขดลวดหลัก-เวลา และ กระแสของขดลวดช่วย-เวลา

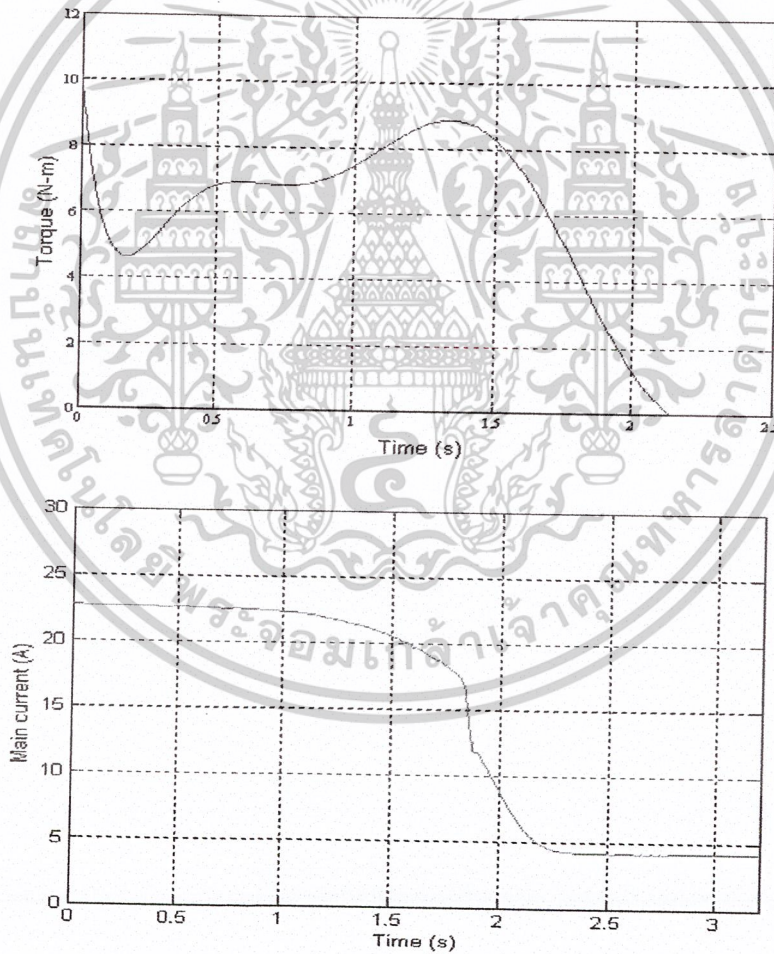
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบค่าของแรงบิดและกระแสในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็ว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของขดลวดทั้ง 2 ชนิดและแรงบิดของมอเตอร์ ณ เวลาในการเร่งความเร็วต่าง ๆ กัน

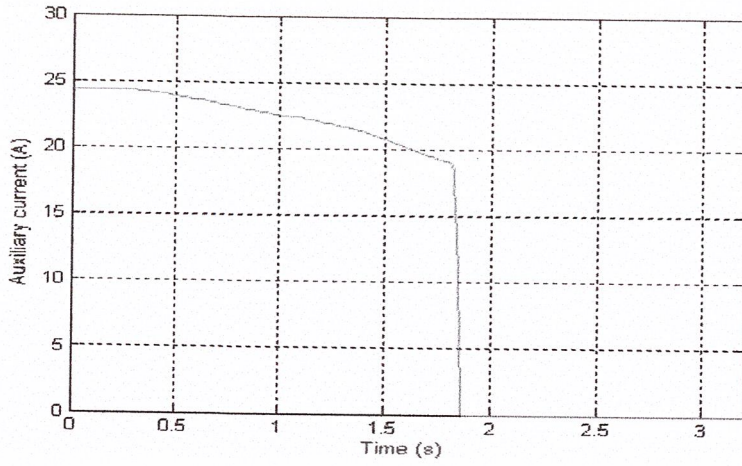
ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-เวลา และ กระแสของขดลวดทั้ง 2 ชนิด-เวลาของมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4-54 ถึงรูปที่ 4-63



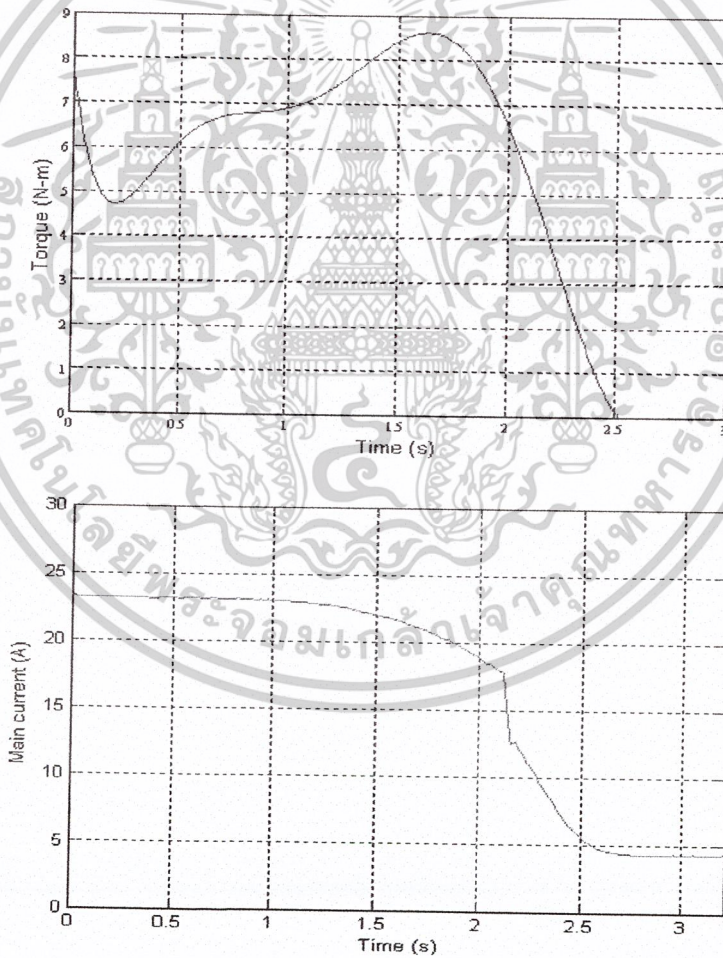


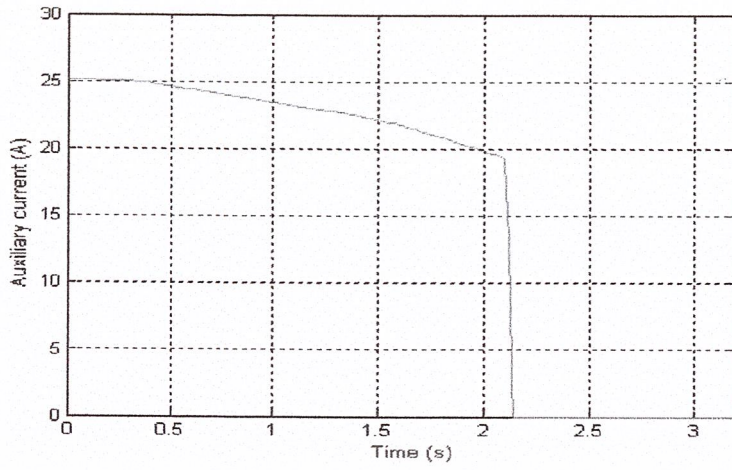
รูปที่ 4-54 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2



