

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคในการหาจกรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการเพิ่มโมเมนต์

ความเฉื่อยจากภายนอก

**(Technique for equivalent circuit evaluation of 3 phase induction motor by
increasing external moment of inertia)**



ร/ท.

ว/ก. ๒๗

๑๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 82988
วัน,เดือน,ปี..... 30 ก.ค. 2551

b. 11958340
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

ปีการศึกษา 2550

เทคนิคในการหาวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการเพิ่มโมเมนต์
ความเฉื่อยจากภายนอก

(Technique for equivalent circuit evaluation of 3 phase induction motor by increasing
external moment of inertia)



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิชิต ล้ายอง
อ. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เทคนิคในการหาจอร์สมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการเพิ่ม
โมเมนต์ความเฉื่อยจากภายนอก

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย พงศ์พันธุ์ จิระวัฒนา
 2. นาย พงศกร อัมพวันวงศ์
 3. นาย วีระ พิวพลเทพ
 4. นาย สมศักดิ์ จิระไพบุลย์วินัย

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ พิชิต ลำยอง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ เปี่ยมภูมิ สฤกษ์พฤษ)

เทคนิคในการหาวงจรมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการเพิ่ม โมเมนต์ความเฉื่อยภายนอก

นาย พงศ์พันธ์ จิระวัฒนา
นาย พงศกร อัมพวันวงศ์
นาย วีระ พัวพลเทพ
นาย สมศักดิ์ จิระไพบุลย์วินิชย์
รศ. พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. เปี่ยมภูมิ สฤกษ์ฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ปริญาญานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอเทคนิคในการทดสอบเพื่อหาวงจรมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยภายนอก ซึ่งการทดสอบจะกระทำโดยการสตาร์ทมอเตอร์ที่อยู่ในสภาวะไร้ภาระ (no-load) ด้วยวิธีการสตาร์ทตรง (direct on-line starting) และทำการบันทึกค่าแรงดัน, กระแส, ความเร็วรอบ, และเวลาในช่วงที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากความเร็วยุติถึงความเร็วเข้าใกล้ความเร็วเชิงโครนัสในสภาวะคงตัว (steady state) ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ลักษณะกระแสในมอเตอร์, อิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์, และแรงบิด-ความเร็วรอบ ในการหากราฟแรงบิด-ความเร็วรอบ จะหาได้จากวิธีการวัดความเร็วรอบโดย DC-Technogenerator ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบ จะถูกพิจารณาพร้อมกับกราฟที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของวงจรมูลย์ เพื่อนำมาหาวงจรมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำตลอดย่านความเร็ว

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

Pongpun Jirawattana

Phongsakhon Umpawanwong

Weera Phuapholthep

Somsak Jirapaiboonwanish

Assoc. Prof. Pichit Lumyong Supervisor

Piampoom Sarikprueck Supervisor

2007

ABSTRACT

This thesis presents a technique to evaluate equivalent circuit of induction motor using and acceleration method. Test is performed on starting and induction motor by the direct-on-line starting at on-load state. Voltage, current and time during the acceleration from the standstill until the speed near a synchronous speed are recorded. Test results are presented in many relationship forms such as characteristic of current in motor, rotor impedance-speed and torque-speed. Torque-speed graph can be found from measurement of speed by DC-Generator curves from and equivalent circuit. To evaluate equivalent circuit of induction motor. To confirm the test results, torque-speed curves from and acceleration test are compare with load test and block rotor test.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จได้ ตามคำแนะนำของ รศ. พิชิต ล้ายอง และ อ.เปี่ยมภูมิ สฤตพฤษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และคอยช่วยเหลือเมื่อผู้วิจัยเกิดปัญหา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของท่านทั้งสองนี้จากใจจริง

ขอขอบพระคุณพี่ ๆ ปรียญาโทในห้องวิจัยที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษา การทดสอบหาข้อมูลในการทำวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณพี่วรชาติ แซ่ก๊ก ที่ช่วยให้ข้อมูลต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือการทำวิจัยนี้

สุดท้ายขอกราบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ของผู้วิจัยทุกๆ ท่าน ที่คอยเป็น กำลังใจ และช่วยเหลือทางด้านเงินทุนในการวิจัยตลอดมา



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 โครงการที่นำเสนอ.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.6 วิธีการดำเนินโครงการ.....	2
1.7 ระยะเวลาการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2.1 สเตเตอร์.....	6
2.2.2 โรเตอร์.....	6
2.2 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	7
2.3 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	8
2.3.1 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ชนิดไม่มีขั้วอื่น.....	8
2.3.2 การเกิดแรงบิดในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	12
2.4 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	12
2.5 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	16
บทที่ 3 วิธีการหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	19
3.1 บทนำ.....	19
3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	19
3.3 การหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	21

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยวิธีเร่งความเร็ว.....	21
3.4.1 สมการแรงบิดมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะdynamic.....	22
3.4.2 เทคนิคในการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	22
3.4.3 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ.....	23
3.5 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนีด.....	24
3.6 ปรากฏการณ์ทางผิว.....	25
3.7 การหาแรงบิดโดยใช้วงจรเทวินิน (Thevenin's theorem).....	26
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	29
4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	29
4.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ3เฟส.....	29
4.1.2 DC-Techogenerator.....	30
4.1.3 ล้อช่วยแรง(Fly wheel).....	31
4.1.4 Analyzing Recorder.....	32
4.1.5 แท่นสำหรับทดสอบมอเตอร์.....	32
4.2 วิธีการทดสอบ.....	33
4.2.1 การทดสอบการวัดความเร็ว โดยใช้เทคโทคโคเจนเนอเรเตอร์ (DC-Tachogenerator).....	33
4.2.2 การทดสอบหา Approximated Equivalent Circuit Of Induction Motor....	34
4.3 ผลการทดสอบ.....	35
4.4 การทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็ว.....	38
4.4.1 ผลการทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	38
4.4.2 ผลการทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์ 3 แรงม้า.....	39
4.4.3 ผลการทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์ 5 แรงม้า.....	40

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5	ผลของกระแสที่ได้จากการทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	41
4.5.1	กระแสสมมาตรของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	41
4.5.2	กระแสสมมาตรของมอเตอร์ 3 แรงม้า.....	42
4.5.3	กระแสสมมาตรของมอเตอร์ 5 แรงม้า.....	42
4.6	การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์.....	43
4.6.1	การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	43
4.6.2	การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 แรงม้า.....	44
4.6.3	การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ 5 แรงม้า.....	44
4.7	การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์.....	45
4.7.1	ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์โดยการแทน ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์โดยใช้วงจรเทวินินของมอเตอร์ 1 แรงม้า....	45
4.7.2	ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์โดยการแทน ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์โดยใช้วงจรเทวินินของมอเตอร์ 3 แรงม้า....	46
4.7.3	ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์โดยการแทน ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์โดยใช้วงจรเทวินินของมอเตอร์ 5 แรงม้า....	47
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง.....	48

ภาคผนวก

บรรณานุกรม

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสองขั้วอย่างง่าย (a) แบบจำลองพื้นฐาน (b) ไดอะแกรมของ เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก.....	9
2.2 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์.....	14
2.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	16
2.4 วงจรสมมูลย์ในอีกรูปแบบหนึ่ง.....	17
3.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะนำมาตัดสินใจเลือก ใช้มอเตอร์ได้.....	19
3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการออกแบบที่ แตกต่างกันตามมาตรฐานของ NEMA.....	20
3.3 รูปทรงของล้อช่วยแรงที่ใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย.....	23
3.4 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กภายใน(internal) และภายนอกตัวนำ (external).....	25
3.5 แสดงอิมพีแดนซ์ภายในตัวนำ.....	25
3.6 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	26
3.7 การยุบวงจรเทวินินขั้นที่ 1.....	26
3.8 ผลการยุบวงจรเทวินินขั้นที่ 1.....	27
3.9 การยุบวงจรเทวินินขั้นที่ 2.....	27
4.1 มอเตอร์ขนาด 1, 3 และ 5 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ.....	29
4.2 DC-Tachogenerator ที่ใช้ในการทดสอบ.....	30
4.3 ล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
4.4 Analyzing Recorder.....	32
4.5 แทนสำหรับทดสอบมอเตอร์.....	33
4.6 กราฟความสัมพันธ์กับกระแสระหว่างกระแสกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขนาด 1 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบ.....	36
4.7 กราฟความสัมพันธ์กับกระแสระหว่างกระแสกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขนาด 3 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบ.....	36
4.8 กราฟความสัมพันธ์กับกระแสระหว่างกระแสกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขนาด 5 แรงม้า ที่ได้จากการทดสอบ.....	37
4.9 กราฟจากสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการทดสอบเปรียบเทียบกับ กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า.....	38

