

การหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
Torque-speed curve characteristic evaluation to induction motor



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...45968
วัน, เดือน, ปี 2 6 ก.พ. 2546

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2544

การหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

Torque-speed curve characteristic evaluation to induction motor



โดย

นาย ปฐมพล พิชรบำรุง

นาย ปฐวิ กระจ่างโลก

นาย ปิยะฉัตร แพ่งสร้อย

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.พิชิต ถ้ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง

การหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ

1.นาย ปฐมพล พ็ชรบำรุง

2.นาย ปฐวี กระจำโลก

3.นาย ปิยะนัทร แพงสร้อย



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.พิชิต ถ้ายอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

นายปฐมพล พัชรบำรุง
 นายปฐวี กระจ่างโลก
 นายปิยะฉัตร เพงสร้อย
 ผศ.พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า โดยอาศัยวิธีการเร่งความเร็ว ซึ่งได้ระบุไว้ใน IEEE standard 112-1996 [1] โดยแรงบิดของมอเตอร์สามารถคำนวณหาได้จากข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะเร่งความเร็วรอบจากหยุดนิ่งจนถึงความเร็วซิงโครนัสในสภาวะไร้ภาระ นอกจากนี้ทำการสอบมอเตอร์ด้วยวิธีห้วงความเร็วเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการคำนวณคือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ โดยผลคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณจากวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ

Torque-speed curve characteristic evaluation to induction motor

Patompon Patcharabumrung

Patavee Krajangloke

Piyachat Pangsoi

Asst.Prof. Pichit Lumyong Advisor

2001

ABSTRACT

This thesis presents a method to evaluate torque-speed curve characteristic of 1 hp 3 phase induction motor by using acceleration method. This method is specified in IEEE standard 112-1993 [1]. Torque-speed curve characteristic can be calculated from motor speed in acceleration test, from a standstill to synchronous speed in no-load condition. And use retardation test to find a friction coefficient and a rotor inertia moment, that is the necessary parameters in calculation . At last the result from test will be compared with Torque-speed curve which calculate from equivalent circuit for confirm a reliability.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
Abstract	II
สารบัญตาราง.....	III
สารบัญภาพ.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.3 การพิจารณาเลือกใช้วิธีเร่งความเร็วในการทดสอบ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	3
2.2.1 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	3
2.2.2 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	5
2.2.3 การวิเคราะห์วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	10
2.3 การวิเคราะห์แรงบิดและกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	11
2.3.1 การวิเคราะห์แรงบิดและกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ทฤษฎีเทวินิน.....	11
2.3.2 แรงบิดเริ่มต้นของมอเตอร์.....	15
2.3.3 แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	15
บทที่ 3 การหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	16
3.1 บทนำ.....	16
3.2 ทฤษฎีเบื้องต้นและหลักการในการหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์.....	16
3.2.1 วิธีเร่งความเร็วรอบ (acceleration method).....	16
3.2.2 สมการความสัมพันธ์ของมอเตอร์ในสถานะไดนามิก.....	17
3.2.3 เทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรง.....	18
3.2.5 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความ เสียดทานหนึ่งด.....	19
3.3 กระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณหาคูณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	20
3.3.1 polynomial regression.....	20
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	21
4.1 บทนำ.....	21
4.2 วิธีการทดลอง.....	21
4.2.1 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (acceleration test).....	22
4.2.2 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (retardation test).....	22
4.2.3 ค่าอิมพีแดนซ์วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	22
4.3 ผลการทดสอบ.....	22
4.3.1 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว.....	23
4.3.2 ผลการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว.....	26
4.3.3 ผลการคำนวณหาคูณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบ.....	28
บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์.....	30
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย, เส้นผ่านศูนย์กลางและมวลของล้อช่วยแรง ที่ใช้ในการทดสอบ.....	22
ตารางที่ 4.2 ค่าอิมพีแดนซ์วงจรมวลย์ของมอเตอร์ 1 แรงม้าที่ใช้ทดสอบ.....	22



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลย์ของสเตเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	5
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของ โรเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	9
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	9
รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	11
รูปที่ 2.5 (ก)วงจรเครือข่ายเชิงเส้นทั่วไป (ข)วงจรสมมูลย์เมื่อใช้ทฤษฎีเทวินิน.....	12
รูปที่ 2.6 จุดเชื่อมต่อต่อ a และ b ในวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	12
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อใช้ทฤษฎีเทวินิน.....	13
รูปที่ 2.8 กราฟแรงบิด-สลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	14
รูปที่ 3.1 แทนที่ใช้ในการทดสอบ.....	17
รูปที่ 3.2 รูปทรงล้อช่วยแรงที่ช่วยเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้กับโรเตอร์.....	19
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบ.....	21
รูปที่ 4.2 กราฟความเร็วรอบ-เวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าขณะเร่งความเร็วเมื่อทำการทดสอบกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่างๆ.....	23
รูปที่ 4.3 กราฟ เวลา-ความเร็วรอบ ขณะเร่งความเร็วเมื่อทำการเร่งความเร็วมอเตอร์โดยไม่ดับปลั๊กล้อช่วยแรง.....	24
รูปที่ 4.4 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะเร่งความเร็วเมื่อดับปลั๊กล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 0.0994 kg-m^2	24
รูปที่ 4.5 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะเร่งความเร็วเมื่อทำการดับปลั๊กล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 0.5054 kg-m^2	25
รูปที่ 4.6 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะเร่งความเร็วเมื่อทำการดับปลั๊กล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 1.0093 kg-m^2	25
รูปที่ 4.7 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะหน่วงความเร็วเมื่อไม่ดับปลั๊กล้อช่วยแรง.....	26
รูปที่ 4.8 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะหน่วงความเร็วเมื่อทำการดับปลั๊กล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 0.0994 kg-m^2	26
รูปที่ 4.9 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะหน่วงความเร็วเมื่อทำการดับปลั๊กล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 0.5054 kg-m^2	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะเร่งความเร็วเมื่อทำการคัปปลิ่งล้อยช่วยแรงโมเมนต์ ความเฉื่อยขนาด 1.0093 kg-m^2	27
รูปที่ 4.11 กราฟ แรงบิด-ความเร็วรอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อทำการคัปปลิ่งกับล้อยช่วยแรงโมเมนต์ ความเฉื่อยขนาด 0.0994 kg-m^2	28
รูปที่ 4.12 กราฟ แรงบิด-ความเร็วรอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อทำการคัปปลิ่งกับล้อยช่วยแรงโมเมนต์ ความเฉื่อยขนาด 0.5054 kg-m^2	28
รูปที่ 4.13 กราฟ แรงบิด-ความเร็วรอบมอเตอร์ 1 แรงม้าเมื่อทำการคัปปลิ่งกับล้อยช่วยแรงโมเมนต์ ความเฉื่อยขนาด 1.0093 kg-m	29
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติแรง-ความเร็วของมอเตอร์ 1 แรงม้าจากการทดสอบกับจาก การคำนวณวงจรมูลย.....	29



บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในปัจจุบันในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมได้มีการนำเอามอเตอร์เหนี่ยวนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายและกว้างขวางอันเนื่องมาจากมอเตอร์เหนี่ยวนำมีข้อได้เปรียบกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นที่วางขายในท้องตลาด เพราะเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่นแล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่โครงสร้างที่ง่ายต่อการบำรุงรักษา มีความแข็งแรงทนทานและมีความน่าเชื่อถือสูงกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นๆ และยังมีขนาดพิกัดตั้งแต่ขนาดต่ำกว่าหนึ่งแรงม้าจนไปถึงมีขนาดหลายร้อยแรงม้า สามารถต่อเข้าแหล่งจ่ายไฟแล้วใช้ได้ทันทีแม้จะไม่มีอุปกรณ์ในการขับ จึงทำให้สามารถนำไปใช้ในงานได้หลากหลายทุกกระบวนการผลิต แต่ในการนำเอามอเตอร์เหนี่ยวนำไปใช้นั้นจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของมอเตอร์ที่จะนำไปใช้เสียก่อน เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม คุณสมบัติที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการตัดสินใจในการเลือกชนิดและขนาดของมอเตอร์คือคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบ เนื่องจากว่าเป็นคุณสมบัติที่ใช้ในการตัดสินใจว่ามอเตอร์ที่เลือกเหมาะสมกับภาระที่ต้องการจะขับหรือไม่ เพราะภาระในกระบวนการอุตสาหกรรมมีหลากหลาย เช่น พัดลม งานเจาะ งานบด งานโม่ เป็นต้น ซึ่งภาระแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบแตกต่างกันไป และยังมีความต้องการขนาดแรงบิดที่มากขึ้นน้อยแตกต่างกันด้วย ดังนั้นการทราบคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในทางอุตสาหกรรม

โครงการนี้จะนำเสนอการหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าโดยใช้วิธีเร่งความเร็ว (acceleration method) โดยใช้เทคนิคเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยซึ่งเป็นเทคนิคที่มีข้อดีกว่าเทคนิคในการหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ชนิดอื่นๆ คือความง่ายของโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ความคลาดเคลื่อนมีน้อยและสามารถหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบได้ตลอดทั้งช่วงความเร็วรอบของมอเตอร์จากศูนย์ถึงที่ความเร็วเชิงโรตัส ในการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยนอกจากจะช่วยเพิ่มระยะเวลาในการเร่งความเร็วแล้วยังช่วยให้ลดผลกระทบอันเกิดมาจากสถานะทรานเซียนทางไฟฟ้าซึ่งจะทำให้แรงบิดของมอเตอร์คลาดเคลื่อน ซึ่งผลการทดสอบสามารถให้คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบได้อย่างเหมาะสม

1.2 ขอบเขตของโครงการงาน

- ศึกษาหาวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่จะนำมาทดสอบ
 - ทำการทดสอบมอเตอร์ด้วยวิธีเร่งความเร็วเพื่อหาแรงบิดของมอเตอร์
 - ทำการทดสอบมอเตอร์ด้วยวิธีห้วงความเร็วเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด
- และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์มอเตอร์
- เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ