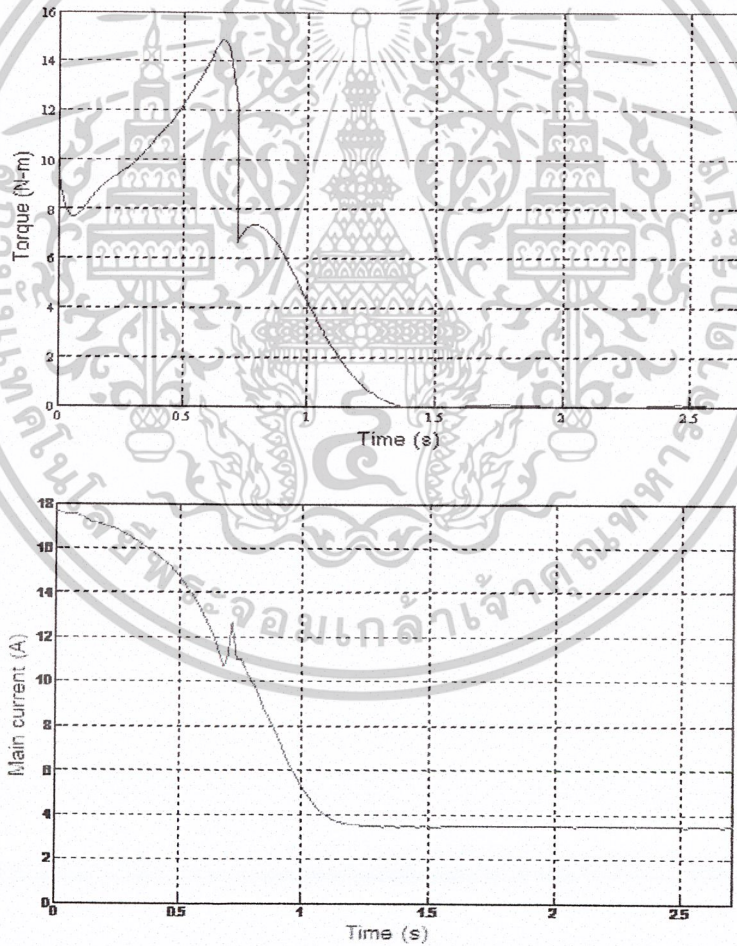


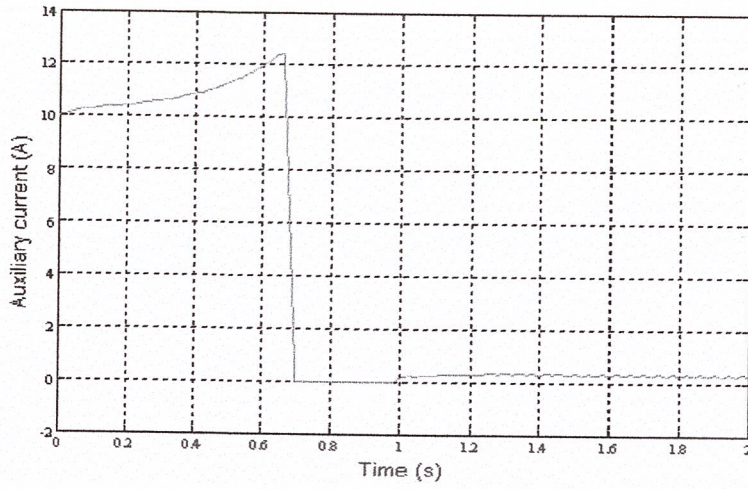
รูปที่ 4-55 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2



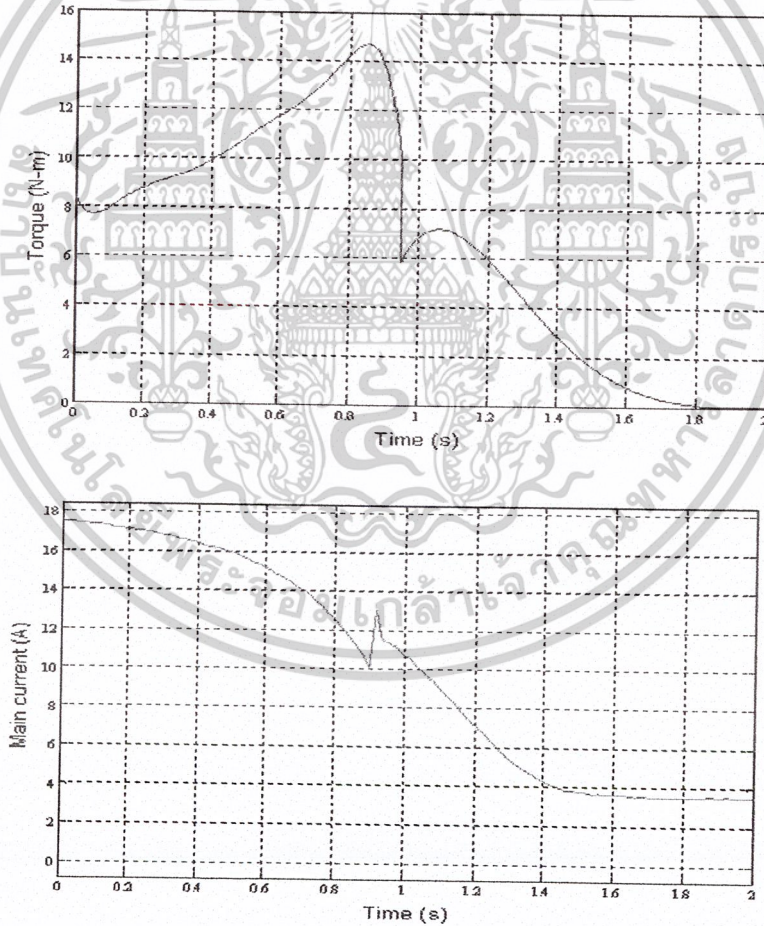


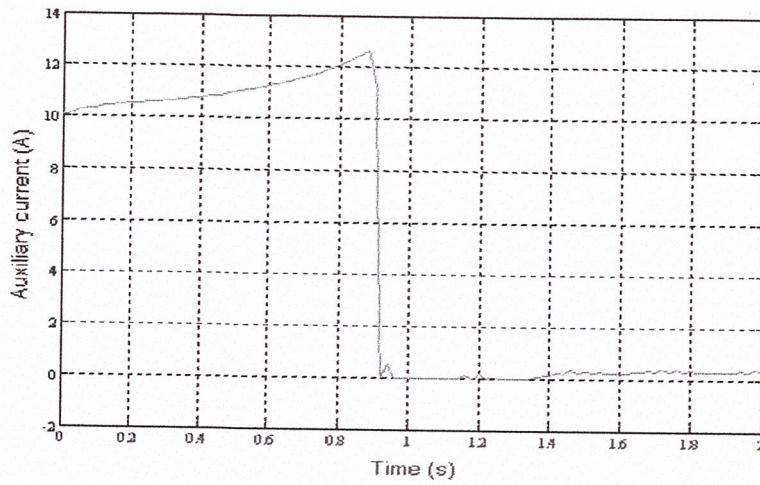
รูปที่ 4-56 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2