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 กราฟจากสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการทดสอบเปรียบเทียบกับ กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า.....	39
4.11 กราฟจากสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการทดสอบเปรียบเทียบกับ กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า.....	40
4.12 กราฟแสดงกระแสสมมาตรกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า.....	41
4.13 กราฟแสดงกระแสสมมาตรกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า.....	42
4.14 กราฟแสดงกระแสสมมาตรกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า.....	42
4.15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์กับความเร็รรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า.....	43
4.16 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์กับความเร็รรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า.....	43
4.17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์กับความเร็รรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า.....	44
4.18 กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า.....	45
4.19 กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า.....	46
4.20 กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า.....	47
5.1 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเดิม.....	48
5.2 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่หาได้.....	49

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 พิกัดต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ.....	29
4.2 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและมวลของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
4.3 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนีตของระบบ.....	35
4.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ ของมอเตอร์แต่ละขนาด.....	35



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ชื่อโครงการ

เทคนิคในการหาวงจรมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยจากภายนอก (Technique for equivalent circuit evaluation of 3 phase induction motor by increasing external moment of inertia)

1.2 ส่วนนำ

1.2.1 ความสำคัญและที่มา

ในงานด้านอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องต้นกำลังซึ่งในทางอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ก็จะมีภาระที่แตกต่างกันออกไปซึ่งวิศวกร หรือผู้ที่ใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำเป็นต้องทราบคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างชัดเจน จึงจะสามารถเลือกใช้ มอเตอร์ได้ถูกต้องกับขนาดและประเภทของงาน คุณสมบัติที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ คุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบและในการใช้งานจริงนั้น กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่คำนวณได้จากวงจรมูลย์นั้น ไม่เหมือนกับกราฟคุณลักษณะที่ใช้งานจริง โดยเฉพาะช่วงการสตาร์ท จึงทำให้หากเรานำกราฟจากวงจรมูลย์มาใช้ จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้

1.2.2 โครงการที่นำเสนอ

ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเริ่มจากการเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากนั้นจะเป็นการอธิบายปรากฏการณ์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำและนำเสนอวงจรมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อใช้ในการหาคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทดสอบการเร่งความเร็วมอเตอร์โดยเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยวัดแรงดัน, ความเร็วของโรเตอร์และกระแสที่ออกมาจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ Analyzing Recorder ในการบันทึกข้อมูลที่เวลาต่างๆ นำค่าที่ได้มาเข้ากระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณหากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ เพื่อหาวงจรมูลย์ ตลอดจนการใช้งานนำเสนอการทดลองและผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. หาค่าคุณลักษณะแรงบิดและความเร็วรอบ (torque-speed characteristics) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยวิธีเร่งความเร็วซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่สามารถหาค่าคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ ได้ตลอดย่านความเร็วของมอเตอร์ ตั้งแต่หยุดนิ่งจนเข้าสู่สภาวะคงตัว

2. นำค่าคุณลักษณะแรงบิดและความเร็วรอบ (torque-speed characteristics) ที่ได้จากการทดสอบมาใช้ในการคำนวณหา วงจรสมมุทธ์ตลอดย่านการใช้งาน

1.4 ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วงจรสมมุทธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก Project นี้ ซึ่งเป็นวงจรสมมุทธ์ที่ต่างจากวงจรสมมุทธ์ปกติทั่วไป กล่าวคือ วงจรสมมุทธ์ปกติทั่วไปนั้นใช้ได้แค่ช่วงความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น แต่วงจรสมมุทธ์ที่ได้จากการทำ Project นี้ นั้นสามารถใช้ได้ตลอดย่าน

1.5 ขอบเขตของโครงการ

คือการนำเสนอเทคนิคและกระบวนการในการหาค่าคุณสมบัติ-แรงบิดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยทำการทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการทดสอบโดยวิธีการเพิ่มค่าไม่เมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการวิเคราะห์หาแรงบิด-ความเร็วรอบ โดยใช้วิธีการวัด คือ เทคโคเจเนอเรเตอร์ และนำกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบที่ได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบจากวงจรสมมุทธ์ นำกราฟที่ได้มาหาวงจรสมมุทธ์ตลอดย่านการใช้งาน

1.6 วิธีการดำเนินโครงการ

1. เลือกหัวข้อในการดำเนินงาน
2. ศึกษาวัตถุประสงค์และขอบเขตการทำงานของโครงการ
3. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
4. ทำการ No-Load Test เพื่อหาค่า R_c , X_m
5. ทำการ Block-Rotor Test เพื่อหาค่า R_1 , R_2 , X_1 , X_2
6. นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้มาคำนวณหา Torque ทางทฤษฎี โดยใช้ Program Mat lab
7. ทำการทดลองหา Torque จากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1,3,5 แรง
8. นำค่า Torque ทางทฤษฎี และค่า Torque ที่ได้จากการทดลองมาเทียบกัน
9. ทำการหาวงจรสมมุทธ์ของ Torque ที่ทดลองได้

1.8 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปริญาานิพนธ์

ปกใน

บทคัดย่อ

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ

สารบัญ

สารบัญรูป

สารบัญตาราง

บทที่ 1 บทนำ

ชื่อโครงการ

ส่วนนำ

ความสำคัญและที่มา

โครงการที่นำเสนอ

วัตถุประสงค์ของโครงการ

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ขอบเขตของโครงการ

วิธีการดำเนินโครงการ

ผังเวลาการดำเนินโครงการ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

บทที่ 3 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วย

วิธีเร่งความเร็ว

การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์

ความเสียดทานหนีต

บทที่ 4 ผลการทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

วิธีการทดสอบ

ทดสอบการวัดความเร็ว โดยใช้เทคโคเจเนอเรเตอร์ (DC- Techogenerator)

การทดสอบหา Approximated Equivalent Circuit Of Induction Motor

ผลของความเร็วเทียบกับเวลา เมื่อมีการเพิ่มล้อช่วงแรงมีขนาดต่างกัน
ผลการทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์
ผลของกระแสที่ได้จากการทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็วของ
มอเตอร์เหนี่ยวนำ
การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์
การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์

บทที่ 5 สรุปผล

ภาคผนวก

บรรณานุกรม



บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1 บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ (induction motor) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating current machine) โดยอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันแบบไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ 1. สเตเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และ 2. โรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีการหมุนโดยแต่ละส่วนจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่ซึ่งมีแกนเป็นแผ่นลามีเนทประกอบกันซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าซิลิคอน (silicon steel) และมีขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature) ฝังตัวอยู่ในร่องสลิตของแกนเหล็ก โดยขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีการพันขดลวดแบบกระจายเพื่อทำให้เกิดการกระจายสนามแม่เหล็กแบบไซน์ซออยด์ (sinusoidal)

2.1.2 โรเตอร์ (Rotor)

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

2.1.2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้จะมีแข็งแรงทนทานสูงและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบขดลวดพันรอบ (wound rotor) ส่วนประกอบของโรเตอร์จะมีแท่งตัวนำซึ่งมีการต่อลัดวงจรทางด้านหัวและท้ายของแท่งตัวนำแท่งตัวนำดังกล่าวจะฝังตัวอยู่ในเหล็กกล้าซิลิคอน (silicon steel) โดยชนิดของแท่งตัวนำจะเป็นอลูมิเนียมหรือทองแดงขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังของมอเตอร์ ในกรณีมอเตอร์ขนาดเล็กกว่า 250 kW จะใช้อลูมิเนียมเป็นแท่งตัวนำ ถ้าขนาดพิกัดสูงกว่า 250 kW จะใช้ทองแดงเป็นแท่งตัวนำ ลักษณะของสลิตของโรเตอร์มีผลต่อกราฟคุณลักษณะแรงบิดความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1.2.2 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้มีขดลวดพันอยู่ในร่องสลิตเช่นเดียวกับสเตเตอร์ โดยส่วนปลายของขดลวดจะต่ออยู่กับแหวนลื่น (slip ring) และมีแปรงถ่านสัมผัสอยู่โดยแปรงถ่านจะต่ออยู่กับวงจรรายนอกเพื่อทำการต่อวงจรแบบสตาร์ทหรือเตลต้า มอเตอร์ที่มีโรเตอร์ประเภทนี้มีข้อจำกัดคือจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์และไม่สามารถหมุนเร็วมากได้เนื่องจากความแข็งแรงทนทานนอกจากนี้ยังมีราคาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก แต่ข้อดีของโรเตอร์ประเภทนี้คือสามารถกำหนดแรงบิดขณะสตาร์ทได้โดยอาศัยการต่อความต้านทานภายนอก

2.2 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

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

เมื่อมีการป้อนแรงดันให้แก่สเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ช่องว่างอากาศซึ่งสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ดังสมการ