1.3 การพิจารณาเลือกใช้วิธีเร่งความเร็วในกาทดสอบ

ข้อดีของการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยวิธีเร่งความเร็ว คือ ความง่ายในการโครงสร้างของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากมีอุปกรณ์น้อยชนิดไม่ สลับซับซ้อน โดยประกอบไปด้วยล้อช่วยแรงที่ทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อย, ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการคลี่ปลีงเพลลาของมอเตอร์กับล้อช่วยแรง, อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร็ว, และอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกผล และเป็นการทดสอบที่นิยมใช้ในการทดสอบมอเตอร์จริง เนื่องจากสามารถหากราฟคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตลอดช่วงความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ศูนย์จนถึง ความเร็วซิงโครนัส และกราฟที่ได้มีความต่อเนื่องกัน อีกทั้งการบันทึกข้อมูลก็ทำได้ทันทีอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่อาศัยแรงดันไฟฟ้าหลายเฟสในการสร้างสนามแม่เหล็กหมุน มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลโดยอาศัยการส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กระหว่างช่องอากาศระหว่างส่วนที่อยู่กับที่ (สเตเตอร์) กับส่วนที่หมุน (โรเตอร์) ซึ่งมีหลักการส่งผ่านพลังงานเหมือนหม้อแปลงไฟฟ้า

2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันแพร่หลายในทางอุตสาหกรรมโดยมอเตอร์จะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ ส่วนที่อยู่กับที่ (stator) และส่วนที่หมุน (rotor) มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก (squirrel cage rotor) โดยแกนของมอเตอร์ชนิดนี้จะทำด้วยแผ่นเหล็กลามิเนตหยาบผิวด้านนอกให้เป็นร่องโดยรอบเรียกว่าสลอต (slot) ตรงกลางจะเจาะรูสำหรับสอดเพลลา เมื่อนำแผ่นเหล็กนี้มาอัดเข้าด้วยกันจะได้เป็นแกนโรเตอร์ และมีกริปยื่นออกไปสองข้างเพื่อใช้เป็นใบพัดระบายความร้อน

2. มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างจากกรงกระรอกคือมีขดลวดทองแดงพันรอบโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสลีปริง (slip ring) ซึ่งมีแปรงถ่านอยู่มีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์

2.2.1 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำจะประกอบด้วยส่วนสเตเตอร์และส่วนโรเตอร์ โดยส่วนโรเตอร์จะทำหน้าที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟโดยผ่านส่วนสเตเตอร์ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กอยู่ใน Air gap ซึ่งอยู่ระหว่างส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์ สนามแม่เหล็กนี้จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ตามสมการ

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

โดยที่ N_s = ความเร็วเชิงโคโรนัสของสนามแม่เหล็ก(Rpm)
 f = ความถี่แหล่งจ่ายไฟที่ให้กับขดลวดสเตเตอร์(Hz)
 P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์

โดยขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ซึ่งมีความถี่เดียวกันกับแหล่งจ่ายไฟ แต่ในขณะที่โรเตอร์มีความเร็วเท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัสของสนามแม่เหล็กจะไม่มีการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้นจะไม่มีแรงบิด (torque) เกิดขึ้นและในขณะที่โรเตอร์มีความเร็ว N_r ใดๆ ที่มีความแตกต่างจากความเร็ว N_s จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์และทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์และทำให้เกิดแรงบิด ซึ่งค่าที่ใช้ในการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหมุนและความเร็วรอบของโรเตอร์เรียกว่า ค่าสลลิป (Slip) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

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

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.3)$$

โดย ω_s = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์(rad/s)
 ω_r = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์(rad/s)
 s = สลลิป

เมื่อจ่ายแรงดันให้ขดลวดความจอร์ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ ฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กจะหมุนกวาดผ่านขดลวดของโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วยความเร็วสูงสุด (ความเร็วเชิงโคโรนัส) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำนั้นจะมีค่าสูงสุด และขึ้นอยู่กับการวนรอบของขดลวดในโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้นความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองส่วนนี้จึงมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งขึ้นอยู่กับการวนรอบของขดลวดทองแดงทั้งสอง

ขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่ ($N_r=0$) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์จะเท่ากับ ความถี่ของสาย กรณีสลลิปเท่ากับ 1 และเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยอัตราที่ฟลักซ์แม่เหล็กกวาดผ่านตัวนำจะช้าลง ค่าสลลิปจึงลดลงด้วย ในสภาพเช่นนี้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์จะลดลงเป็นสัดส่วนกับสลลิป เขียนสมการได้ดังนี้

$$E_r = sE_2 \quad (2.4)$$

$$X_r = sE_2 \quad (2.5)$$

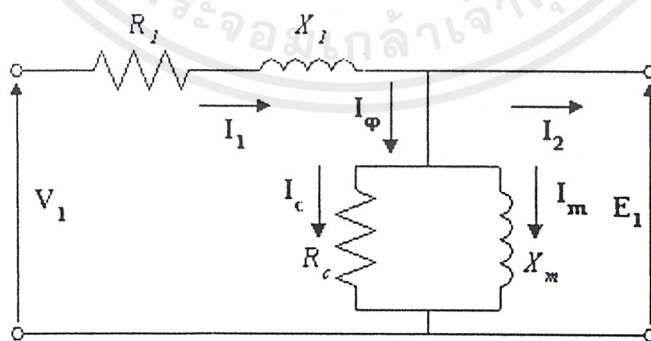
ในทำนองเดียวกัน ความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามคาสลิปดังนี้

$$f_r = sf \quad (2.6)$$

เมื่อ	E_r	= แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะทำงานปกติ(V)
	E_2	= แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะอยู่กับที่(V)
	X_r	= ค่ารีแอกแตนซ์ต่อเฟส ขณะโรเตอร์อยู่กับที่(Ω)
	f_r	= ค่าความถี่ของโรเตอร์(Hz)
	f	= ค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์(Hz)

2.2.2 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้ว่าเปรียบเสมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำอาศัยการส่งผ่านพลังงาน โดยผ่านทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากส่วนที่อยู่กับที่ (stator) ผ่านไปยังส่วนที่หมุน (rotor) ซึ่งพลังงานนี้จะกลายเป็นพลังงานกลที่โรเตอร์ ดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงเปรียบเสมือนว่าเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการ short circuit ทางด้านทุติยภูมิ เมื่อพิจารณาที่สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูป



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลย์ของสเตเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากวงจรจะได้สมการว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_1 = E_1 + I_1(R_1 + jX_1) \quad (2.7)$$

โดยที่ V_1 = แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ(V)
 I_1 = กระแสที่ไหลในขดสเตเตอร์(A)
 E_1 = ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขดสเตเตอร์สร้างขึ้น(V)
 R_1 = ค่าความต้านทานของขดสเตเตอร์(Ω)
 X_1 = ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์(Ω)

คลื่นฟลักซ์สนามแม่เหล็กระหว่างช่องอากาศหมุน (rotating air-gap flux) จะถูกสร้างขึ้นโดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (cmf) จากขดสเตเตอร์โดยที่ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่สเตเตอร์จะมีค่าน้อยกว่าแรงดันแหล่งจ่ายไฟเนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมที่ค่าอิมพีแดนซ์ที่ขดสเตเตอร์

ฟลักซ์ระหว่างช่องอากาศลัพธ์ (resultant air-gap flux) ที่เกิดในช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์เกิดจากการผสมกันระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสเตเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากโรเตอร์ เมื่อจ่ายแรงดันให้กับขดสเตเตอร์จะมีกระแสไหลในขดสเตเตอร์ (I_1) โดยที่กระแส I_1 จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนกระแสโหลด(load component) I_2 และส่วนของกระแสกระตุ้น (exciting component) I_0 โดยที่ส่วนของกระแสโหลดจะเป็นส่วนที่สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่สเตเตอร์แล้วทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ส่วนกระแสกระตุ้นเป็นส่วนที่จำเป็นจะต้องเพิ่มเข้าไปเพื่อสร้างฟลักซ์ระหว่างช่องอากาศลัพธ์ (resultant air-gap flux) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า E_1 กระแสกระตุ้นสามารถแบ่งออกเป็นส่วนประกอบย่อยคือ กระแสเนื่องมาจากการสูญเสียที่แกนเหล็ก (core loss component) I_c และกระแสเนื่องมาจากการสะสมของพลังงานแม่เหล็ก (magnetizing component) I_m ซึ่งจะตามุมล้ำหลังจากแรงเคลื่อน E_1 อยู่ 90°

ในวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นสามารถพิจารณาว่ากระแสกระตุ้นคือเป็นวงจรไฟฟ้ากึ่งหนึ่งที่สามารถต่อขนานกับแรงดันแหล่งจ่ายไฟดังรูป โดยที่จะประกอบโดยค่าความต้านทาน R_c และค่าความเหนี่ยวนำ X_m ต่อในลักษณะขนานกัน ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ทั้ง 2 จะคิดที่ค่าความถี่พิคคของแรงดันแหล่งจ่ายไฟ

เมื่อเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าหมุนที่สเตเตอร์แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าหมุนนี้จะไปเหนี่ยวนำโรเตอร์ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลในโรเตอร์ของมอเตอร์และจากการที่มีกระแสไฟฟ้าไหลในโรเตอร์จะทำให้โรเตอร์สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมาโดยที่จำนวนขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่โรเตอร์จะมีเป็น a เท่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สเตเตอร์ โดยที่ค่า a เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าจำนวนรอบประสิทธิภาพต่อเฟส (effective turn per phase) ของสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อโรเตอร์ซึ่งการส่งผ่านแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายกับมอเตอร์แปลงไฟฟ้าที่แรงดันทางด้านทุติยภูมิและปฐมภูมิจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดทั้งสอง เพียงแต่ว่าในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกนั้นเราไม่ทราบค่าจำนวนรอบของโรเตอร์เนื่องจากโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกมีลักษณะเป็นแท่งโลหะดั่งที่กล่าวข้างต้น ซึ่งจะทำให้ไม่ทราบค่าแรงดันเหนี่ยวนำจริงที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ได้เพราะไม่ทราบค่า a จึงจำเป็นต้องทำการสมมติค่าแรงดันไฟฟ้า E_{2s} ที่วงจรสมมูลย์ด้านโรเตอร์ซึ่งเป็นค่าที่ทำการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าของโรเตอร์มาอยู่ทางด้านสเตเตอร์ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน E_{rotor} ที่เหนี่ยวนำจริงในโรเตอร์และแรงดัน E_{2s} ที่เหนี่ยวนำในโรเตอร์สมมูลย์ได้ดังนี้

$$E_{2s} = aE_{rotor} \quad (2.8)$$

และจากหลักการกระแส-จำนวนรอบ (turn-ampere) เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลในโรเตอร์จริง I_{rotor} และกระแสที่ไหลในโรเตอร์ของวงจรสมมูลย์ได้ดังนี้

$$I_{2s} = \frac{I_{rotor}}{a} \quad (2.9)$$

สุดท้ายจะได้ความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์จริงของโรเตอร์ (Z_{rotor}) กับค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการแปลงที่ด้านโรเตอร์ของวงจรสมมูลย์ (Z_{2s}) เป็นดังนี้

$$Z_{2s} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{a^2 E_{rotor}}{I_{rotor}} = a^2 Z_{rotor} \quad (2.10)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ในวงจรสมมูลย์จะเป็นค่าที่ทำการแปลงจากค่าจริงจากทางด้านโรเตอร์มาทางด้านสเตเตอร์โดยอาศัยค่าอัตราส่วนจำนวนรอบประสิทธิภาพต่อเฟสระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ซึ่งสามารถใช้วิธีแปลงค่าแบบนี้ได้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งชนิดขดลวดพันรอบโรเตอร์และชนิดกรงกระรอก