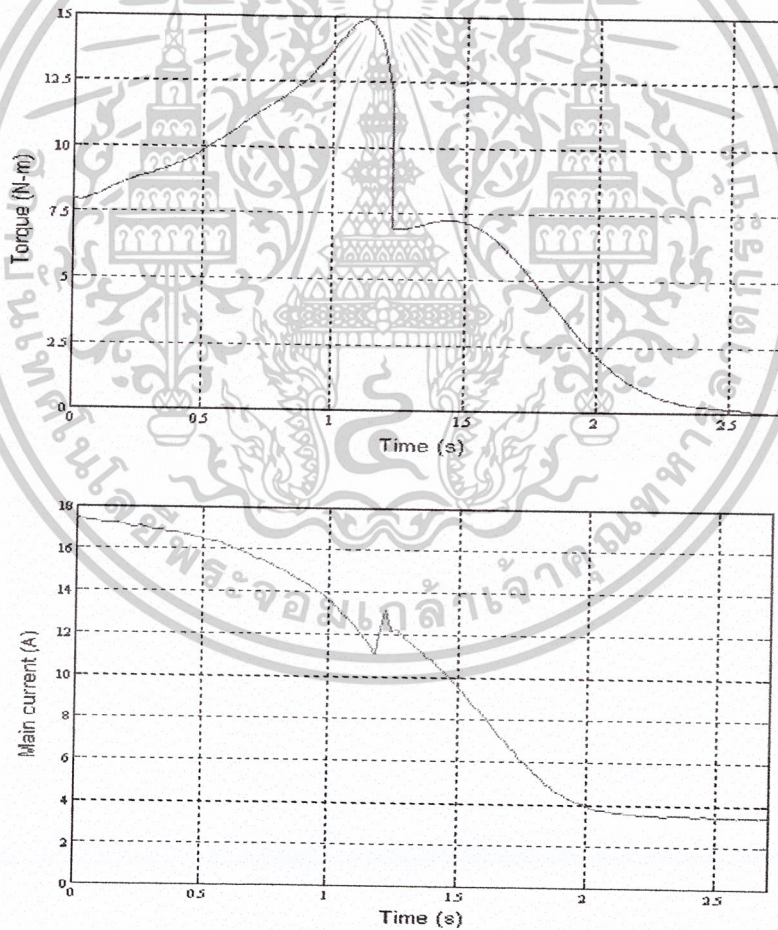


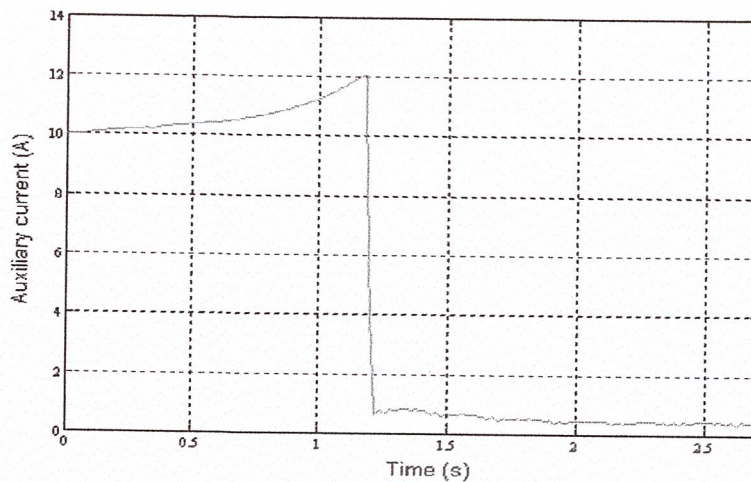
รูปที่ 4-57 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ *capacitor start* ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.05972 kg-m^2