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

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

ในกรณีที่มีการป้อนแรงดันให้แก่สเตเตอร์และทำการล๊อคโรเตอร์ให้อยู่กับที่จะเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในโรเตอร์ตามหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งความถี่ของแรงดันและกระแสทางด้าน โรเตอร์ที่มีค่าเท่ากับทางด้านสเตเตอร์ระดับของแรงดันและกระแสของโรเตอร์จะแปรตามอัตราส่วนรอบ (turn ratio) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ในสภาวะนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีสภาพเหมือนหม้อแปลงที่มีการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ (secondary) แต่ถ้าหากว่ามีการขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ให้หมุนในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่าง โรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุนจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้นจึงไม่เกิดกระแสไหลในมอเตอร์ทำให้ไม่เกิดแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic torque) แต่ถ้าโรเตอร์ หมุนที่ความเร็วใดๆ ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนและมีค่าน้อยกว่าความเร็วซิงโครนัสจะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ซึ่งความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสและความเร็วรอบของโรเตอร์เรียกว่าสลลิป (slip) ในการอธิบายค่าสลลิปจะแสดงอยู่ในรูปสมการของเปอร์เซ็นต์สลลิป (per-unit slip) ดังสมการ

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

โดยที่ ω_s = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (rad/s)
 ω_r = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rad/s)

เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบใดๆ ที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ดังได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์จะมี

ค่าเท่ากับ sf แรงบิดที่เกิดขึ้นในกรณีมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบใดๆ เรียกว่าแรงบิดอะซิงโครนัส (asynchronous torque)

2.3 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนที่มีโรเตอร์เป็นประเภทไม่มีขั้วยื่น ดังนั้น ช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์จึงมีขนาดเท่ากันตลอด (uniform air-gap) การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงมีหลักการเกี่ยวกับการเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดที่โรเตอร์ไม่มีขั้วยื่น

2.3.1 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในสเตเตอร์และโรเตอร์จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวจะเกี่ยวคล้องกันผ่านช่องว่างอากาศระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องระหว่างขดลวดทั้งสองนี้ เรียกว่า ฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (mutual flux) ซึ่งเป็นฟลักซ์แม่เหล็กส่วนมากในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในส่วนของฟลักซ์แม่เหล็กส่วนน้อยที่ไม่ได้ผ่านช่องว่างอากาศแต่จะเกี่ยวคล้องเฉพาะตัวขดลวดที่กำเนิดฟลักซ์นั้น เรียกว่า ฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล (leakage flux) ในส่วนฟลักซ์แม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นจะพิจารณาเฉพาะฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (mutual flux) เท่านั้น ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลจะมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องจักร โดยผลของฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลจะมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปของค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance)

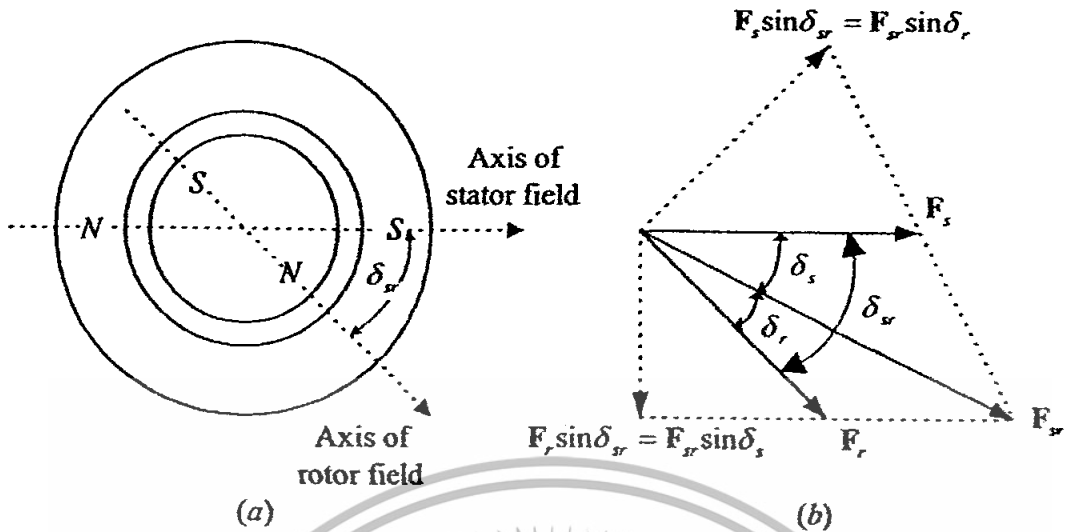
ในการพิจารณาการเกิดแรงบิดจะพิจารณาฟลักซ์ร่วมลัพธ์ (resultant mutual flux) โดยพิจารณาในเทอมของ magnetic coenergy ที่สะสมในช่องว่างอากาศรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์, โรเตอร์และมุม δ_r ระหว่างแกนแม่เหล็กทั้งสอง ซึ่งแรงบิดสามารถคำนวณได้จากการหาอนุพันธ์เชิงซ้อน (partial derivative) ของ coenergy กับมุม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

ในการพิจารณากำหนดให้สนามแม่เหล็กในแนวเส้นสัมผัสมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะสนามแม่เหล็ก H ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่านั้น เมื่อทำการอินทิเกรตเชิงเส้นความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านช่องว่างอากาศจะได้เท่ากับ H_g ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ \mathcal{F}_r

$$H_g = \mathcal{F}_r \quad (2.3)$$

สัญลักษณ์ \mathcal{F}_r แสดงให้เห็นว่าค่า mmf wave เป็นฟังก์ชันของมุมรอบๆ เส้นรอบวงของ สเตเตอร์ เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ F_r เกิดจากผลรวมทางเวกเตอร์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ F_s และโรเตอร์ F_r ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการการรวมกันทางเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$F_r^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_r \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสองขั้วอย่างง่าย (a) แบบจำลองพื้นฐาน (b) โดอะแกรมของเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

ค่า F แทนค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ดังนั้นสนามแม่เหล็กลัพธ์ H มีการกระจายตัวแบบไซน์ซอยด์ ซึ่งค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กลัพธ์หาได้จากสมการ

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

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

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

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

ดังนั้น ค่า coenergy ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

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

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

โดยที่ $D =$ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างอากาศ (m)

$l =$ ความยาวในแนวแกนของช่องว่างอากาศ (m)

$g =$ ระยะช่องว่างอากาศ (m)

จากสมการที่ 2.4 จะได้ค่า coenergy ที่สะสมอยู่ในช่องว่างอากาศในรูปของค่าสูงสุดของขนาดแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการ

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

จากสมการที่ 2.8 สามารถสมการของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยทำการหาอนุพันธ์เชิงซ้อนระหว่าง coenergy และมุมระหว่างแกนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าของสเตเตอร์และโรเตอร์ซึ่งจะได้สมการแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีสองขั้วดังนี้

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

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีจำนวน P ขั้วจะได้สมการแรงบิดอยู่ในรูปแบบ

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

จากรูปที่ 2.1 จะพบว่า $F_r \sin \delta_{sr}$ เป็นส่วนประกอบของ F_r ในแนวตั้งฉากกับ F_s และ $F_s \sin \delta_{sr}$ เป็นส่วนประกอบของ F_s ในแนวตั้งฉากกับ F_r ซึ่งจากสมการที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดแปรผันกับผลคูณเชิงเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.1 จะได้ความสัมพันธ์

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

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

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12 เมื่อทำการแปลงรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์จะได้

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

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

จากสมการที่ 2.10, 2.13 และ 2.14 เป็นการนำเสนอรูปแบบของสมการแรงบิดใน 2 รูปแบบ คือ

1. แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของแต่ละส่วนโดยแยกเป็นส่วนของสเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการที่ 2.10
2. แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์และส่วนของสเตเตอร์หรือ โรเตอร์ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14

จากสมการที่ 2.10, 2.13 และ 2.14 พบว่า ค่าสนามแม่เหล็กจะถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าสูงสุดของรูปคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ถ้ากำหนดให้แกนเหล็กไม่มีการอิ่มตัว จะพบว่าค่าสนามแม่เหล็กสามารถนำเสนอในรูปของค่าสูงสุดของรูปคลื่นของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กหรือฟลักซ์ต่อขั้ว ดังนั้นค่าสูงสุดของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B จะได้จากสมการ $\mu_0 F/g$ เมื่อ F แทนค่าสูงสุดของรูปคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กตั้งนั้นจากสมการที่ 2.14 เมื่อต้องการนำเสนอแรงบิดในรูปของฟลักซ์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กลัพธ์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์จะได้ดังสมการ

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

ในการออกแบบอุปกรณ์ทางด้าน Electromagnetic จะมีข้อจำกัดอยู่ที่การอิ่มตัวของสารแม่เหล็กซึ่งคือสูงสุดของรูปคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กลัพธ์ B_r มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.0 T เพื่อให้เกิดความสะดวกในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าตั้งนั้นจึงสามารถแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของ ฟลักซ์แม่เหล็กลัพธ์โดย