เนื่องจากโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเปรียบเสมือนขดลวดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการลัดวงจร และค่าของแรงดัน E_{2s} จะมีค่าเป็นแปรผันตามค่าสลิป (s) ของมอเตอร์ดังนั้นจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ที่การแปลงจากค่าจริงมาทางด้านสเตเตอร์ได้ดังนี้

$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = Z_{2s} = R_2 + jSX_2 \quad (2.11)$$

โดยที่ Z_{2s} = ค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ที่ทำการแปลงมาทางด้านสเตเตอร์(Ω)
 R_{2s} = ค่าความต้านทานของโรเตอร์ที่ทำการแปลงมาทางด้านสเตเตอร์(Ω)
 sX_2 = ค่ารีแอคแตนซ์รั่วที่ค่าสลิปต่างๆ(Ω)

สาเหตุที่ทำให้ค่ารีแอคแตนซ์อยู่ในพจน์การคูณกับค่าสลิปก็เนื่องมาจากว่าค่ารีแอคแตนซ์ของโรเตอร์จะมีค่าน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุนที่ตัดผ่านแท่งตัวนำของโรเตอร์ ค่ารีแอคแตนซ์ของโรเตอร์จะมีค่าสูงสุดเมื่อค่า s มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งก็คือในขณะที่มอเตอร์เริ่มสตาร์ทและจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัสหรือค่า $s = 0$ นั้นเอง

นอกจากค่าสลิปจะมีผลต่อค่ารีแอคแตนซ์ของโรเตอร์แล้วยังมีผลต่อค่าแรงดันโรเตอร์สลิป-ความถี่ (slip-frequency rotor voltage) E_{2s} เนื่องจากปริมาณค่าแรงดันที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์จะมีความสัมพันธ์กับค่าสลิป ซึ่งก็คือความเร็วสัมพัทธ์ของสนามแม่เหล็กหมุนที่หมุนตัดผ่านแท่งตัวนำในโรเตอร์ยิ่งความเร็วมาก (s มาก) ค่าแรงดันที่โรเตอร์ก็ยิ่งมีค่ามาก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าของสเตเตอร์และแรงเคลื่อนไฟฟ้าของโรเตอร์ที่แปลงมาทางด้านทุติยภูมิดังนี้

$$E_{2s} = sE_1 \quad (2.12)$$

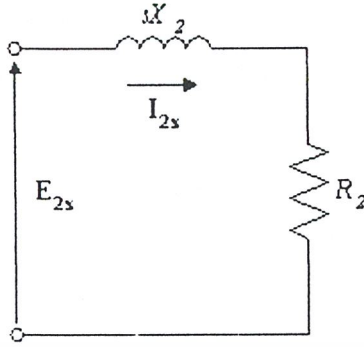
แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโรเตอร์จะกระทำต่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากสเตเตอร์ เนื่องจากส่วนประกอบทางภาระ I_2 (load component) จากหลักการที่ว่าค่าจำนวนรอบของสเตเตอร์และค่าจำนวนรอบของโรเตอร์ที่แปลงมาทางด้านสเตเตอร์มีค่าเท่ากันจะได้

$$I_{2s} = I_2 \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.12 และสมการ 2.13 จะได้ว่า

$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{sE_1}{I_2} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.11 จะได้วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์ดังนี้



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของ โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

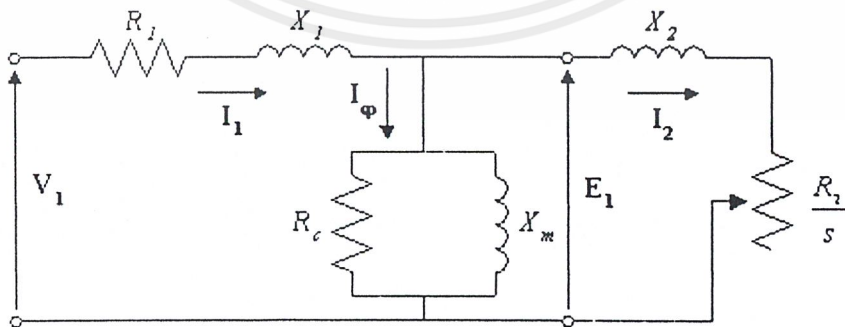
จากสมการ 2.11 และสมการ 2.14 จะได้ว่า

$$\frac{sE_1}{I_2} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = R_2 + jsX_2 \tag{2.15}$$

จากสมการ 2.15 เมื่อหารด้วย s ทั้งหมดจะได้

$$\frac{E_1}{I_2} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \tag{2.16}$$

จากสมการ 2.16 จะทำให้ได้สมการวงจรสมมูลย์ของโรเตอร์ที่ทำการแปลงมาทางด้านสเตเตอร์ซึ่งจะทำให้ได้วงจรสมมูลย์ที่สมบูรณ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังนี้



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะได้ว่าพลังงานทั้งหมดที่ส่งผ่านจากสเตเตอร์ผ่านช่องว่างของอากาศไปที่โรเตอร์เป็นดังสมการ

$$P_{g1} = q_1 I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.17)$$

โดยที่ P_{g1} = พลังงานทั้งหมดที่ส่งผ่านจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ (W)

q_1 = จำนวนเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การสูญเสียที่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นเกิดจากค่าความต้านทาน R_2 ของโรเตอร์ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในแท่งตัวนำของโรเตอร์จะทำให้เกิดการสูญเสียในรูปพลังงานความร้อน โดยมีปริมาณการสูญเสียเป็นดังนี้

$$\text{Rotor } I^2 R \text{ loss} = q_1 I_2^2 R_2 \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.17 และสมการ 2.18 จะได้ว่าพลังงานกลที่ถูกสร้างขึ้นที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานที่ส่งผ่านไปยังโรเตอร์ทั้งกับความสูญเสียทางความร้อนที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์เป็นดังนี้

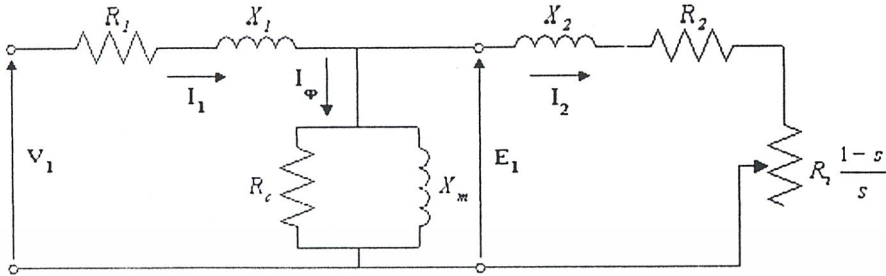
$$P = P_{g1} - \text{rotor } I^2 R \text{ loss} = q_1 I_2^2 \frac{R_2}{s} - q_1 I_2^2 R_2 \quad (2.19)$$

$$F = q_1 I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s} \quad (2.20)$$

$$P = (1-s)P_{g1} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.21 จะเห็นว่าพลังงานทั้งหมดที่ส่งผ่านจากสเตเตอร์ P_{g1} ที่กลายเป็นพลังงานกลภายในของโรเตอร์จะเป็นค่าเศษส่วนกับค่า $(1-s)$ ซึ่งที่ค่าสลิปสูงๆ ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำ จึงมีการกำหนดว่าพลังงานกลภายในแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับพลังงานที่ถูกดูดซับโดยค่าความต้านทาน $R_2(1-s)/s$ ซึ่งจะเป็นพลังงานส่วนที่กลายเป็นพลังงานกลภายใน และสามารถสร้างความสัมพันธ์ของพลังงานกลภายในให้อยู่ในรูปของผลคูณระหว่างความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์และแรงบิดภายในโรเตอร์ τ_c ได้ดังนี้

$$P = (1-s)\omega_s \tau_e \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดภายใน

$$\tau_e = \frac{1}{\omega_s} q_1 I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.23)$$

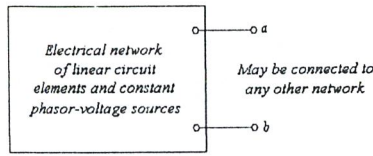
สมการแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุมเชิงโครนัส

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{\text{Poles}} \quad (2.24)$$

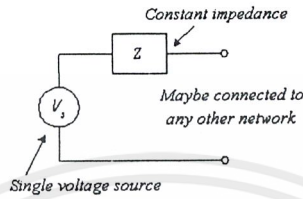
2.3 การวิเคราะห์แรงบิดและกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.3.1 การวิเคราะห์แรงบิดและกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ทฤษฎีเทวินิน

ทฤษฎีเทวินินเป็นการแทนวงจรเครือข่ายไฟฟ้า (electrical network) ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่มีมุมเฟสคงที่ 1 แหล่งจ่าย อนุกรมกับค่าอิมพีแดนซ์ 1 ค่าดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) เป็นวงจรเครือข่ายทางไฟฟ้าที่เราต้องการแทนด้วยวงจรเทวินินเมื่อมองจากจุดเชื่อมต่อ a และ b 2.5(ข) แสดงการวางวงจรเทวินินที่แทนที่วงจรเครือข่ายไฟฟ้าเมื่อมองจากจุดเชื่อมต่อ a และ b ในการวิเคราะห์แรงบิดและกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ทฤษฎีเทวินินนั้น จะทำการแทนวงจรของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ด้วยวงจรเทวินินที่จุด a และ b ดังรูปที่ 2.6 โดยที่จะตัดค่าความต้าน R_c ออกเนื่องจากมีค่ามากกว่าค่าอื่นผ่านมีค่าน้อย ทำให้ไม่เกิดความคลาดเคลื่อนมากนัก

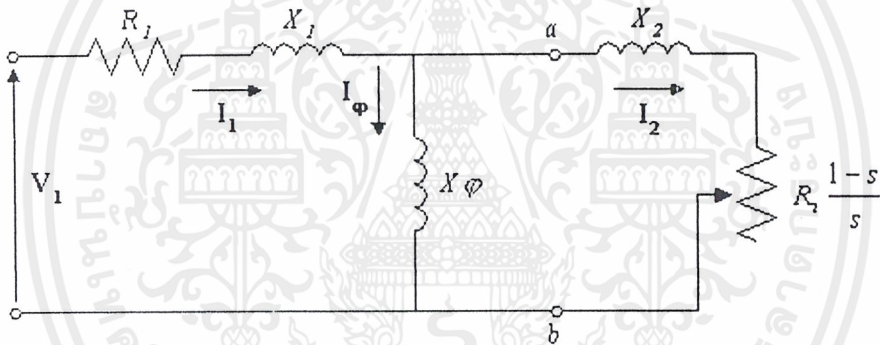


(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 (ก) วงจรเครือข่ายเชิงเส้นทั่วไป (ข) วงจรสมมูลย์เมื่อใช้ทฤษฎีเทวินิน