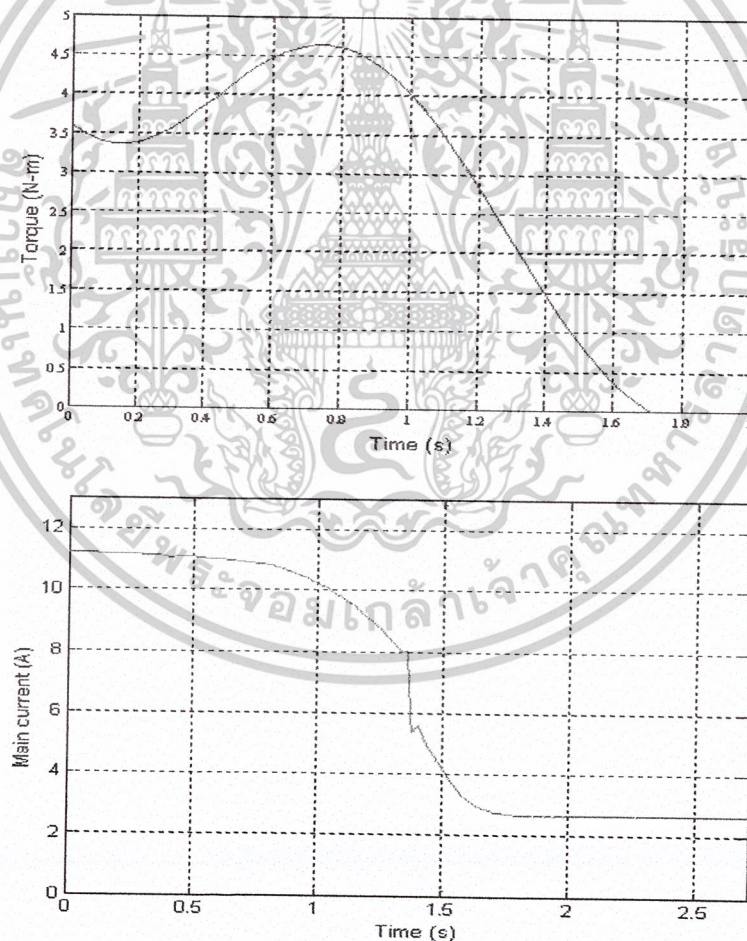


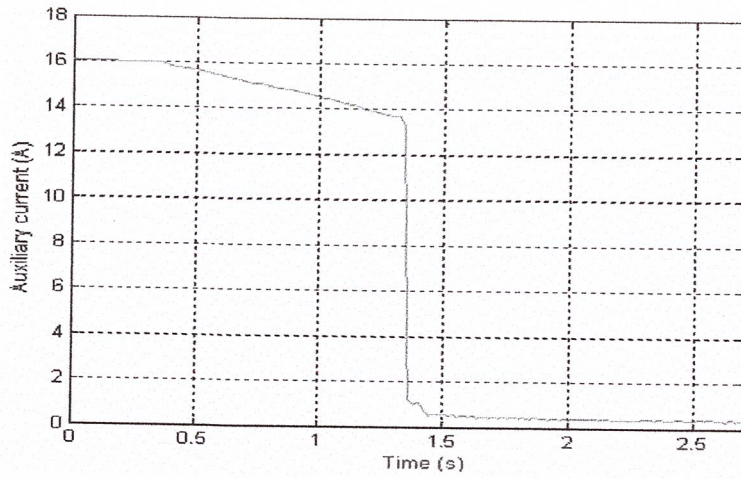
รูปที่ 4-58 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ *capacitor start* ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.07926 kg-m^2



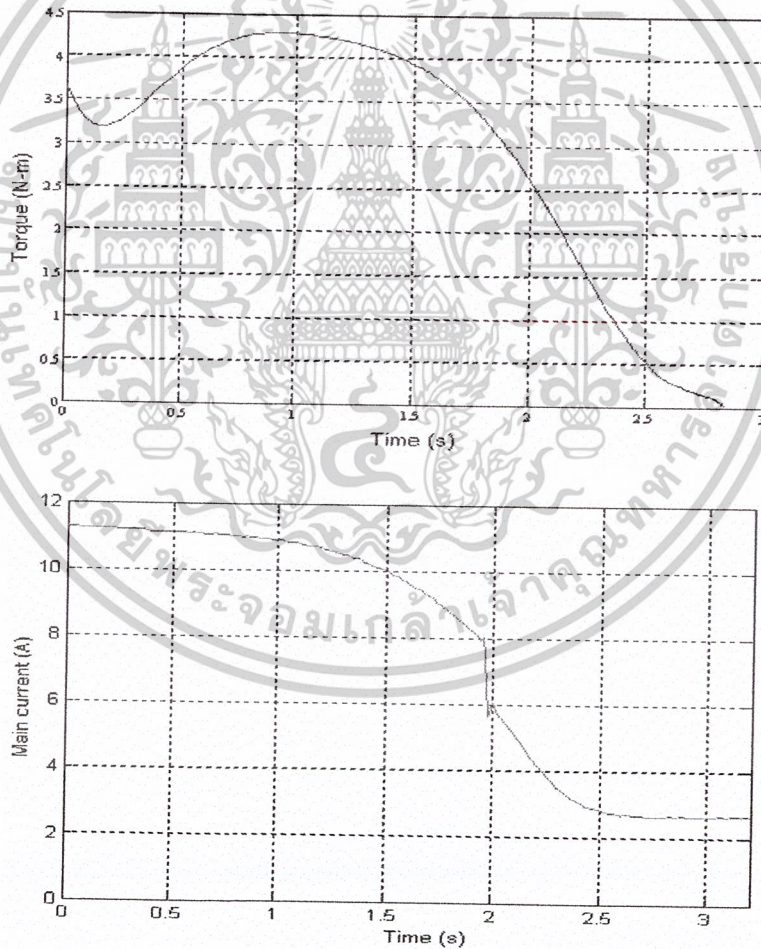


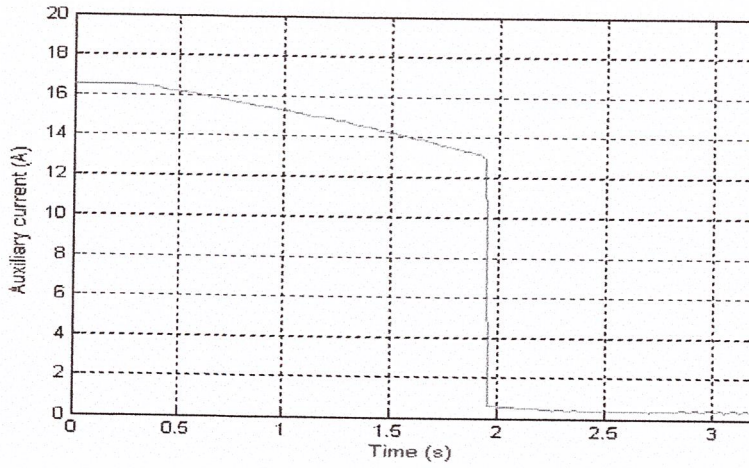
รูปที่ 4-59 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.09339 kg-m^2