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

ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นสัญญาณแบบไซน์ชอยด์ในครึ่งลูกคลื่นมีค่าที่เท่ากับ $\frac{2}{\pi}$ คูณ
ค่าสูงสุดของรูปคลื่นดังสมการ

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

ค่า B แทนค่าสูงสุดของรูปคลื่นของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังนั้นผลลัพธ์ของ
สมการ ที่ 2.15 คือ

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

โดยที่ Φ_{sr} = ฟลักซ์แม่เหล็กพัลส์ซึ่งสร้างโดยสเตเตอร์และโรเตอร์
 δ_r = มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็ก
พัลส์

2.3.2 การเกิดแรงบิดในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

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

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

โดยที่ K = ค่าคงที่

2.4 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปแบบหนึ่งในการพิจารณารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กคือการพิจารณาจากวงจรสมมูลย์ โดยพิจารณาวงจรสมมูลย์โดยพิจารณาให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้รับการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟสสมดุล ในการพิจารณาวงจรสมมูลย์นั้นจะทำการ

พิจารณาแยกเป็นเฟสไปโดยกำหนดให้มีการต่อวงจรของมอเตอร์เป็นแบบ Y และแรงดันที่ปรากฏที่ขั้วของวงจรสมมูลย์เป็นแรงดันเฟส ส่วนกระแสเป็นกระแสไลน์ ลักษณะของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเหมือนกับหม้อแปลงโดยเริ่มพิจารณาจากทางด้านสเตเตอร์ ก่อนซึ่งสมการซึ่งอธิบายวงจรสมมูลย์ทางด้านสเตเตอร์เป็นดังนี้

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

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

ฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศถูกสร้างจากผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และ โรเตอร์ ซึ่งจากรูปที่ 2.4 กระแสสเตเตอร์ I_1 สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน โดยส่วนแรก คือส่วนประกอบทางด้านภาระ (load component) I_2 ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อนำสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ และส่วนที่สอง คือ ส่วนประกอบทางด้านกระตุ้นหรือ กระแสกระตุ้น (exciting component) I_c ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศและเป็นฟังก์ชันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_1 กระแสกระตุ้นจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกอยู่ในรูปการสูญเสียที่แกนเหล็ก (core loss component) I_c ซึ่งจะล่าหลัง E_1 อยู่ 90 องศา ซึ่งในวงจรสมมูลย์จะแสดงการสูญเสียในแกนเหล็กในรูปของ R_c ต่อขนานอยู่กับส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กในรูปของ X_m ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะต่ออยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1

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

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

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

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

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

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

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

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



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ทางด้านโรเตอร์

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

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

จากสมการที่ 2.24 จะได้ค่า reactance มีค่าแปรผันกับค่าสลิปของมอเตอร์โดยที่ X_2 เป็นค่า reactance ที่ความถี่เดียวกับสเตเตอร์ เมื่อมองโรเตอร์จากรอบอ้างอิงของโรเตอร์ (Rotor reference frame) จะได้วงจรสมมูลย์ดังแสดงในรูปที่ 2.5

เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรต่างๆ ของโรเตอร์โดยมองจากรอบอ้างอิงของสเตเตอร์ (stator reference frame) พบว่าเมื่อมองจากด้านสเตเตอร์จะพบว่ารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส โดยฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ E_1 และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ E_{2s} ซึ่งหากว่าไม่มีผลจากความเร็วของโรเตอร์ (โรเตอร์หยุดนิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสเตเตอร์) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์จะเท่ากับที่สเตเตอร์ แต่เนื่องจากโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วใดๆ ทำให้มีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์เท่ากับ s ซึ่งส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์มีความสัมพันธ์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ดังสมการที่ 2.25

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

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

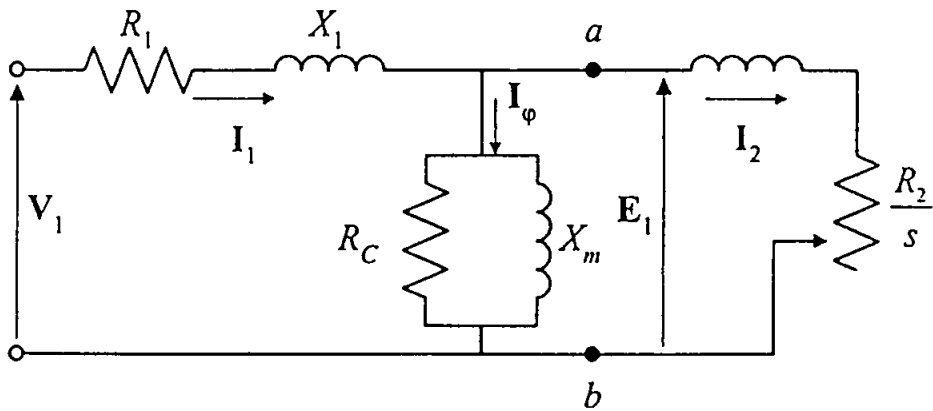
$$I_{2s} = I_2 \quad (2.26)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.25 หาดด้วยสมการที่ 2.26 จะได้

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

เมื่อนำผลของความเร็วยุโรปของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ามาพิจารณาร่วมกับสมการที่ 2.24 และ สมการที่ 2.27 จะได้ความสัมพันธ์

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



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อนำค่าสลิปหารทั้งสองข้างของสมการที่ 2.28 จะได้

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

เป็นการพิจารณาองค์ประกอบของโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์

เมื่อพิจารณาทางกายภาพพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์ซึ่งมีความถี่ sf โดยมีทิศทางไปทางเดียวกับโรเตอร์ซึ่งมีความถี่เท่ากับดิ่งนั้น $(1-s)f$ แต่เมื่อมองจากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์พบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่โรเตอร์ที่มีความเร็วเท่ากับ sf แต่เมื่อพิจารณาจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์จะพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์จะมีความถี่เท่ากับความถี่ซิงโครนัสนั่นเอง (synchronous frequency) เมื่อพิจารณาในรูปของวงจรสมมูลย์จะได้รูปที่ 2.3

2.5 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ภายหลังจากได้วงจรสมมูลย์แล้วสามารถนำวงจรสมมูลย์มาคำนวณหาสมรรถนะและคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำอันได้แก่ กำลังไฟฟ้า, แรงบิด เป็นต้น

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

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

ค่า q_1 แทนจำนวนเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากสมการที่ 2.30 กำลังไฟฟ้าที่ได้เป็นกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศโดยกำลังไฟฟ้างกล่าวสามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นการสูญเสียที่สเตเตอร์ในรูปของความร้อนดังสมการที่ 2.30

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

อีกส่วนคือส่วนที่แปลงรูปพลังงานมาเป็นพลังงานกลดังสมการ

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

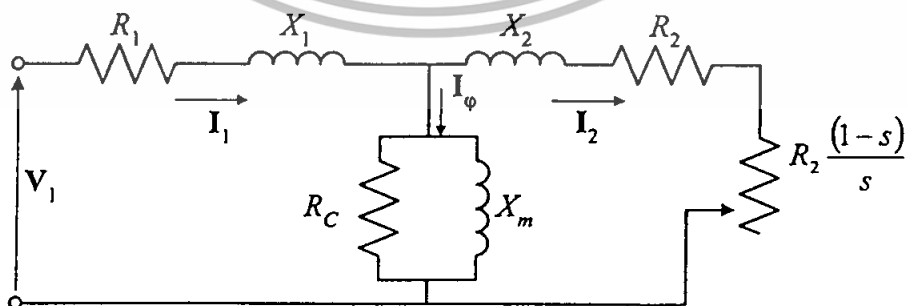
จากสมการที่ 2.32 สามารถเขียนให้อยู่ที่กระทัดรัดขึ้นได้

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

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของ P_{g1} ดังสมการที่ 2.34

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

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



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลย์ในอีกรูปแบบหนึ่ง

ค่า electromagnetic torque T_e เป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ ซึ่งผลคูณระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ความเร็วซิงโครนัส ω_s จะได้กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงอยู่ในสมการที่ 2.35

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

เมื่อนำสมการที่ 2.33 มาพิจารณาร่วมกับสมการที่ 2.35 จะได้สมการแรงบิดดังสมการ

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

ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ 3 เฟส ค่า q_1 จะมีค่าเท่ากับ 3 ดังนั้นสมการที่ 2.36 จะกลายเป็น