รูปที่ 2.6 จุดเชื่อมต่อ a และ b ในวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการหาค่าแรงดันแหล่งจ่ายวงจรเทวินิน V_{1a} จะทำการคำนวณหาแรงดันตกจุดเชื่อมต่อ a และ b เมื่อทำการเปิดวงจร (open circuit) ที่จุด a และ b จากรูปที่ 2.6 ค่าแรงดันที่ตกคร่อมจุดเชื่อมต่อ a และ b เมื่อทำการเปิดวงจร จากหลักการแบ่งแรงดัน แรงดัน V_{1a} จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{1a} = V_1 \frac{jX_\phi}{R_1 + jX_{11}} \tag{2.25}$$

โดยที่ $X_{11} = X_1 + X_\phi$ (2.26)

ส่วนค่าของกระแสเมื่อทำการปิดวงจร (short circuit) ที่จุด a และจุด b จะมีค่าเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

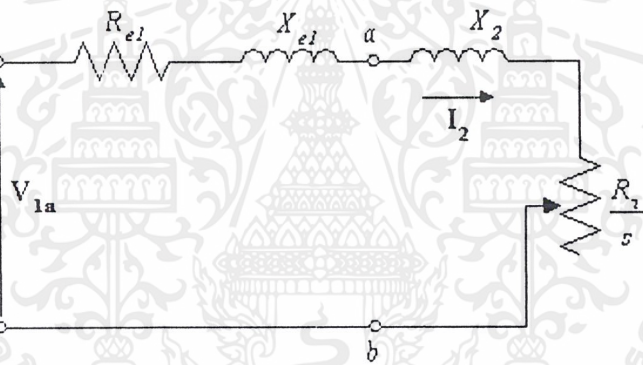
$$\mathbf{I}_{sc} = \frac{\mathbf{V}_1}{R_1 + jX_1} \quad (2.27)$$

ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูล์เทวินินจะมีค่าเท่ากับ

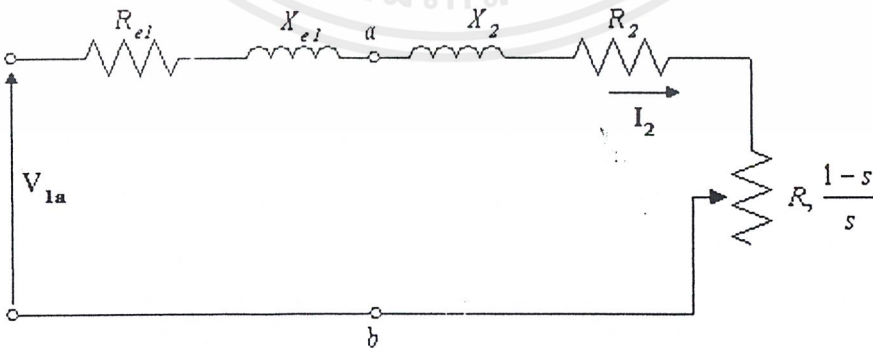
$$R_{e1} + jX_{e1} = R_1 + jX_1 \quad (2.28)$$

จากวงจรเทวินินของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.7 จะสามารถคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังสมการ

$$T = \frac{1}{\omega_s} \frac{q_1 V_{1a}^2 (R_s / s)}{(R_{e1} + R_2 / s)^2 + (X_{e1} + X_2)^2} \quad (2.29)$$



(ก)



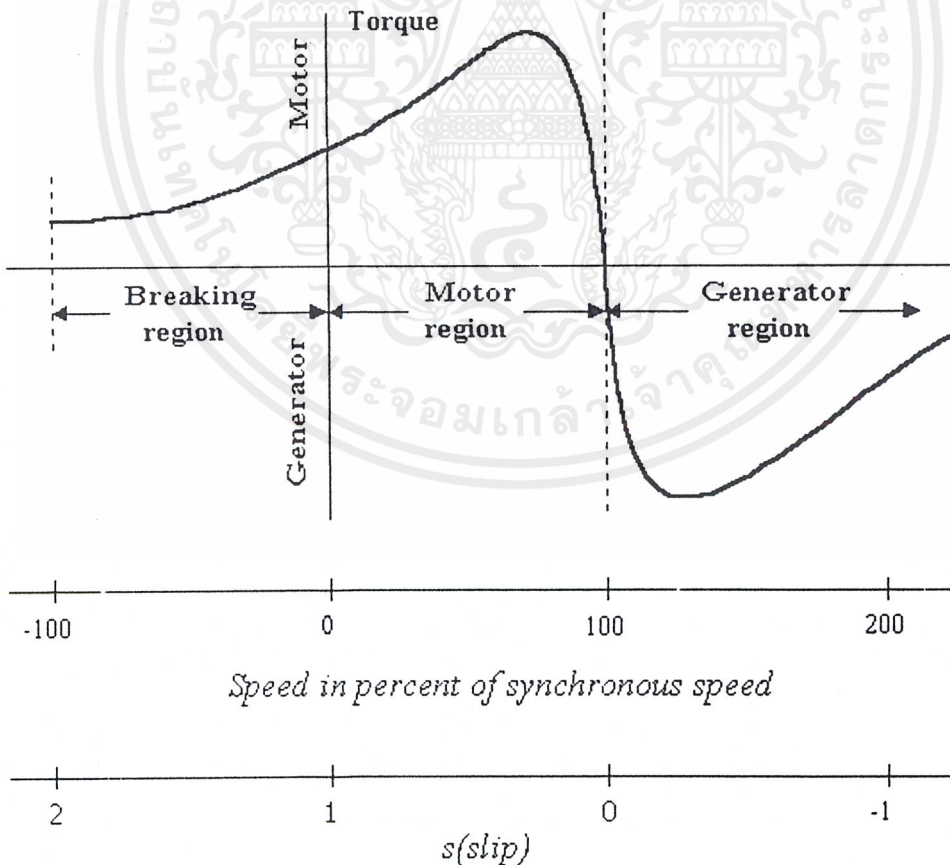
(ข)

รูปที่ 2.7 วงจรสมมูล์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อใช้ทฤษฎีเทวินิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.29 เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำถูกต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันที่ค่าแรงดันและความถี่คงที่ เมื่อทำการกำหนดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ตั้งแต่ความเร็วรอบเป็นลบ(ค่าสลิปเป็นบวกมากกว่า 1) จนไปถึงที่ค่าความเร็วรอบที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัส(ค่าสลิปติดลบ)จะได้กราฟ แรงบิด-สลิป ของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังแสดงดังรูปที่ 2.8

ในสภาวะการทำงานปกติมอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำงานที่ความเร็วจากศูนย์ถึงความเร็วซิงโครนัส หรือที่ค่าสลิปจาก 1 ถึง 0 ในการทำงานย่านนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำงานในย่านมอเตอร์ (motor region) คือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล ส่วนในกรณีที่ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่ามากกว่าความเร็วซิงโครนัสมอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำงานในลักษณะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator region) กล่าวคือมอเตอร์จะเปลี่ยนพลังงานกลที่ได้รับตรงมาจากเพลาให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า ในกรณีสุดท้ายที่ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าเป็นลบ (เพลา มอเตอร์หมุนสวนทางกับทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน) มอเตอร์จะทำงานในลักษณะเบรก (braking region) ซึ่งเมื่อในขณะที่มอเตอร์หมุนอยู่มอเตอร์จะถูกเบรกทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลง ซึ่งจะมีประโยชน์ในการหยุดมอเตอร์เหนี่ยวนำในทางอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.8 กราฟ แรงบิด-สลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 แรงบิดเริ่มต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

แรงบิดเริ่มต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดขึ้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้มอเตอร์เริ่มหมุน โดยที่ความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ซึ่งค่าสลลิปจะมีค่าเท่ากับ 1 ค่าแรงบิดเริ่มต้นของมอเตอร์จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน R_2 ยิ่งมีค่ามากแรงบิดเริ่มต้นของมอเตอร์ก็ยิ่งมีค่ามาก เนื่องจากการส่งผ่านพลังงานไปยังโรเตอร์มาก

2.3.3 แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นเมื่อมีการส่งผ่านพลังงานไปยังค่าความต้านทาน $\frac{R_2}{s}$ จากวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 2.7(ก) จากหลักการส่งผ่านพลังงาน ค่าความต้านทาน $\frac{R_2}{s}$ จะได้รับพลังงานมากที่สุดเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของ $\frac{R_2}{s}$ มีค่าเท่ากับค่าผลรวมค่าอิมพีแดนซ์ของ R_{e1} , X_{e1} และ X_2 ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\frac{R_2}{s_{\max} \tau} = \sqrt{R_{e1}^2 + (X_{e1} + X_2)^2} \quad (2.30)$$

จะได้ค่าว่าค่าสลลิปที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ

$$s_{\max} \tau = \frac{R_2}{\sqrt{R_{e1}^2 + (X_{e1} + X_2)^2}} \quad (2.31)$$

$$T_{\max} = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{0.5q_1 V_{1a}^2}{R_{e1} + \sqrt{R_{e1}^2 + (X_{e1} + X_2)^2}} \right] \quad (2.32)$$

โดยที่ R_{e1} = ค่าความต้านของอิมพีแดนซ์ในวงจรเทวินิน
 X_{e1} = ค่ารีแอคแตนซ์ของอิมพีแดนซ์ในวงจรเทวินิน
 q_1 = จำนวนเฟสของแหล่งจ่ายไฟ

บทที่ 3

การหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 บทนำ

ในการหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถทำได้หลายวิธี โดยที่ตามมาตรฐาน IEEE 112-1996[1] ได้กำหนดวิธีในการหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำไว้อยู่ 4 วิธีด้วยกันได้แก่