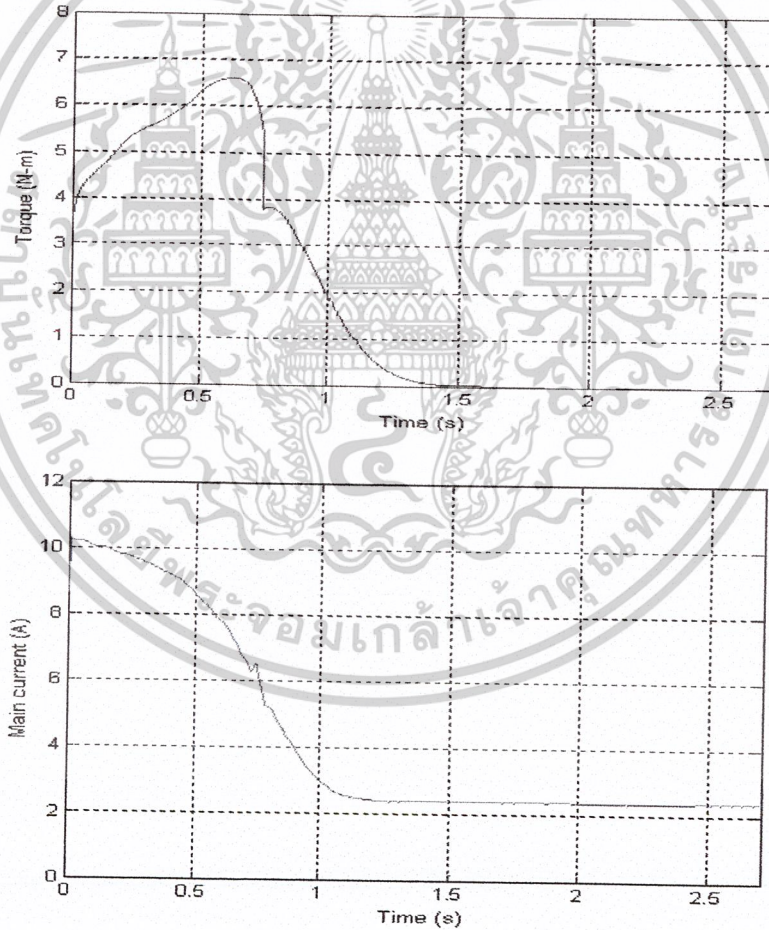


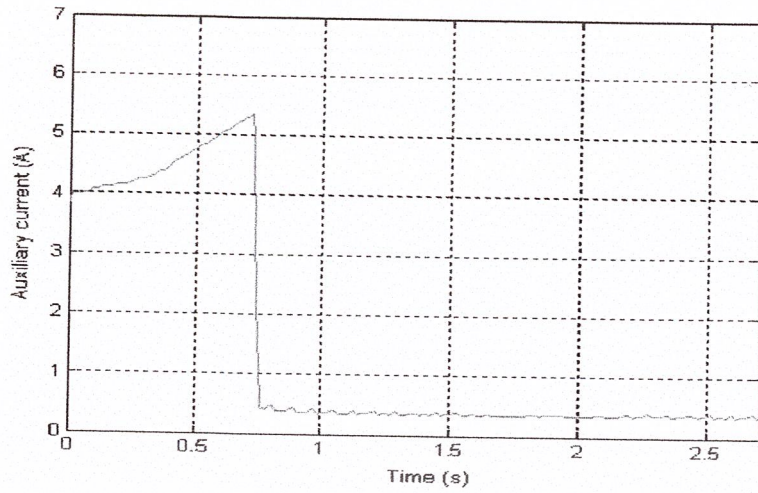
รูปที่ 4-60 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ *split phase* ขนาด 1/4 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2



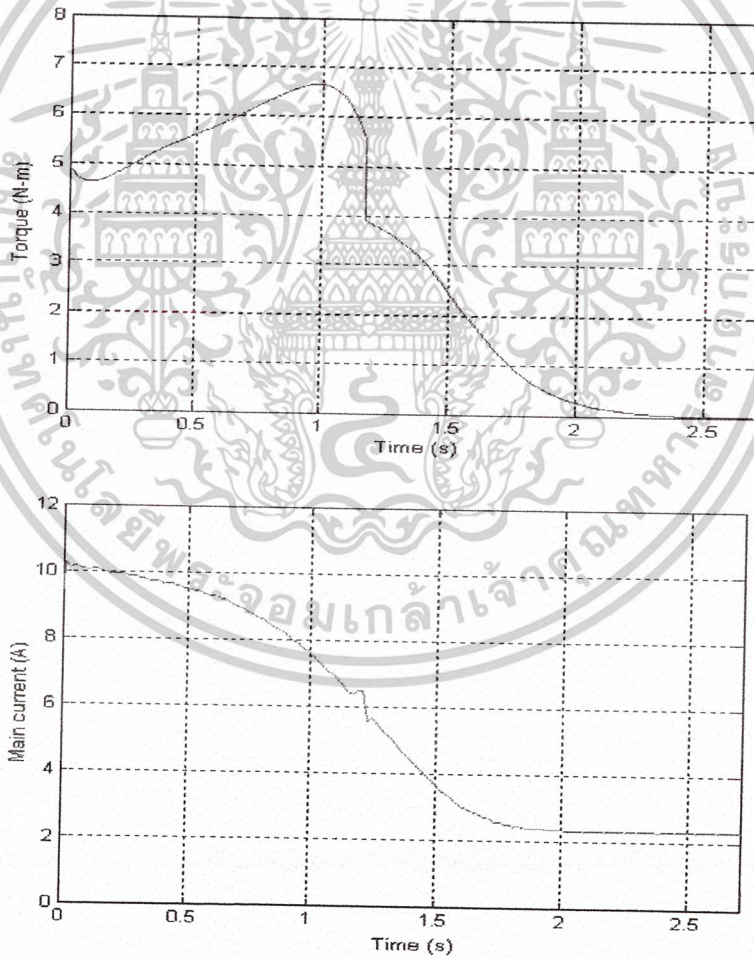


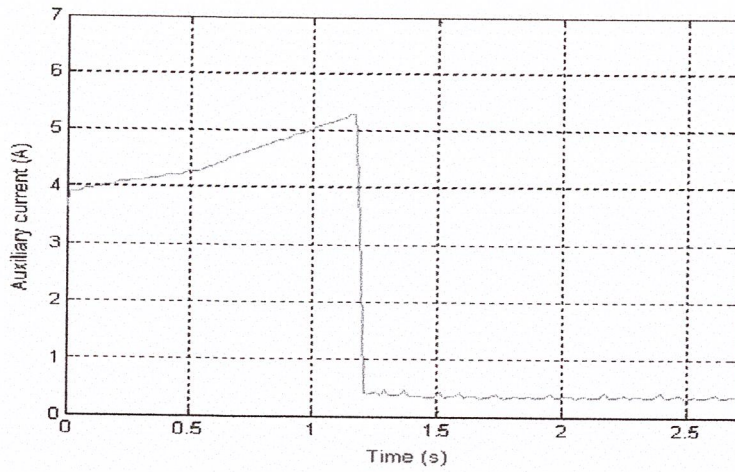
รูปที่ 4-61 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2





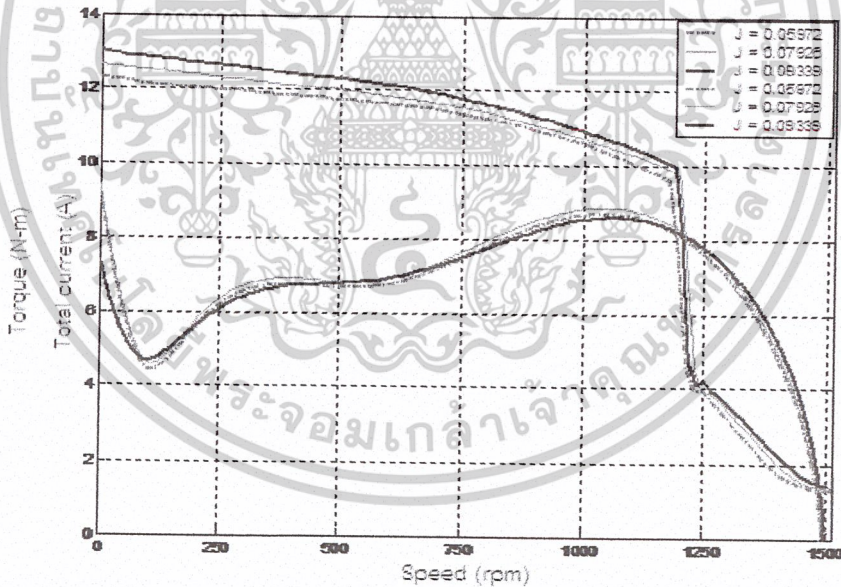
รูปที่ 4-62 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0325 kg-m^2