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

ในส่วน of ค่าความเร็วซิงโครนัส ω_s สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดยที่ p = จำนวนขั้วของมอเตอร์

f = ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า

ค่าแรงบิดที่ได้สมการ 2.37 เป็นค่าแรงบิดภายในมอเตอร์เท่านั้นซึ่งยังไม่เป็นค่าแรงบิดที่ใช้ ขับภาระต่างๆ ซึ่งต้องนำค่าความสูญเสียทางกลเนื่องจากความเสียดทานและแรงต้านของลมและค่า stray load losses ออกเสียก่อน จึงจะได้ค่าแรงบิดที่เพลลาที่ใช้ขับภาระจริงๆ

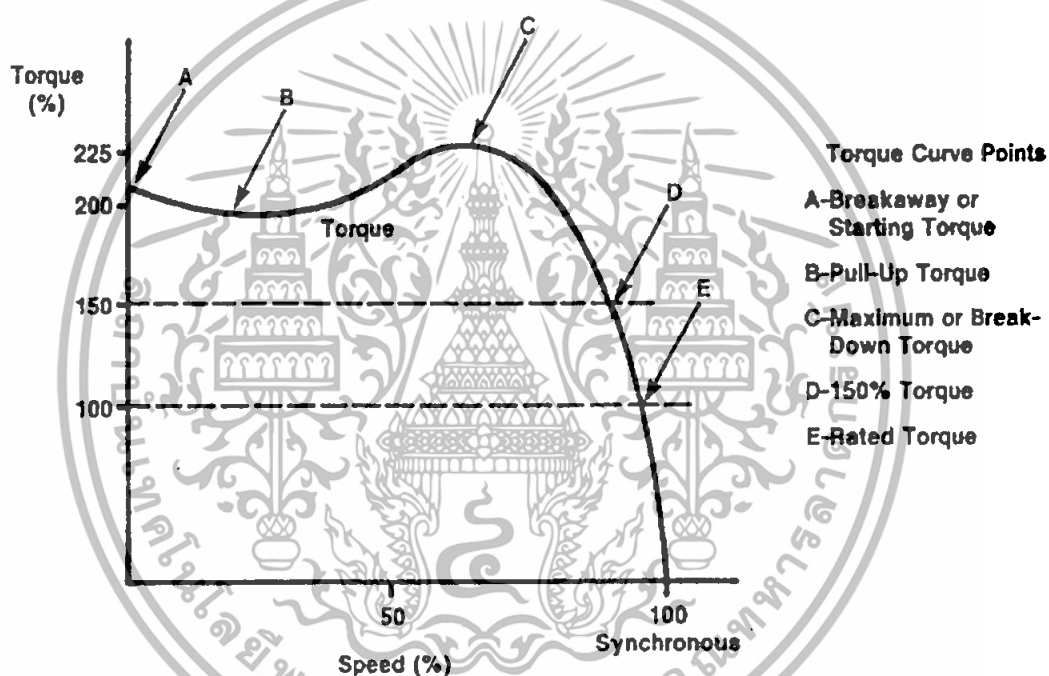
บทที่ 3

วิธีการหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 บทนำ

กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ ณ ความเร็วใดๆ จากศูนย์ถึงความเร็วซิงโครนัส วิธีการหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีหลายวิธี แต่ในการทดสอบหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำกำหนดมาตรฐานไว้หลายมาตรฐาน ในส่วนการนำเสนอเป็นวิธี IEEE standard 112-2004 [1]

3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.1 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะนำมาตัดสินใจเลือกใช้มอเตอร์ได้

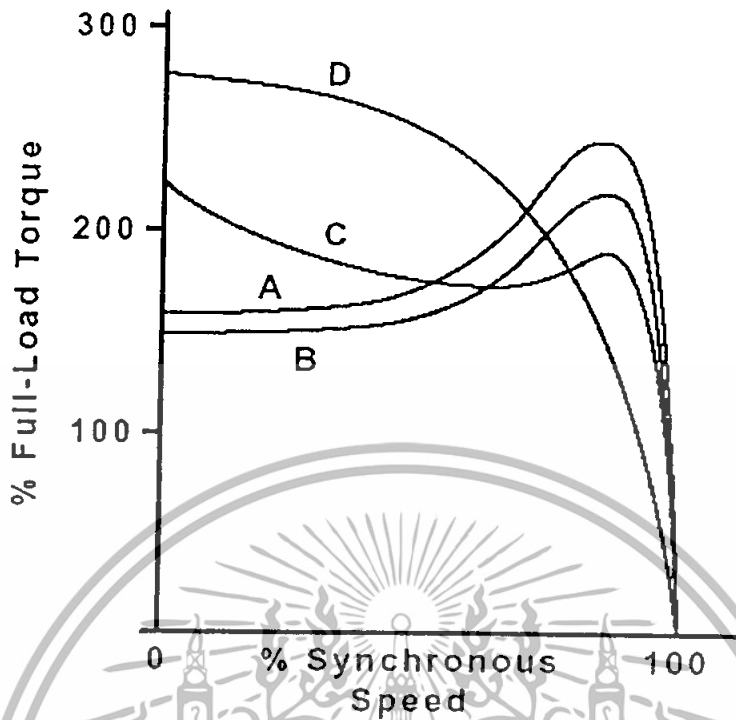
จากรูป

จุด A เป็นค่าแรงบิดขณะที่ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับศูนย์หรือขณะสตาร์ทมอเตอร์

จุด B เป็นแรงบิดขณะที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากสภาวะหยุดนิ่งถึงความเร็วที่ให้แรงบิดสูงสุด

จุด C เป็นค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์

จุด E เป็นค่าแรงบิดพิกัดของมอเตอร์



รูปที่ 3.2 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการออกแบบที่แตกต่าง กันตามมาตรฐานของ NEMA

จากรูปแสดงให้เห็นถึงกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการออกแบบที่แตกต่างกันตามมาตรฐานของ NEMA ดังมีรายละเอียดดังนี้

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

3.3 การหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีมาตรฐานในการทดสอบไว้ 4 วิธีได้แก่

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

วิธีที่ 1,4 นั้นต้องรักษาระดับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ก่อนที่จะบันทึกข้อมูล ในวิธีที่ 3 นั้นเป็นการทดสอบในกรณีที่ไม่สามารถปลดภาระออกจากเพลลาของมอเตอร์ได้ซึ่งทำให้ค่าแรงบิดที่คำนวณได้นั้นไม่ครบตลอดย่านความเร็วรอบของมอเตอร์เพราะความเร็วสูงสุดจะหยุดที่ความเร็วพิกัดเท่านั้น ดังนั้นรายงานนี้จึงนำเสนอวิธีที่ 2 เพราะใช้เวลาทดสอบสั้นและให้ข้อมูลได้ตลอดย่านความเร็ว

3.4 การหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็ว

การหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็วกระทำโดยการสตาร์ทมอเตอร์ด้วยวิธีสตาร์ทตรง โดยมอเตอร์อยู่ในสภาวะไร้ภาระ จากนั้นบันทึกข้อมูลแรงดัน,กระแส,ความเร็วรอบ และเวลาที่มอเตอร์เร่งความเร็ว การหาคคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเร่งความเร็วนี้ต้องอาศัยเวลาในการเร่งความเร็วที่นานพอที่จะทำให้ผลกระทบของทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าจากเครื่องมือวัดและจากตัวมอเตอร์เองเพราะจะส่งผลกระทบต่อข้อมูลได้ ดังนั้นต้องกำจัดผลกระทบโดยการคัปปลิงล้อช่วยแรงเข้ากับเพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือลดแรงดันป้อนเข้า

การหาแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์หาจาก

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

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

จากสมการที่ 3.1 จัดสมการที่ใช้กันทั่วไปเป็น

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

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

3.4.1 สมการแรงบิดมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะdynamic

เมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะdynamic สมการแรงบิดจะเป็นดังนี้

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

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

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

โดยที่ T_m = แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)

T_L = แรงบิดของภาระ (N-m)

T_c = แรงบิดเนื่องจาก coulomb friction (N-m)

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

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

J_m = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (kg/m^2)

ω_r = ขนาดของความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (rad/s)

3.4.2 เทคนิคในการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ดังที่กล่าวไว้ ต้องมีการเพิ่มเวลาในการเร่งความเร็วโดยมีสมการดังนี้

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

โดยที่ t = เวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วของมอเตอร์จาก

เนื่องจากการทดสอบการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยวิธีเร่งความเร็วทดสอบในภาวะ no-load และค่า T_c และ $F\omega_r^2$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ แรงบิดอื่น ๆ ดังนั้นสมการที่ 3.3 จะกลายเป็น

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

จากสมการที่ 3.6 เมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นทำให้เวลาการเร่งความเร็วของมอเตอร์สูงขึ้นซึ่งเมื่อทำการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขนาด J_1 ให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้วสมการแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นดังนี้

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

3.4.3 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.3 รูปทรงของล้อช่วยแรงที่ใช้เพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

จากรูป สมการที่ใช้คำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงแสดงดังสมการ

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

โดยที่ ρ = ความหนาแน่นของเนื้อสารที่ใช้ทำล้อช่วยแรง (kg/m^3)

r_1, r_2 = รัศมีภายในและภายนอกของล้อช่วยแรง (m)

l = ความหนาแน่นของล้อช่วยแรง (m)

3.5 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด

วิธีการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำได้โดยใช้ล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่าหนึ่งมาทำการคับปลิงเข้ากับเพลลาของมอเตอร์และวิธีการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดสามารถคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบด้วยวิธีหน่วงความเร็ว ซึ่งสามารถหาสมการแรงบิดในช่วงที่มอเตอร์ลดความเร็วลงดังนี้

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

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

จากสมการที่ 3.10 และ 3.11 เมื่อทำการแก้สมการอนุพันธ์จะได้ผลเฉลยของสมการในรูปแบบ

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

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

โดยที่ $\omega_0 =$ ค่าความเร็วในการหน่วงความเร็ว (rad/s)

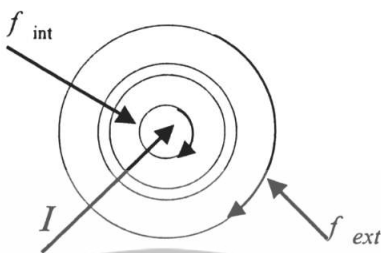
จากสมการที่ 3.10 และ 3.11 นำสมการทั้งสองมาทำการหาผลลัพท์ของสมการสองตัวแปรคือค่า J_m และค่า D โดยจัดรูปให้อยู่ในรูปเมตริกดังนี้

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

ในการคำนวณสมการที่ 3.14 ให้คำนวณที่ความเร็วพิกัด

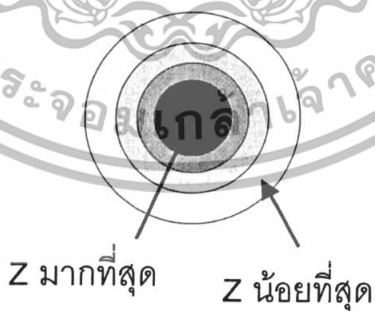
3.6 ปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect)

เมื่อมีกระแสไหลในตัวนำจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเกิดทั้งภายใน (internal) และภายนอกตัวนำ (external)



รูปที่ 3.4 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กภายใน(internal) และภายนอกตัวนำ (external)

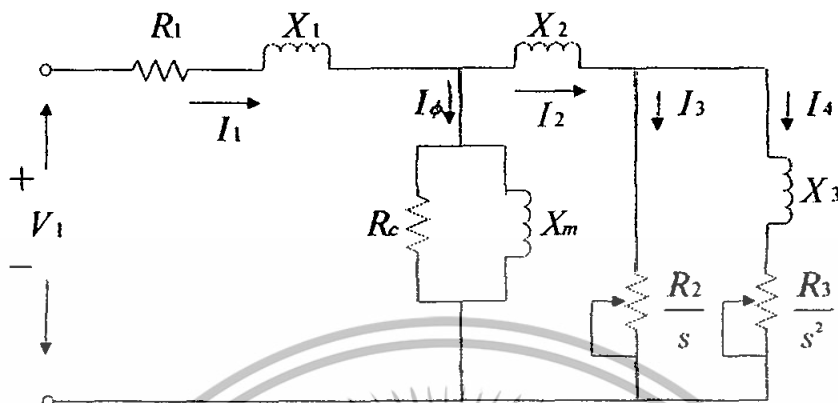
กล่าวคือถ้ากำหนดหัวแม่มือชี้ทิศทางของกระแส นิ้วที่เหลือทั้งสี่กำรอบตัวนำจะชี้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก การเกิดขึ้นของเส้นแรงแม่เหล็กทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำขึ้นมาที่จุดศูนย์กลางของตัวนำจะมีเส้นแรงแม่เหล็กมากที่สุด ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของตัวนำ ทำให้ที่จุดศูนย์กลางของตัวนำเกิดอิมพีแดนซ์สูงสุดและจะค่อยๆ ลดลงที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางออกไป จากกรณีดังกล่าวนี้ทำให้กระแสที่จุดศูนย์กลางของตัวนำมีค่าน้อยที่สุดและค่อยๆ เพิ่มขึ้นไปตามแนวรัศมีและเนื่องจากอิมพีแดนซ์ขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นหาความถี่สูงค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจะมากขึ้นด้วยทำให้กระแสจะอยู่เฉพาะผิวตัวนำมากขึ้น



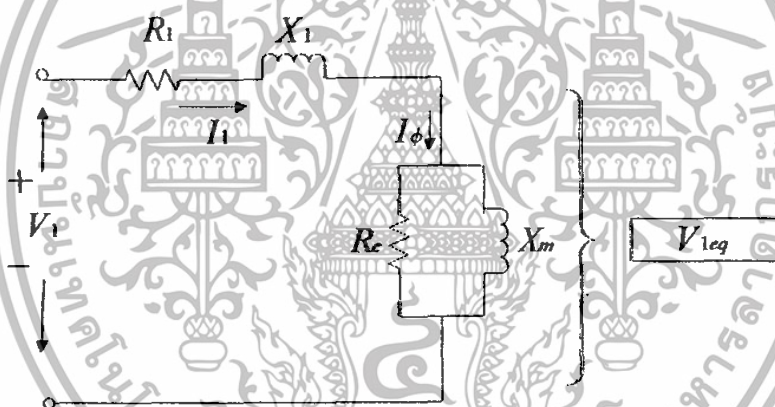
รูปที่ 3.5 แสดงอิมพีแดนซ์ภายในตัวนำ

3.7 การหาแรงบิดโดยใช้วงจรเทวินิน (Thevenin's theorem)

การหาแรงบิดโดยใช้วงจรเทวินินเพื่อหาสมการแรงบิดที่เกิดจากส่วนที่เพิ่มขึ้นมาของพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์



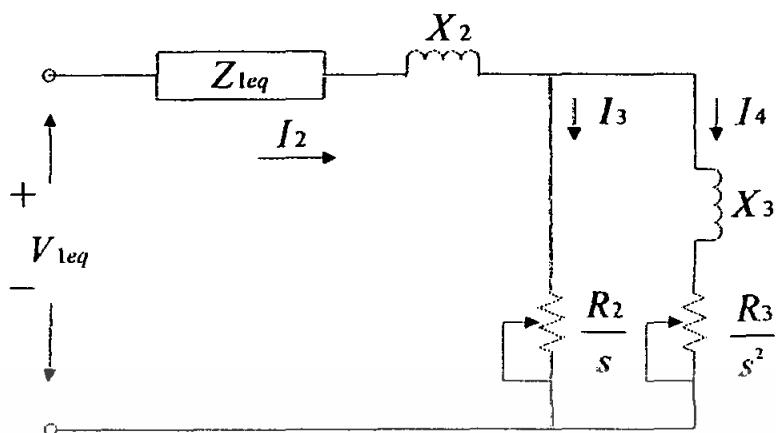
รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีค่าพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นมา



รูปที่ 3.7 การยุบวงจรเทวินินขั้นที่ 1

$$\hat{V}_{1eq} = \hat{V}_1 \left(\frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right) \quad (3.15)$$

$$Z_{1eq} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (3.16)$$



รูปที่ 3.8 ผลการยุบวงจรเทวินินขั้นที่ 1

$$\hat{V}_{2eq} = \hat{V}_{1eq} \left[\frac{\frac{R_2}{s}}{(Z_{1eq} + R_2 + jX_2)} \right] \quad (3.17)$$

$$Z_{2eq} = \frac{(Z_{1eq} + jX_2)(jX_2 + \frac{R_2}{s})}{Z_{1eq} + jX_2 + \frac{R_2}{s}} \quad (3.18)$$



รูปที่ 3.9 การยุบวงจรเทวินินขั้นที่ 2

$$I_4 = \frac{V_{2eq}}{Z_{2eq} + jX_3 + \frac{R_3}{s^2}} \quad (3.19)$$

$$T_{mech} = \frac{3I_4^2 \frac{R_3}{s^2}}{\omega} \quad (3.20)$$

โดยสมการแรงบิดที่ได้เป็นสมการแรงบิดของพารามิเตอร์ส่วนที่เพิ่มขึ้นมา คือเป็นแรงบิดที่เกิดจากค่า R_3 และ X_3 นำสมการที่ได้ไปหาแรงบิดแล้วเปรียบเทียบกับแรงบิดที่เกิดจากผลต่างสมการแรงบิดความเร็วรอบจากการทดสอบโดยวิธีเร่งความเร็วกับการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB



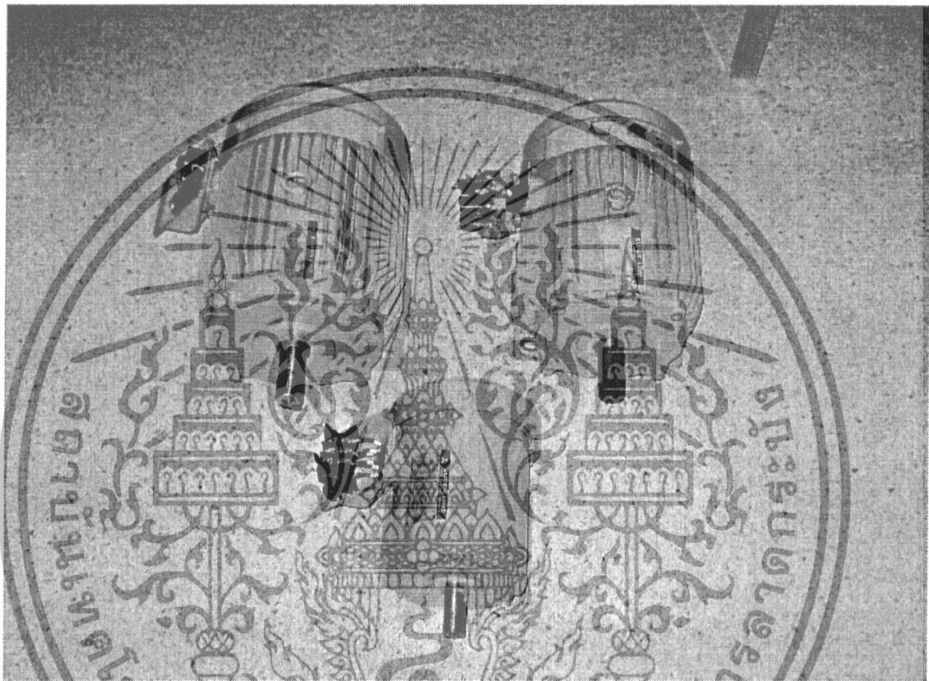
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

โดยการทดสอบจะใช้มอเตอร์ทั้งหมด 3 ขนาด คือ 1,3,5 แรงม้าดังแสดงในรูป 4.1



รูปที่ 4.1 มอเตอร์ขนาด 1,3 และ 5 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ

โดยมอเตอร์ทั้ง 3 ขนาดนี้จะมีขนาดพิกัด แรงดัน, กระแส, ความเร็วรอบและแรงบิด ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พิกัดต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ

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

4.1.2 DC-Techogenerator

เป็นเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงประเภทหนึ่งโดย DC- Techogenerator ที่นำมาใช้ทดสอบเป็นประเภทที่มีแปรงถ่านโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความเร็วรอบของมันแสดงดังสมการที่

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

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

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



รูปที่ 4.2 DC-Techogenerator ที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.3 ล้อช่วยแรง(Fly wheel)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยต่างๆ กัน มีขนาดดังต่อไปนี้ แสดงได้ดังรูป 4.3

ตารางที่ 4.2 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและมวลของล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ

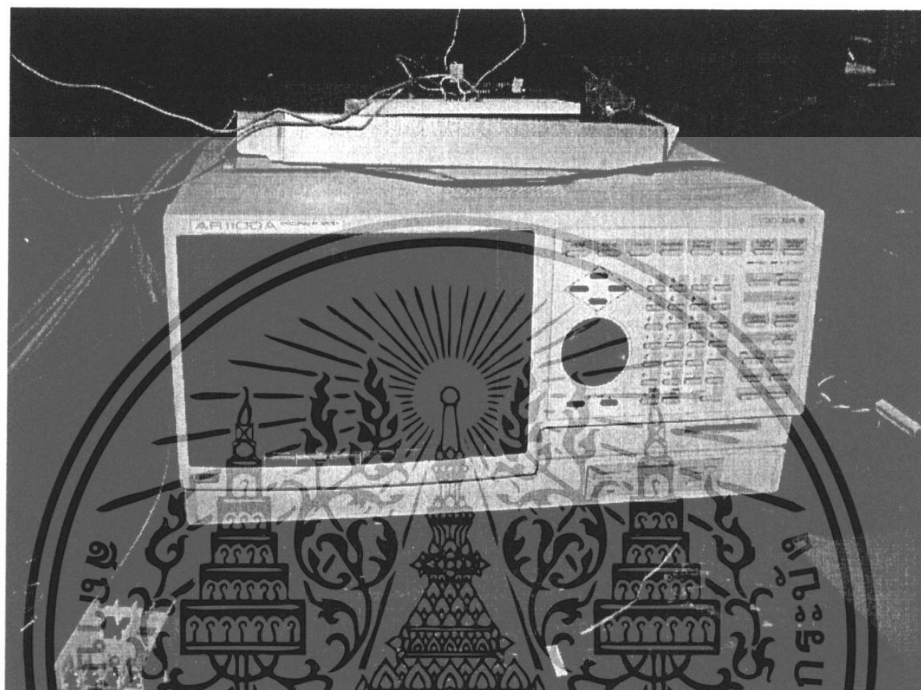
ค่าโมเมนต์ความ เฉื่อย	ขนาดเส้นผ่าน	มวล
ของล้อช่วยแรง (Kg-m ²)	ศูนย์กลาง cm	kg
0.301	0.4018	24.7
0.9501	0.4778	35.1
1.477	0.5288	43.5



รูปที่ 4.3 ล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบ

4.14 Analyzing Recorder

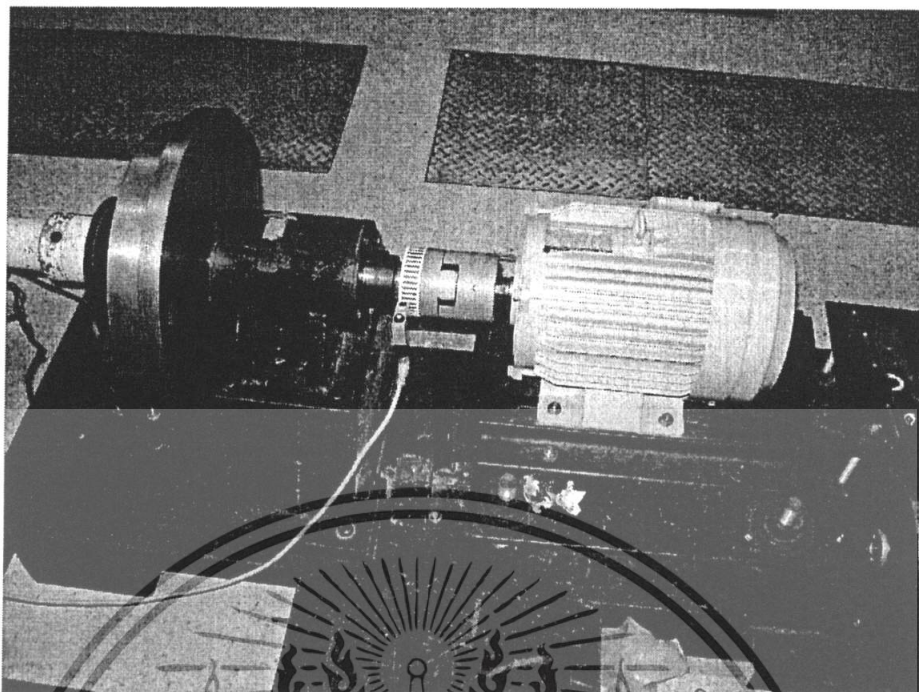
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้บันทึกข้อมูลแรงดัน กระแส ความเร็วรอบ และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ แต่ละครั้งรูปแบบของ analysis recorder แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 Analyzing Recorder

4.1.5 แท่นสำหรับทดสอบมอเตอร์

เนื่องจากการทดสอบมอเตอร์ด้วยวิธีเร่งความเร็วรอบโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย มีโอกาสเกิดอันตรายสูง และการใช้ล้อช่วยแรงมากับปลั๊กกับเพลลาของ มอเตอร์โดยตรง เป็นไปได้ยาก ดังนั้นต้องมีแท่นทดสอบเพื่อใช้เป็นจุดติดตั้งมอเตอร์ และชุดเพลลาที่ใช้สำหรับติดตั้งล้อช่วยแรง โดยปลายของชุดเพลลานั้นจะค้ำปลั๊กอยู่กับมอเตอร์เหนี่ยววน่าและ DC-Techogenerator ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แทนสำหรับทดสอบมอเตอร์

4.2 วิธีการทดสอบ

4.2.1 การทดสอบการวัดความเร็ว โดยใช้เทคโคเจนเนอเรเตอร์ (DC-Techogenerator)

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

4.2.2 การทดสอบหา Approximated Equivalent Circuit Of Induction Motor

No-load test จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่อยู่ในสภาวะไร้ภาระจะทำให้ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความเร็วในการหมุนใกล้เคียงกับ Synchronous speed (N_s) กำลังป้อนเข้ามอเตอร์จะสูญเสียใน