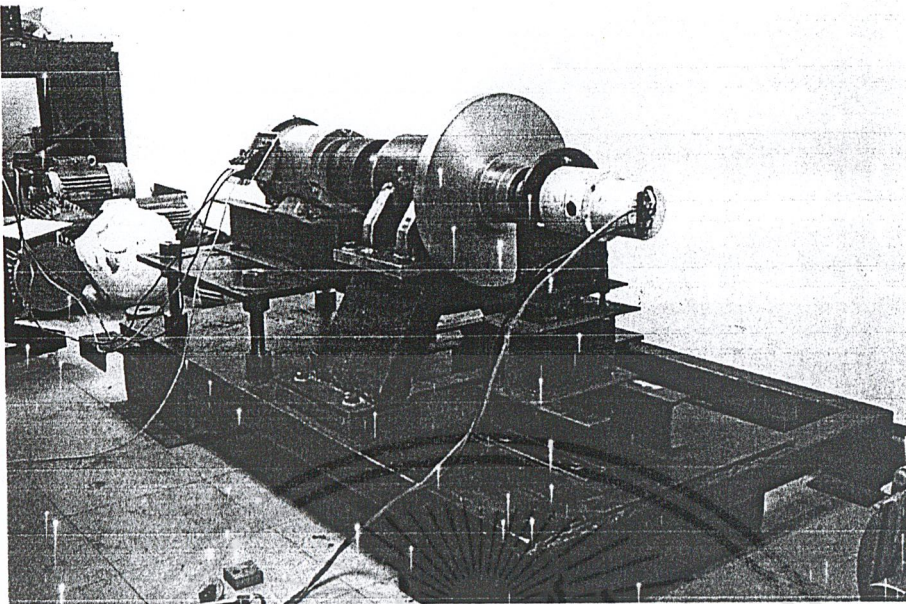
1. วิธีวัดค่าเอาพุทต์ (Output measurement)
2. วิธีเร่งความเร็ว (Acceleration method)
3. วิธีวัดค่าอินพุท (Input measurement)
4. วิธีวัดโดยตรง (Direct measurement)

ในการทดลองจะทดสอบโดยใช้วิธีเร่งความเร็ว (Acceleration method) โดยใช้เทคนิคเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการเร่งความเร็วรอบของมอเตอร์จากหยุดนิ่งจนถึงความเร็วซิงโครนัส โดยมอเตอร์จะถูกสตาร์ทโดยวิธีตรง (direct start) ที่แรงดันพิกัด นอกจากนี้จะใช้วิธีทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว (Retardation method) เพื่อช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ในการนำมาคำนวณหาแรงบิดและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์

3.2 ทฤษฎีเบื้องต้นและหลักการในการหาคุณสมบัติแรงบิดความเร็วรอบของมอเตอร์

3.2.1 วิธีเร่งความเร็วรอบ(acceleration method)

วิธีเร่งความเร็วรอบเป็นวิธีโดยการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำให้หมุนด้วยความเร็วรอบจากศูนย์จนถึงความเร็วซิงโครนัสในสภาวะไร้โหลด (no-load) โดยมอเตอร์จะถูกสตาร์ทโดยวิธีตรง (direct start) แรงดันพิกัด โดยในการทดสอบจะใช้เทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยทำการคลีปปลิ่งเข้ากับเพลลาของมอเตอร์เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการเร่งความเร็วรอบของมอเตอร์และทำให้ผลกระทบจากสภาวะทรานเซียนน้อยลงซึ่งจะมีผลกระทบจากสภาวะทรานเซียนจะทำให้คุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เพี้ยนไป จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลของ แรงดัน กระแส เวลา และความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงเวลาที่มอเตอร์เริ่มสตาร์ทและเร่งความเร็วรอบจนความเร็วรอบคงที่เข้าสู่ความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส เพื่อนำเข้าข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์



รูปที่ 3.1 แทนที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.2 สมการความสัมพันธ์ของมอเตอร์อยู่ในสถานะไดนามิก

ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำถูกสตาร์ท มอเตอร์จะเริ่มหมุนด้วยอัตราเร่งเชิงมุมเนื่องจากมอเตอร์หมุนในสถานะไร้อภาระ(no-load) สมการแรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$T_m = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r + F\omega_r^2 + T_c + T_L \quad (3.1)$$

โดยที่ T_m = แรงบิดของมอเตอร์(N-m)

T_L = แรงบิดของภาระ(N-m)

T_c = แรงบิดเนื่องจาก coulomb friction(N-m)

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

$F\omega_r^2$ = แรงบิดเนื่องจากแรงต้านของลม(windage torque)(N-m)

J_m = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์(kg-m²)

ω_r = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์(rad/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็วเป็นการทดสอบในสภาวะไร้การรบกวนนั้น แรงบิดภาระของมอเตอร์ T_m จะมีค่าเป็นศูนย์ และค่าแรงบิดอันเนื่องมาจากแรงต้านของลมและแรงบิดเนื่องจาก coulomb friction มีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการจึงเหลือเพียง

$$T_m = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad (3.2)$$

3.2.3 เทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย

เทคนิคการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มระยะเวลาในการเร่งความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีระยะเวลายาวนานเพียงพอที่จะลดผลกระทบจากสภาวะทรานเซียนทางไฟฟ้าจากมอเตอร์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อแรงบิดของมอเตอร์ในขณะสตาร์ท ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์กับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ แสดงดังสมการที่ 3.3

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

โดยที่ t = เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ
จากความเร็วรอบจาก ω_1 ไป ω_2
 J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ(kg-m²)

ในการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้กับระบบ สามารถกระทำได้โดยการคลี่ปลีงล้อช่วยแรง (Fly wheel) ที่ทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยแล้วเข้ากับเพลาของมอเตอร์ ทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบมีค่ามากขึ้น ดังนั้นจากสมการที่ 3.2 จะได้สมการใหม่หลังจากรวมผลจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจากล้อช่วยแรงแล้ว ดังสมการที่ 3.4

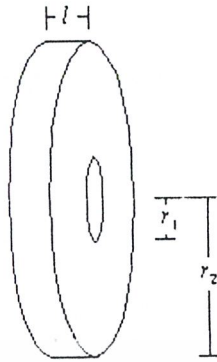
$$T_m = (J_m + J_1) \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad (3.4)$$

โดยที่ J_1 = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรง(kg-m²)

3.2.4 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรง

สำหรับล้อช่วยแรงที่นำมาช่วยเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้กับระบบมีลักษณะดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 รูปทรงล้อช่วยแรงที่ช่วยเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้กับโรเตอร์

สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงในรูปที่ 3.3 แสดงดังสมการที่ 3.5

$$J_1 = \frac{\pi}{2} \rho l (r_2^4 - r_1^4) \quad (3.5)$$

โดยที่ ρ = ค่าความหนาแน่นของเนื้อสารที่ใช้นำล้อช่วยแรง ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
 r_1, r_2 = รัศมีภายในและภายนอกของวัตถุทรงกระบอก (m.)
 l = ความหนาของทรงกระบอก

3.2.5 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายหนัก

ในการคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ดังสมการที่ 3.4 มีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าอยู่ 2 ตัว คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนัก D และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ J_m ในการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองสามารถหาได้จากการคำนวณข้อมูลในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วรอบลงโดยใช้การทดสอบด้วยวิธีหน่วยความเร็วย้อน (retardation test) ตามมาตรฐาน IEC 34-2 ซึ่งกระทำโดยการเดินเครื่องมอเตอร์ที่สภาวะความเร็วคงตัวโดยไร้ภาระที่พิกัดแรงดัน หลังจากนั้นทำการปลดแหล่งจ่ายไฟออกให้มอเตอร์หมุนต่อไปด้วยโมเมนต์ความเฉื่อยด้วยความเร็วรอบที่ต่ำลงเรื่อยๆ เนื่องจากผลจากความหนัก หลังจากปลดแหล่งจ่ายไฟออกแล้วแรงบิดของมอเตอร์ (T_m) จะมีเป็นศูนย์ โดยในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์แรงบิดของมอเตอร์จะทำการคำนวณที่ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 105%-95% ที่ความเร็วรอบพิกัด โดยจะได้สมการสภาวะของมอเตอร์ในสภาวะหน่วยวงความเร็วดังสมการที่

3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่	J_m	= ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์(kg-m ²)
	J_1	= ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรง(Fly wheel)(kg-m ²)
	D	= ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด
	ω_r	= ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์(rad/s)

3.3 กระบวนการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.3.1 polynomial regression

เนื่องจากข้อมูลความเร็วรอบที่บันทึกได้มีการแกว่งของสัญญาณมาก อันมีสาเหตุอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆเช่น ซี commutator ของ DC tacho generator, ความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ในการคลี่ปดิ่ง รวมไปถึงตัวมอเตอร์เอง ทำให้สัญญาณที่บันทึกได้ไม่สามารถนำมาคำนวณหาแรงบิดได้ทันที จำเป็นจะต้องทำให้สัญญาณมีความเรียบก่อนโดยอาศัยกระบวนการ polynomial regression เพื่อจัดสัญญาณของข้อมูลดิบให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.7

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (3.7)$$

บทที่ 4

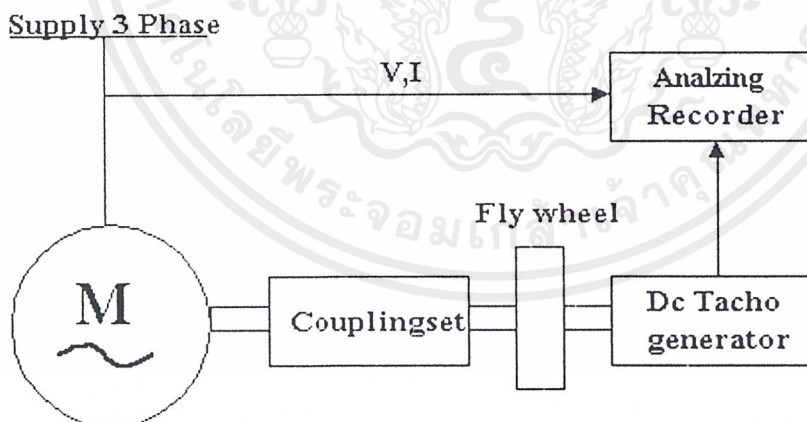
การทดลองและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำจะประกอบไปด้วยการทดสอบโดยวิธีเร่งความเร็ว และการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว ซึ่งผลจากการคำนวณข้อมูลคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากวิธีเร่งความเร็วรอบจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณจากวงจรสมมูลย์เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือได้ของผลการทดสอบ

4.2 วิธีการทดลอง

ในการทดสอบจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้ว พิกัดแรงดัน 380 โวลต์ ทำการต่อวงจรแบบสตาร์ โดยในการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์จะใช้ DC tachogenerator แปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ให้อยู่ในรูปของแรงดัน ในการบันทึกข้อมูลจะใช้ Analyzing Recorder ของ YOKOGAWA รุ่น AR 1100A ทำการบันทึกข้อมูลของ แรงดัน, กระแส, และความเร็วรอบดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบ