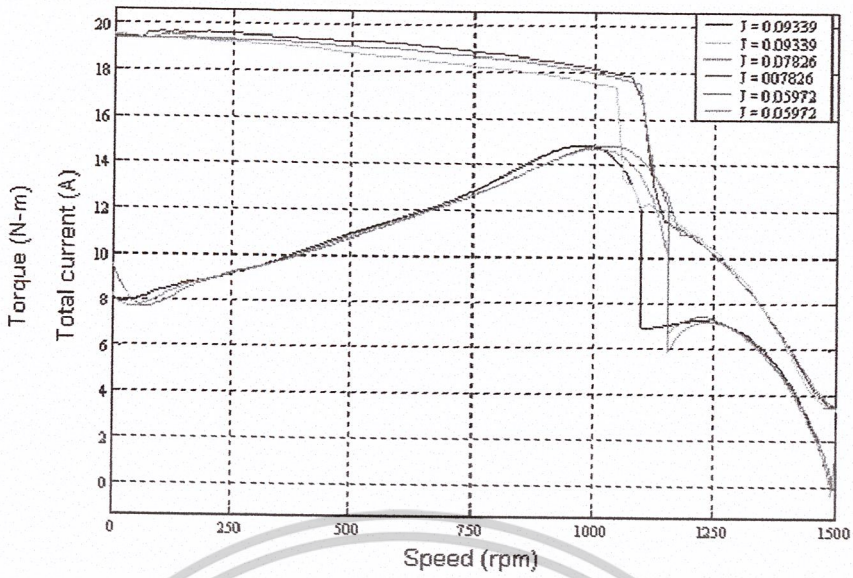


รูปที่ 4-63 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ *capacitor start* ขนาด 1/4 แรงม้าในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วเมื่อทดสอบกับล้อช่วยแรงขนาด 0.0523 kg-m^2

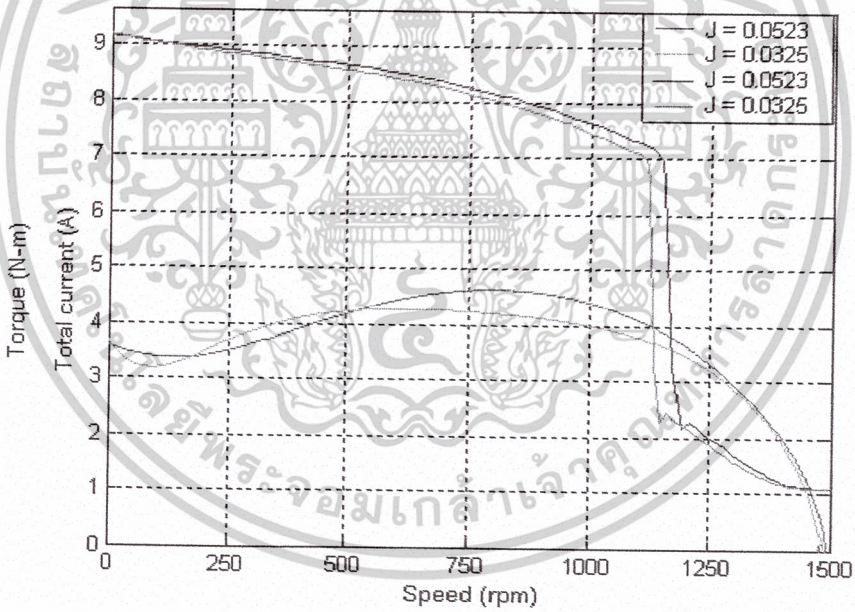
4.4.2.6 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ และ กราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบหลัก และ ขดลวดช่วย-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส



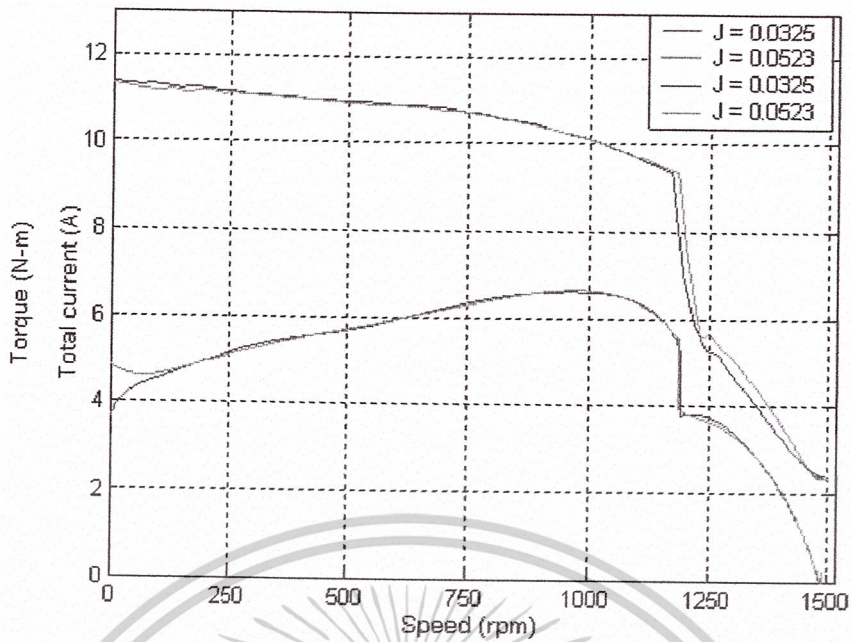
รูปที่ 4-64 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ *split phase* ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ



รูปที่ 4-65 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ *capacitor start* ขนาด 1/2 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ



รูปที่ 4-66 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ *split phase* ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ



รูปที่ 4-67 กราฟคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณสมบัติกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์ *capacitor start* ขนาด 1/4 แรงม้า เมื่อทำการทดสอบกับโมเมนต์ความเฉื่อยค่าต่างๆ

4.4.3 การทดสอบภาระของมอเตอร์ (Load Test)

ในการทดสอบภาระนั้นได้ทำการทดสอบตามรูปที่ 4.8 และนำข้อมูลที่บันทึกได้แก่ ค่ากำลังอินพุต, กำลังเอาต์พุต, ค่าแรงบิด เพื่อมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ ซึ่งได้แสดงผลจากการบันทึกดังในตารางที่ 4-7 ถึงตารางที่ 4-10

Performance 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	721.60	55.09
1465	2.3	352.84	4.47	564.29	62.53
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

ตารางที่ 4-7 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/2 แรงม้า

Performance 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	685.10	68.00
1440	2.9	437.32	4.55	644.90	67.81
1445	2.8	423.70	4.46	623.10	68.00
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	462.10	66.17
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	333.20	69.53
1480	1.0	154.98	3.69	297.10	52.13

ตารางที่ 4-8 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า

Performance 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	380	47.79
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

ตารางที่ 4-9 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ split phase ขนาด 1/4 แรงม้า

Performance 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	370	52.61
1435	1.3	195.35	2.50	360	54.26
1440	1.2	180.96	2.46	340	53.22
1445	1.1	166.45	2.43	320	52.02
1450	1.0	151.84	2.38	300	50.61
1455	0.9	137.13	2.35	290	47.29
1460	0.8	122.31	2.30	270	45.30

ตารางที่ 4-10 แสดงข้อมูลการบันทึกการทดสอบภาระ (load test) ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/4

แรงม้า

4.4.4 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์

หัวข้อนี้จะแสดงผลของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณตามสมการที่ 2.20 ถึงสมการที่ 2.26 นอกจากนี้ก็ยังแสดงค่าสมรรถภาพของมอเตอร์ที่ทำการทดสอบทุกขนาดที่พิกัด และทำการเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความเร็ว และการทดสอบภาระของมอเตอร์ ดังตารางที่ 4-11 ถึงตารางที่ 4-20

Parameter	Split ¼ Hp	Split ½ Hp	Cap ¼ Hp	Cap ½ Hp
R ₁	7.68	3.46	8.20	3.63
X ₁ =X ₂	8.72	5.47	9.69	6.60
R ₂	11.88	4.92	11.29	5.72
X _m	138.24	92.61	173.70	113.35

ตารางที่ 4-11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 ½ สทุกขนาดที่ทำการทดสอบ

Parameter	Split ¼ Hp	Split ½ Hp	Cap ¼ Hp	Cap ½ Hp
Speed (rpm)	1450	1440	1450	1425
Slip	0.033	0.04	0.033	0.05
I (A)	2.82	4.86	2.39	4.56
P _i (W)	267.67	612.82	256.97	663.79
P _o (W)	109.83	414.88	113.26	462.36
T (N-m)	0.72	2.75	0.75	3.10
η(%)	41.03	67.70	44.08	69.65

ตารางที่ 4-12 แสดงค่าสมรรถภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 ½ สทุกขนาดที่ทำการทดสอบ

Test Performance	Load Test	Parameter Test
I	5.09	4.96
Pi	911.13	639.09
Po	482.56	438.78
T	3.20	2.91
$\eta(\%)$	52.96	68.66

ตารางที่ 4-13 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ *load test* และ *parameter test* ของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/2 แรงม้า

Test Performance	Load Test	Parameter Test
I	4.98	4.56
Pi	746.39	663.79
Po	522.27	462.36
T	3.50	3.10
$\eta(\%)$	68.33	69.65

ตารางที่ 4-14 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ *load test* และ *parameter test* ของมอเตอร์ capacitor start ขนาด 1/2 แรงม้า

Test Performance	Load Test	Parameter Test
I	2.79	2.82
Pi	340	267.67
Po	151.84	109.83
T	1.00	0.72
$\eta(\%)$	44.66	41.03

ตารางที่ 4-15 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ *load test* และ *parameter test* ของมอเตอร์ Split phase ขนาด 1/4 แรงม้า

Test	Load Test	Parameter Test
Performance		
I	2.38	2.39
Pi	300	256.97
Po	151.84	113.26
T	1.00	0.75
η (%)	50.61	44.08

ตารางที่ 4-16 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ *load test* และ *parameter test* ของมอเตอร์ *capacitor start* ขนาด 1/4 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

ตารางที่ 4-17 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ *load test* และ *acceleration test* ของมอเตอร์ *Split phase* 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 4-18 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ *load test* และ *acceleration test* ของมอเตอร์ *capacitor start* ขนาด 1/2 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

ตารางที่ 4-19 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ *load test* และ *acceleration test* ของมอเตอร์ *Split phase* 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

ตารางที่ 4-20 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ *load test* และ *acceleration test* ของมอเตอร์ *capacitor start* ขนาด 1/4 แรงม้า

จากผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) เพื่อทำการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบดังแสดงในรูปที่ 4-64 ถึงรูปที่ 4-67 โดยในการทดสอบได้ทำการเปลี่ยนขนาดของล้อช่วยแรงให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งผลปรากฏว่า กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบและกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบ ที่ได้จากการทดลองนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แม้ว่าค่าข้อมูลที่ได้จากล้อช่วยแรงบางตัวจะผิดพลาดไปบ้าง อันเนื่องมาจากการคลั่งปลิ้นมอเตอร์, สัญญาณจาก DC Techogenerator และกระบวนการทำ curve fitting กราฟ แต่ก็แสดงให้เห็นว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยไม่ทำให้กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ และคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงเท่าใดนัก และเมื่อนำข้อมูลจากคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองมาทำการพล็อตและคำนวณ เปรียบเทียบกับค่าคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ จะ ได้ผลของการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 4-13 ถึงตารางที่ 4-16 จากผลการเปรียบเทียบพบว่าที่ความเร็วย่านพิกัด ค่าแรงบิดที่ได้มีค่าแตกต่างกันพอสมควร เนื่องจากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้นยังไม่มีมาตรฐานมารองรับการทดสอบพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ ปัญหา

นิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ เพื่อดูค่าแนวโน้มเปรียบเทียบกับแรงบิดที่ได้จากวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) เท่านั้น ส่วนวิธีที่สามารถขึ้นชั้นความน่าเชื่อถือของกราฟได้ก็คือ วิธีการทดสอบภาระ เท่านั้น ซึ่งได้เปรียบเทียบค่าในตารางที่ 4-17 ถึงตารางที่ 4-20 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก



บทที่ 5

บทสรุป

การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับทดสอบเพื่อทำการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งอ้างอิงตาม IEEE standard 112-2001 ในการทดสอบได้ทำการเพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วให้แก่มอเตอร์โดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ ซึ่งวิธีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์นั้นกระทำโดยการนำลวดช่วยแรงเข้ามาคล้องปลี (coupling) กับเพลลาของมอเตอร์ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งผลการทดลองได้แสดงไว้ในบทที่ 5

ในการทดลอง ได้ทำการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก (squirrel cage) ขนาด 1/2 และ 1/4 แรงม้า ในส่วนการทดสอบได้แบ่งการทดสอบมอเตอร์ออกเป็น 4 วิธีได้แก่ 1. การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) 2. การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration test) 3. การทดสอบภาระ (load test) และ 4. การทดสอบพารามิเตอร์ (parameter test) จากผลการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test) นั้นผลที่ได้จากการทดสอบคือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของระบบที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4-5 และ 4-6 ส่วนผลการทดสอบที่นำเสนอในรูปแบบกราฟซึ่งแสดงในรูปที่ 4-10 ถึงรูปที่ 4-17 เป็นการนำเสนอข้อมูลของความเร็วรอบในขณะที่ความเร็วของมอเตอร์ลดลง โดยนำเสนอในรูปแบบข้อมูลดิบและข้อมูลที่ใช้วิธี curve fitting เพื่อปรับแต่ง curve แล้ว พร้อมด้วยค่า error ที่ได้จากการทำ curve fitting ซึ่งในการพิจารณาผลการทดลองในรูปแบบดังกล่าวเป็นการพิจารณาหาแนวโน้มที่เหมาะสมของ curve เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ในการทดสอบมอเตอร์ด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration test) ผลที่ได้ก็นำเสนอออกมาในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่