ขนาดของโมเมนต์ความเฉื่อย, เส้นผ่านศูนย์กลาง, และขนาดของมวลของล้อช่วยแรงที่ใช้สำหรับการทดสอบ ตามรูปที่ 4.1 นั้นแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย, เส้นผ่านศูนย์กลางและมวลของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (kg-m ²)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	มวล (kg)
0.0994	0.2687	10.7
0.5054	0.4018	24.7
1.0093	0.4778	35.1

4.2.1 การทดสอบด้วยวิธีเร่งความเร็ว (Acceleration test)

ในการทดสอบจะทำการสตาร์ทมอเตอร์ที่แรงดันพิกัด 380 โวลต์โดยวิธีสตาร์ทโดยตรง โดยมอเตอร์จะถูกสตาร์ทจากสภาวะหยุดนิ่งและสภาวะหมุนกับทิศทาง โดยทำการเปลี่ยนค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่คลิปลงเข้ากับโรเตอร์ ทำการบันทึกข้อมูลของกระแส, แรงดัน, และความเร็วรอบทันทีที่เริ่มสตาร์ทมอเตอร์จนกระทั่งความเร็วรอบของมอเตอร์เข้าใกล้ความเร็วเชิงโรตัสที่สภาวะคงตัว

4.2.2 การทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว

ในการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็วนั้นจะทำการเดินเครื่องมอเตอร์ให้อยู่ในสภาวะความเร็วรอบคงตัวไว้ก่อนแล้วทำการตัดแหล่งจ่ายออกจากมอเตอร์ ปล่อยให้มอเตอร์หมุนต่อไปด้วยความเฉื่อย ทำการบันทึกข้อมูลของความเร็วรอบมอเตอร์ในสภาวะหน่วงความเร็วโดยทันทีที่ตัดแหล่งจ่ายออก โดยในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องทำการเปลี่ยนขนาดของล้อช่วยแรง

4.2.3 ค่าอิมพีแดนซ์วงจรสมมูลของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าดังตารางที่ 4.2

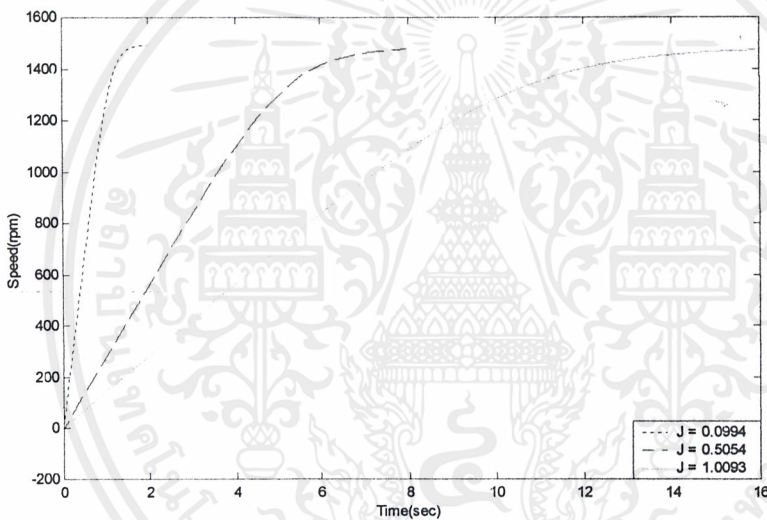
R_1	X_1	R_2	X_2	R_c	X_m
10.5 Ω	9.80 Ω	10.13 Ω	9.80 Ω	2366.2 Ω	216.63 Ω

4.3 ผลการทดสอบ

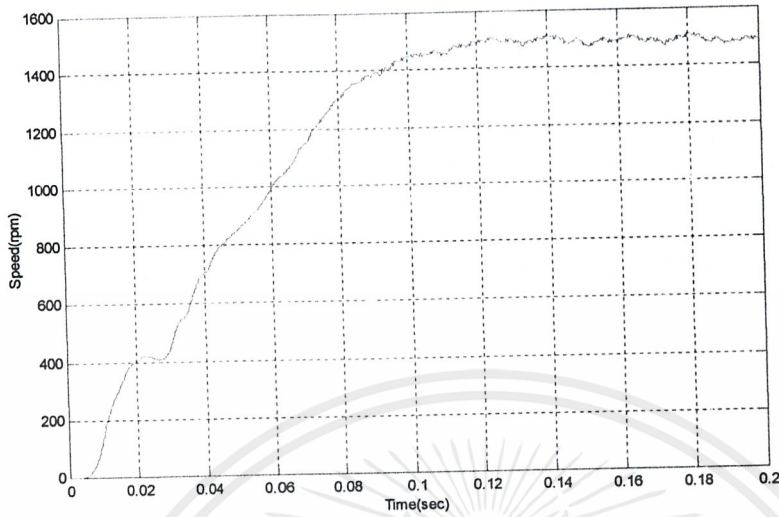
ในรูปที่ 4.2 นำเสนอผลของการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์ รูปที่ 4.3, 4.4, 4.5, และ 4.6 นำเสนอกาฟความเร็วรอบ-เวลาของมอเตอร์ขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

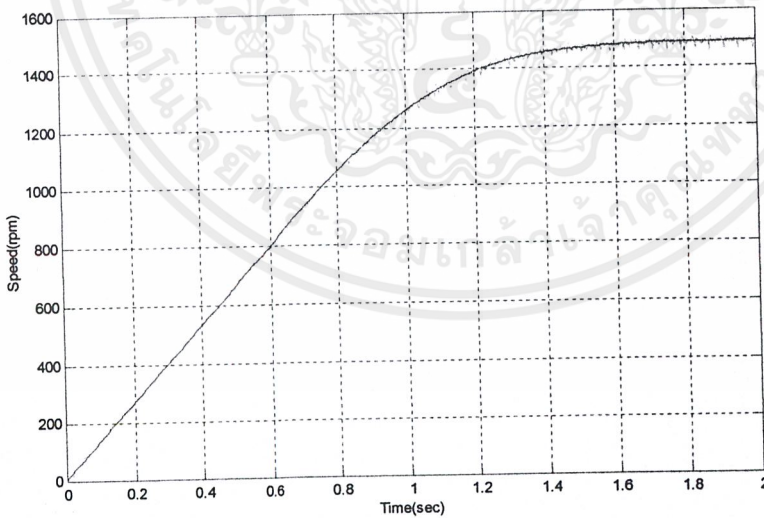
เร่งความเร็วโดยที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงต่างๆ รูปที่ 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 นำเสนอกราฟความเร็วรอบ-ความเร็วของมอเตอร์ในขณะหนึ่งวงความเร็วโดยที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของช่วยแรงต่างๆ ในรูปที่ 4.11, 4.12, และ 4.13 นำเสนอกราฟแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อคำนวณจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงที่ขนาดต่างๆ ส่วนในรูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบ กราฟแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณจากวงจรสมมูลย์



รูปที่ 4.2 กราฟความเร็วรอบ-เวลาของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า
เมื่อทำการทดสอบกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาดต่างๆ

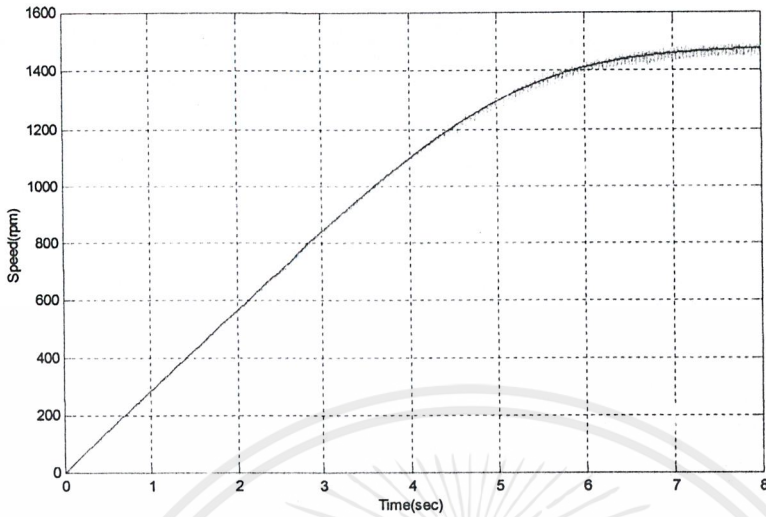


รูปที่ 4.3 กราฟ เวลา-ความเร็วรอบ ขณะเร่งความเร็ว
เมื่อทำการเร่งความเร็วมอเตอร์โดยไม่คับปลิ่งล้อยช่วยแรง

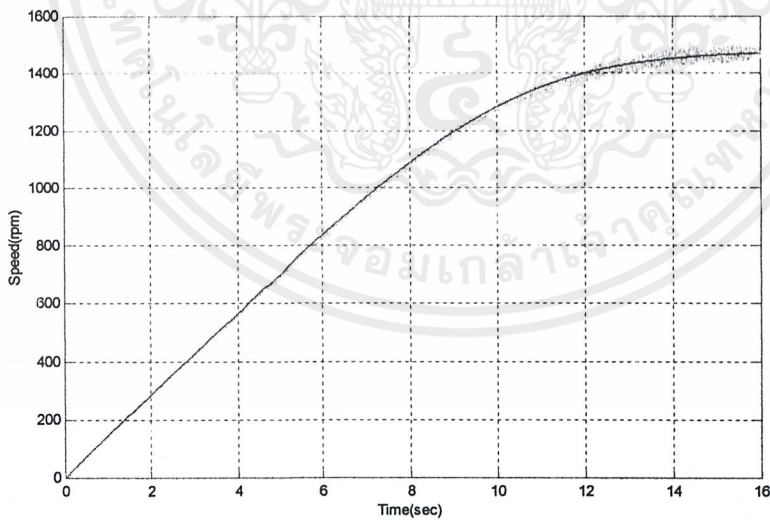


รูปที่ 4.4 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะเร่งความเร็ว
เมื่อคับปลิ่งล้อยช่วยแรงโมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 0.0994 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



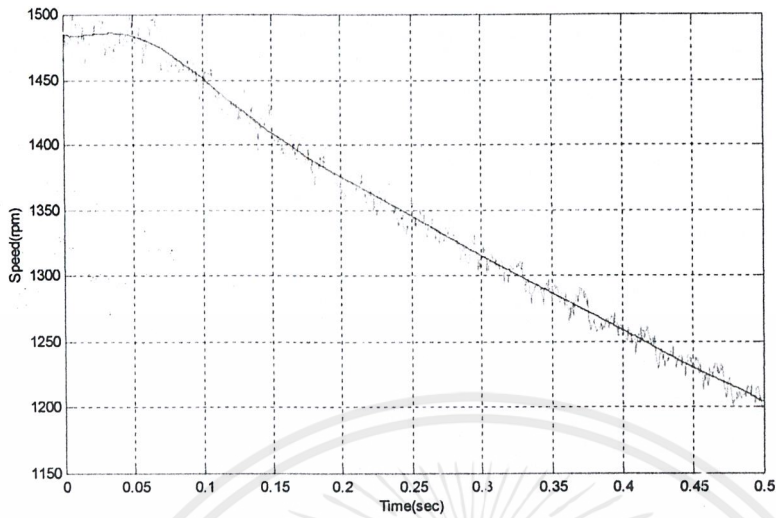
รูปที่ 4.5 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะเร่งความเร็ว
เมื่อทำการคัปปลิ่งล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 0.5054 kg-m^2



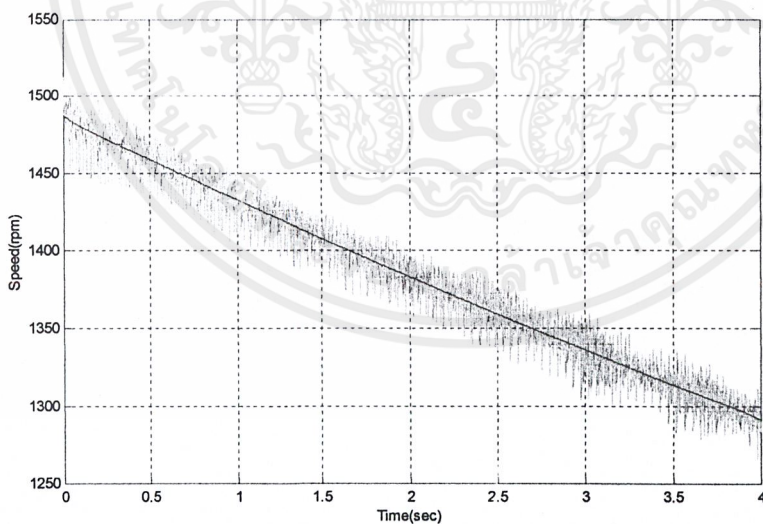
รูปที่ 4.6 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะเร่งความเร็ว
เมื่อทำการคัปปลิ่งล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 1.0093 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการทดสอบด้วยวิธีหน่วยความเร็ว

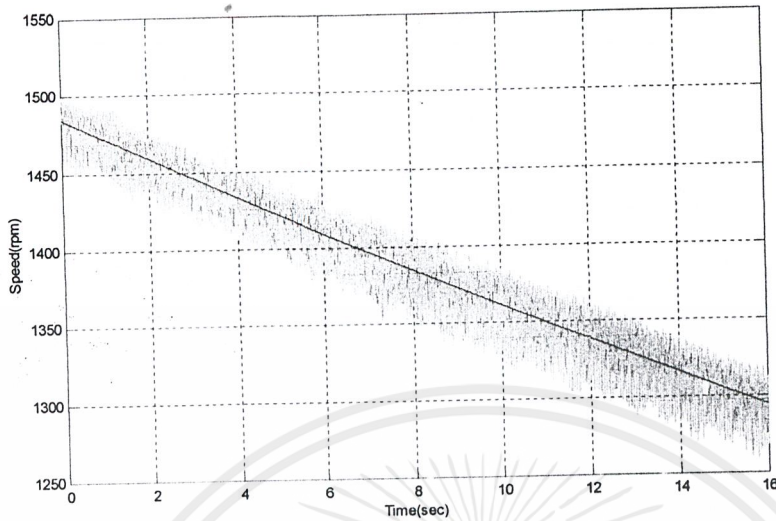


รูปที่ 4.7 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะหน่วยความเร็ว
เมื่อไม่ค้ำปลึงล้อยช่วยแรง

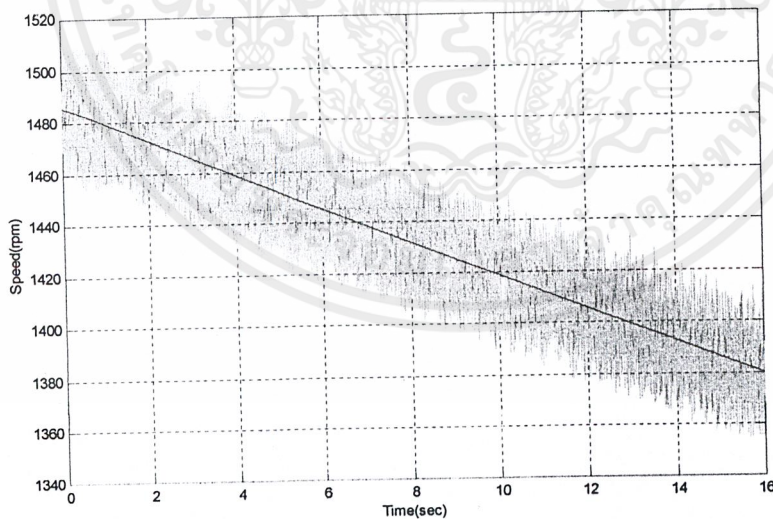


รูปที่ 4.8 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะหน่วยความเร็ว
เมื่อทำการค้ำปลึงล้อยช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 0.0994 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



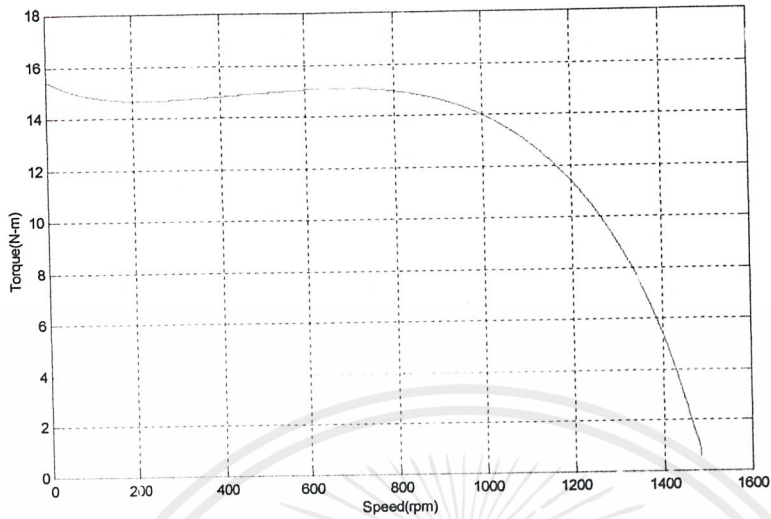
รูปที่ 4.9 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะหน่วงความเร็ว
เมื่อทำการคัปปลิ่งล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 0.5054 kg-m^2



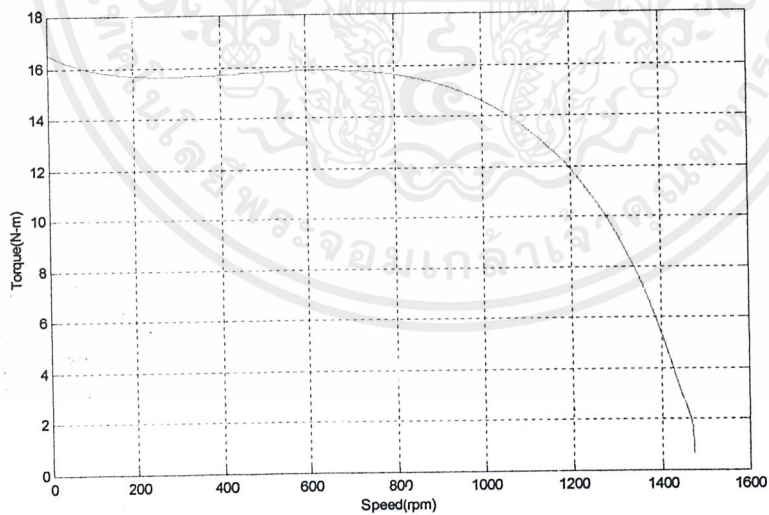
รูปที่ 4.10 กราฟ ความเร็วรอบ-เวลา ขณะเร่งความเร็ว
เมื่อทำการคัปปลิ่งล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 1.0093 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการคำนวณหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบ

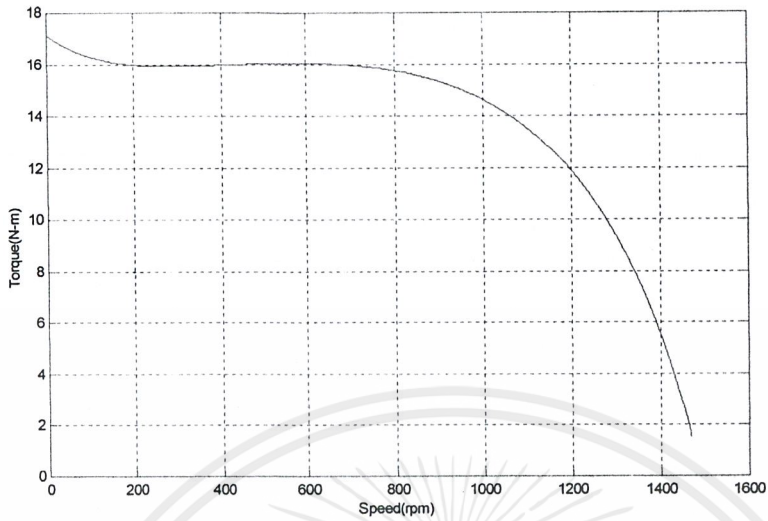


รูปที่ 4.11 กราฟ แรงบิด-ความเร็วรอบมอเตอร์ 1 แรงม้า
เมื่อทำการคัปปลิ่งกับล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 0.0994 kg-m^2

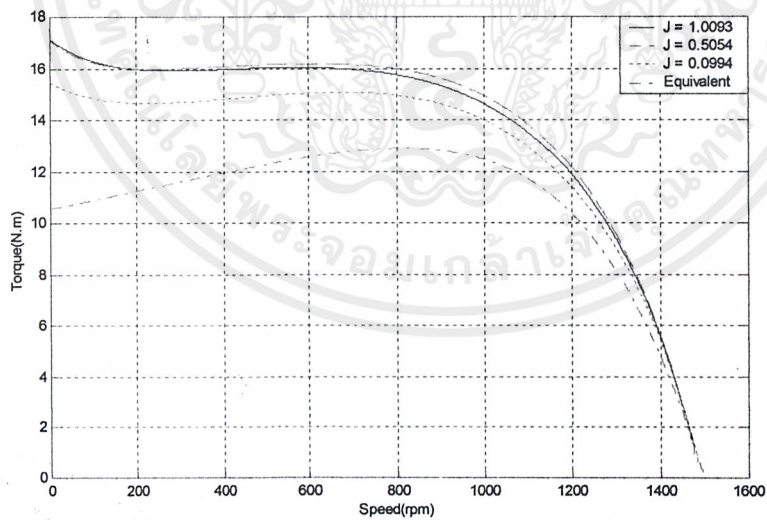


รูปที่ 4.12 กราฟ แรงบิด-ความเร็วรอบมอเตอร์ 1 แรงม้า
เมื่อทำการคัปปลิ่งกับล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 0.5054 kg-m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟ แรงบิด-ความเร็วรอบมอเตอร์ 1 แรงม้า
เมื่อทำการคลี่ปลีกับล้อช่วยแรง โมเมนต์ความเฉื่อยขนาด 1.0093 kg-m^2