รูปคลื่นของกระแสในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วดังแสดงในรูปที่ 4-18 ถึงรูปที่ 4-21 โดยทำการทดสอบกับลวดช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาที่ค่ากระแสของมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัวจะพบว่าเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสูงขึ้น เวลาที่กระแสใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวก็ยาวนานขึ้น

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่า rms ของกระแสและเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4-22 ถึงรูปที่ 4-31 ซึ่งข้อมูลส่วนนี้เป็นการนำรูปคลื่นของกระแสมาคำนวณหาค่า rms แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการพล็อตเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็ว ข้อมูลส่วนนี้ต้องอาศัยกระบวนการทางสถิติมาทำการหาแนวโน้มของค่า rms ของกระแสโดยใช้วิธี least square regression มาใช้ในการหาสมการของแนวโน้มของข้อมูลดังกล่าว

ข้อมูลรูปคลื่นแรงดัน, กระแสคลวดหลัก, กระแสคลวดช่วย และ กระแสรวมของมอเตอร์นั้นได้ถูกนำเสนอในรูปที่ 4-32 ถึงรูปที่ 4-39 ซึ่งจากข้อมูลรูปคลื่นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ ซึ่งเฟสเซอร์ไดอะแกรมนั้น มีประโยชน์ที่จะนำไปคำนวณปรับปรุงค่าแรงบิดของมอเตอร์ในอนาคตต่อไปได้ เพราะแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้นขึ้นอยู่กับมุมระหว่างกระแสคลวดช่วยและกระแสคลวดหลัก อีกทั้งข้อมูลที่ได้ยังเป็นการยืนยันค่าทางทฤษฎีได้อย่างถูกต้อง

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมกับเวลา และกระแสคลวดช่วยในกราฟเดียวกันนั้นจะสามารถบ่งบอกถึงจุดที่สวิตช์แรงเหวี่ยงของมอเตอร์ทำงานตัดขดลวดช่วยออกที่ความเร็วต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดล้อช่วยแรงที่ใช้ทดสอบ นอกจากนี้ข้อมูลดังกล่าวจะสะดวกและแม่นยำในการทำ curve fitting ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งจำเป็นต้องรู้จุดที่ slope ของความเร็วเชิงมุมเปลี่ยนแปลง เนื่องมาจากการตัดขดลวดช่วยของสวิตช์แรงเหวี่ยง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ ข้อมูลส่วนนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังในผลการทดลองรูปที่ 4-40 ถึงรูปที่ 4-49 เป็นข้อมูลที่ได้จากการทำ curve fitting แล้ว ซึ่งจากข้อมูลนี้สามารถนำไปคำนวณหาแรงบิดได้อย่างถูกต้องแม่นยำต่อไป ส่วนผลการทดลองดังรูปที่ 4-50 ถึงรูปที่ 4-53 เป็นการนำเสนอผลของการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งผลที่ได้พบว่าเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นตาม ซึ่งเป็นการสนับสนุนสมการที่ 3.3

ข้อมูลแรงบิดและกระแสของมอเตอร์เปรียบเทียบกับเวลา ข้อมูลส่วนนี้เป็นการนำเสนอข้อมูลของแรงบิดมาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูล rms ของกระแส ณ เวลาเดียวกัน ซึ่งข้อมูลในลักษณะนี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิด โดยเปรียบเทียบกับค่ากระแสของมอเตอร์ ณ เวลาต่าง ๆ กัน

กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ และกราฟคุณลักษณะกระแส-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ข้อมูลชุดนี้ได้ทำการพล็อตลงบนแกนเดียวกัน โดยทำการทดสอบกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่าง ๆ กันเพื่อเปรียบเทียบผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่อกราฟคุณลักษณะทั้งสอง ซึ่งผลที่ได้พบว่ากราฟคุณลักษณะทั้งสองประเภทเมื่อทำการทดสอบกับล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกัน จะให้ผลการทดสอบที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากกราฟ เทียบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-13 ถึงตารางที่ 4-16 จะพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนพอสมควร อันเนื่องมาจากในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสไม่มีมาตรฐานการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ แต่ก็เพียงพอสำหรับการดูแนวโน้มข้อมูล

ในส่วนของคุณลักษณะแรงบิดของมอเตอร์ในย่านความเร็วที่กักตั้งแสดงในรูปที่ 4-64 ถึงรูปที่ 4-67 ซึ่งได้จากการทดสอบภาระของมอเตอร์นั้น เมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วดังแสดงในตารางที่ 4-17 ถึงตารางที่ 4-20 พบว่ามีความใกล้เคียงกันมากและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วในย่านความเร็วที่กัก

ในส่วนของการที่จะเลือกค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดใหญ่เท่าไรนั้น ควรพิจารณาจากปัจจัยหลายอย่างได้แก่ เวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งถ้าหากว่ามอเตอร์ใช้เวลาในการเร่งความเร็วนานมากจะทำให้กระแสที่มอเตอร์มีค่าสูงอยู่นาน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นภายในมอเตอร์ ส่งผลให้ขดลวดและโร

เตอร์เกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อนได้ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นอีกคือ ขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบ, ขนาดของเพลที่ใช้น้ำหนักของล้อช่วยแรง และราคาของล้อช่วยแรงที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่งต้องนำมาใช้ประกอบการตัดสินใจด้วย

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้นำเสนอมาในปริญญานิพนธ์นี้พบว่า การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว โดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยนั้นเป็นวิธีที่สะดวกมากและใช้เวลาในการทำการทดสอบที่สั้น มีค่าใช้จ่ายต่ำ ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอไม่น่าจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่สูงมากในการทำการทดสอบ ซึ่งเหมาะสำหรับการทดสอบสำหรับวิศวกร โรงงานหรือผู้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสทั่ว ๆ ไป



บรรณานุกรม

- [1] IEEE Standard 114-2001, IEEE Standard Test Procedure for Single-Phase Induction Motors.
- [2] IEC Standard 34-2 1982 Part 2 : Method for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicle).
- [3] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, Stephen D .Umans : “*Electrical Machinery*”, 5th Edition . London : McGraw Hill . 1992 .
- [4] E. F. Bustmante, “*Evaluating the Parameters of the Equivalent Circuit of Single-Phase Induction Motors,*” *Electric Machines and Power Systems*, vol. 13 pp. 173-184,1987.
- [5] G. A. Capalino and B. M. Hand, “*Steady-State Investigations for Capacitor-Run Induction Motor with Variable Frequency Voltage Supply,*” in Intl. Con. On Elec. Mach., Athens, 1980.
- [6] Peter Vas. *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machine The United States of America* : Oxford University Press.1993.
- [7] พิชิต คำยอง : “*เครื่องกลไฟฟ้า I*”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 2540
- [8] พิชิต คำยอง : “*เครื่องกลไฟฟ้า II*”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 2540
- [9] วรชาติ แซ่ก๊ก , พิชิต คำยอง : “*เทคนิคในการหาคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย*”, *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2544. หน้า 122-127