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติแรง-ความเร็วของมอเตอร์ 1 แรงม้า
จากการทดสอบกับจากการคำนวณวงจรมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลและวิจารณ์

บทสรุปและวิจารณ์

ในการทดสอบหาคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้วิธีเร่งความเร็ว เป็นการทดสอบที่มีความเหมาะสมในการทดสอบหาแรงบิดของมอเตอร์เนื่องจากมีความง่ายในการทดสอบและผลที่ได้จากการทดสอบมีความน่าเชื่อถือได้เนื่องจากสามารถแสดงค่าแนวโน้มของคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหี่ยวหน้าได้เป็นที่น่าพอใจ จากผลการทดสอบหามอเตอร์ 1 แรงม้าแสดงให้เห็นว่าค่ากราฟแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าต่างกันเล็กน้อยเมื่อคำนวณหาจากขนาดของล้อช่วยแรงที่ต่างกันเล็กน้อยซึ่งสาเหตุอาจเกิดมาจากวิธีที่ใช้ในการคำนวณ อาจจะไม่เหมาะสมเพียงพอ ทำให้ผลการคำนวณมีความคลาดเคลื่อน

นอกจากนี้ผลที่ได้จากการทดสอบยังมีความคลาดเคลื่อนตั้งแต่ทำการเก็บข้อมูลเพราะสัญญาณรบกวน (noise) ที่เกิดในขณะที่ทำการวัดความเร็วรอบ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเช่น สัญญาณรบกวนที่เกิดจากซีคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านของ DC tachogenerator, ความยืดหยุ่นไม่เป็นวัตถุแข็งเกร็งของยางรองในชุดคลีปปลิงซึ่งทำให้เกิดการสั่นที่ชุดคลีปปลิง, ความประณีตการประกอบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ, ความเสียดทานที่เพลา, ความคลาดเคลื่อนของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรง และสาเหตุอื่นเนื่องมาจากสภาวะทรานเซียนทางไฟฟ้าขณะสตาร์ทภายในตัวมอเตอร์เอง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ข้อมูลที่บันทึกได้มีสัญญาณรบกวนค่อนข้างจะมากและส่งผลต่อการคำนวณข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

อย่างไรก็ตามสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสาเหตุดังที่กล่าวมาสามารถที่จะทำให้ลดลงได้เช่นทำการหมุนกับทิสทางของมอเตอร์ก่อนสตาร์ทเพื่อเร่งความเร็วซึ่งเป็นการลดสภาวะทรานเซียนทางไฟฟ้าไม่ให้มีผลกระทบมาถึงช่วงข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณ, การเพิ่มความประณีตในการติดตั้งแท่นที่ใช้ในการทดสอบ เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้เป็นวิธีที่สามารถลดขนาดของสัญญาณรบกวนลงได้

```
%program for plot speed-time curve
clc;
clear;
dir;
input('Select file: ');
n = input('Enter speed column number: ');
sam = input('Enter sampling rate: ');

%compute zone
t = a(:,1);
speed = a(:,n);
speed = speed./0.0031125;
time = t./sam;

%fit curve zone
sp = polyfit(time,speed,9);
speedfit = polyval(sp,time);

%plot curve
plot(time,speed,time,speedfit)
xlabel('Time(sec)');
ylabel('Speed(rpm)');
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%program for calculate D and J parameter
clc;
clear;
dir;
input('Select file to perform: ');
n = input('Enter speed column number: ');
sam = input('Enter sampling rate: ');

%calculate zone
speed= a(:,n);
t = a(:,1);
t=t./sam;
speed=speed./0.0031125;
speed=speed.*pi./30;
speed=log(speed);

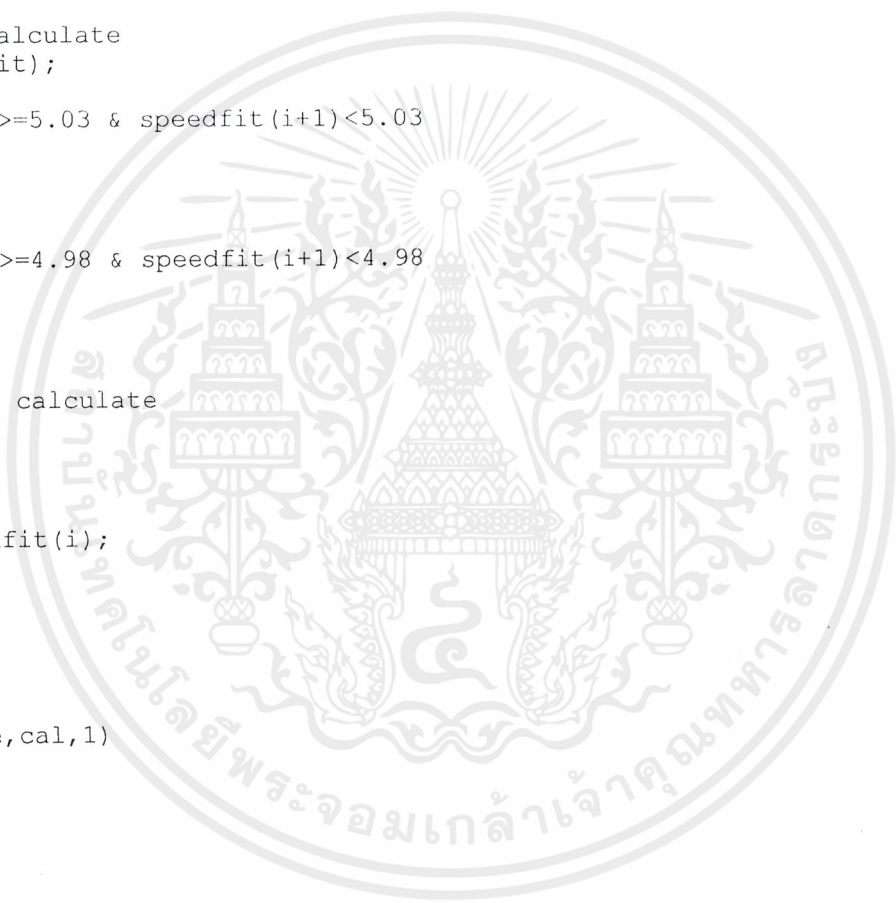
%fit curve
spfit = polyfit(t,speed,9);
speedfit = polyval(spfit,t);

%find range for calculate
l = length(speedfit);
for i = 1:l-1
    if speedfit(i)>=5.03 & speedfit(i+1)<5.03
        m1=i;
    end
end
for i = 1:l-1
    if speedfit(i)>=4.98 & speedfit(i+1)<4.98
        m2=i;
    end
end

%create array for calculate
range=m2-m1+1;
k=0;
for i = m1:m2
    k=k+1;
    cal(:,k)=speedfit(i);
    time(:,k)=k-1;
end
time = time./sam;

%find slope
plot(time,cal)
slope=polyfit(time,cal,1)

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%Program for calculate torque-speed curve characteristic of inducition motor
%By Patavee Grajangloke 41014242
clc;
clear;
dir;
disp('Program for calculate torque-speed curve characteristic');
disp(' ');
input('Load file: ');
s = input('Enter number of speed column: ');
samp = input('Enter sampling rate: ');
j = input('Enter moment inertia: ');
jm = input('Enter moment inertia of motor: ');
d = input('Enter Fiction coefficiency: ');

%calculate zone
t = a(:,1);
speed = a(:,s);
t = t./samp;
speed = speed./(0.0031135);
wr = (pi./30).*speed;
wrfit = polyfit(t,wr,9);
wr = polyval(wrfit,t);

l = length(wr);
ti = 1./samp;
k = 0;
for i = 1:l-1
    k = k + 1;
    wrnow = (wr(i+1)+wr(i))./2;
    torque(k) = (jm + j).*(wr(i+1)-wr(i))./ti + (d.*wrnow);
    speedx(k) = wrnow;
end
speedx=speedx.*30./pi;
plot(speedx,torque);
xlabel('Speed(rpm)');
ylabel('Torque(N-m)');

```



```

%Program for calculate torque from equivalent circuit
%By Patavee Grajangloke 41014242
clear;
clc;
v=input('input phase voltage: ');
r1=input('stator resistance: ');
x1=input('stator reactance: ');
r2=input('rotor resistance: ');
x2=input('rotor reactance: ');
rc=input('core loss resistance: ');
xm=input('magnetizing reactance: ');

```

```

%calculate zone
z= sqrt(r1.^2+(x1+xm).^2)
vla=(xm.*v)./z
j = 0;
for i = 0.999:-0.001:0.001;
    j = j + 1;
    r22(j) = r2./i;
    rpm(j) = 1500.*(1-i);
end
req = r1 + r22;
xeq = x1 + x2;
k = 0;
for i = 1:j
    k = k + 1;
    z = req(i).^2 + xeq.^2;
    zeq(i) = sqrt(z);
end
i = vla./zeq;
torqe = (3./157.079).*i.^2.*r22;
plot(rpm,torqe);
ylabel('Torque(N.m)');
xlabel('Speed(rpm)');

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ ได้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จากท่านผู้มีพระคุณต่อไปนี้

1. ผศ. พิชิต ล้ำของ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ ที่เป็นแนวทางการทำโครงการให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และยังให้คำสอนที่เป็นประโยชน์ต่อไปในการทำงานในภายภาคหน้า
2. นายวรชาติ แซ่ก๊ก นักศึกษาปริญญาโทคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งเป็นผู้คอยให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลือในการทำงาน

ศูนย์พัฒนาศึกษาที่อำนวยความสะดวกในเรื่องสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือในการทดลองสุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณทุกๆท่านที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆที่ยังไม่ได้กล่าวถึงอีกมากมาย



เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Standard 112-1996, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators
- [2] IEC Standard 34-2 1982 Part 2: Method for determining losses and efficiency for rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicle)
- [3] Peter Vas. **Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machine** The United States of America : Oxford University Press. 1993.
- [4] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, Stephen D. Umans. Electrical Machinery. 5th Edition. London : McGraw Hill. 1992
- [5] วรชาติ แซ่ก๊ก, พิชิต ลำยอง. “การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยวิธีการเร่งความเร็ว” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24), สจล. 22-23 พฤศจิกายน 2544 หน้า 199-204