- Core Loss (P_c)
- Stator Copper Loss เนื่องจากกระแสกระตุ้น
- Mechanical Loss

ซึ่งเรียกรวมว่าเป็น Fix Loss ข้อมูลที่ได้จาก No-Load Test คือ P_0 , V_0 , I_0 เป็นค่าต่อเฟส

$$\theta = \cos^{-1}(P_0 / (V_0 \times I_0))$$

$$I_\phi = I_0$$

$$I_m = I_0 \sin \phi_0$$

$$I_c = I_0 \cos \phi_0$$

$$R_c = \frac{V_0}{I_c}$$

$$X_m = \frac{V_0}{I_m}$$

Block-rotor test ทำได้โดยการยึดตัวหมุนของ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้หยุดอยู่กับที่ แล้วค่อยๆปรับศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าจนกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นค่าพิกัด (Rated Current)

ข้อมูลที่ได้จาก Block-rotor test คือ P_b , V_b , I_b เป็นค่าต่อเฟส

กำหนดให้

$$R_b = R_1 + R_2$$

$$X_b = X_1 + X_2$$

$$R_b = \frac{P_b}{I_b^2} \quad ; \quad Z_b = \frac{V_b}{I_b} \quad ; \quad X_b = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2}$$

จากการทำ Block-rotor test ได้ค่าความต้านทานออกมาเป็นค่ารวมคือ $R_1 + R_2$ ซึ่งมีความจำเป็นต้องการหา R_2 เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า Output power และ Electromagnetic torque

ดังนั้นในกรณีที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีตัวหมุนเป็นแบบกรงกระรอก ไม่สามารถหาค่า R_2 ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยการลดความถี่ที่ใช้ในการทดสอบซึ่งจะได้ Approximated Equivalent Circuit ออกมา

4.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบด้วยวิธีห้วงความเร็วจะได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของระบบทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของระบบทดสอบที่ได้จากการทดสอบห้วงความเร็ว [3]

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

เมื่อแทนด้วยสมการ

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

J_{ext} = ค่า J จากโมเมนต์ความเฉื่อยภายนอกคิดจากล้อช่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบจะได้แรงบิดจากการทดสอบโดยวิธีเร่งความเร็ว

ตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัด 1, 3, 5 HP

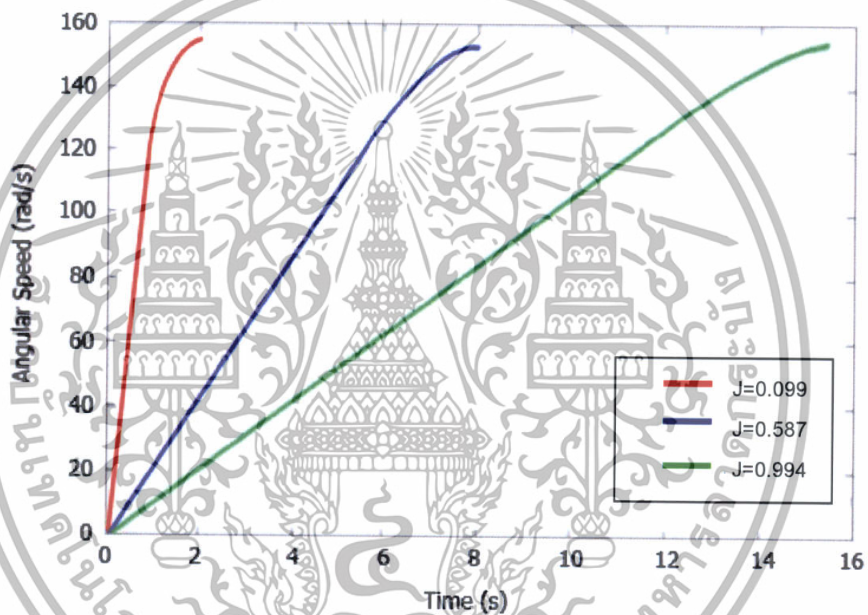
พารามิเตอร์(ohm)	1HP	3HP	5HP
R_1	8.688	3.155	1.594
R_2	8.848	2.755	2.106
X_1	9.47	3.7577	1.74
X_2	9.47	3.7577	1.74
X_m	208.55	87.495	59.3

โดยที่

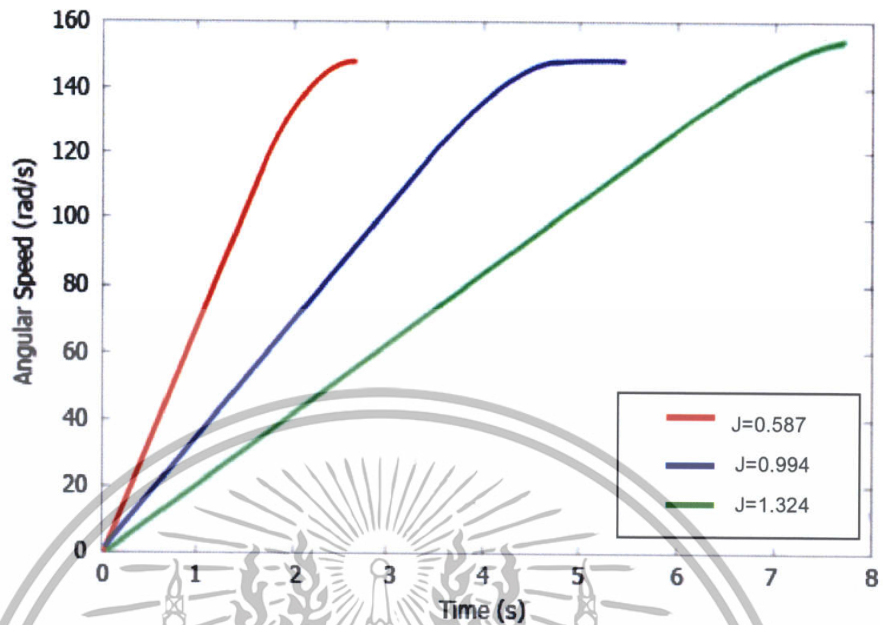
- R_1 ได้จาก V-I Method test
- R_2, X_1, X_2 ได้จาก Block Rotor test
- X_m ได้จาก No-Load test

4.3.1 กราฟผลของความเร็วยกกับเวลาเมื่อมีการเพิ่มล่อช่วงแรงมีขนาดต่างกัน

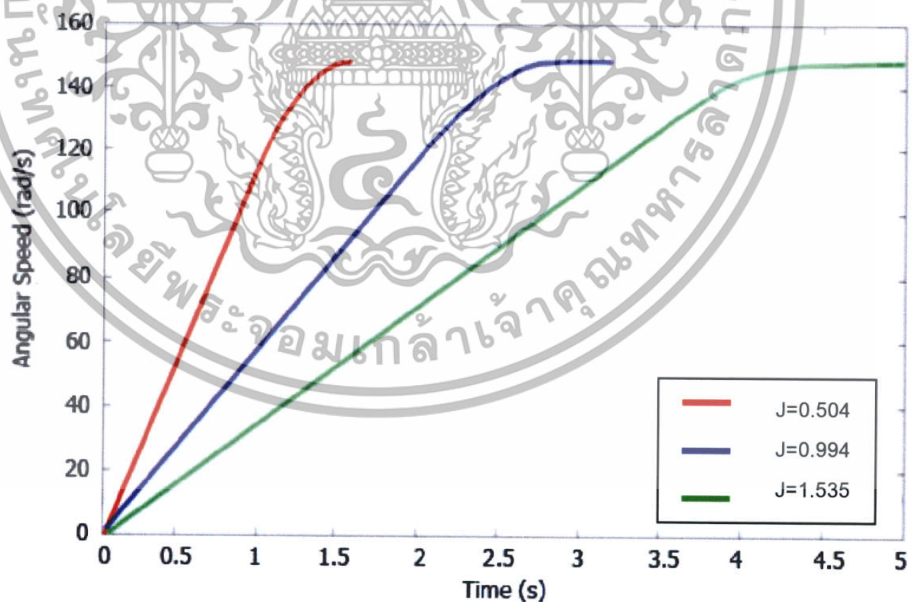
จากการทดสอบโดยการเดินเครื่องมอเตอร์ในสภาวะไร้ภาระจนกระทั่งความเร็วคงที่ แล้วทำการบันทึกความเร็วของมอเตอร์ในช่วงที่มีการเร่งความเร็ว



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลาของมอเตอร์
เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ทดสอบกับล่อช่วงแรงขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วงแรงขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ที่ทดสอบกับล้อช่วงแรงขนาดต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดของล้อช่วยแรงจะทำให้ช่วงเวลาในการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลง โดยถ้าใช้ล้อช่วยแรงที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยมากจะทำให้ช่วงเวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำยาวนานขึ้น

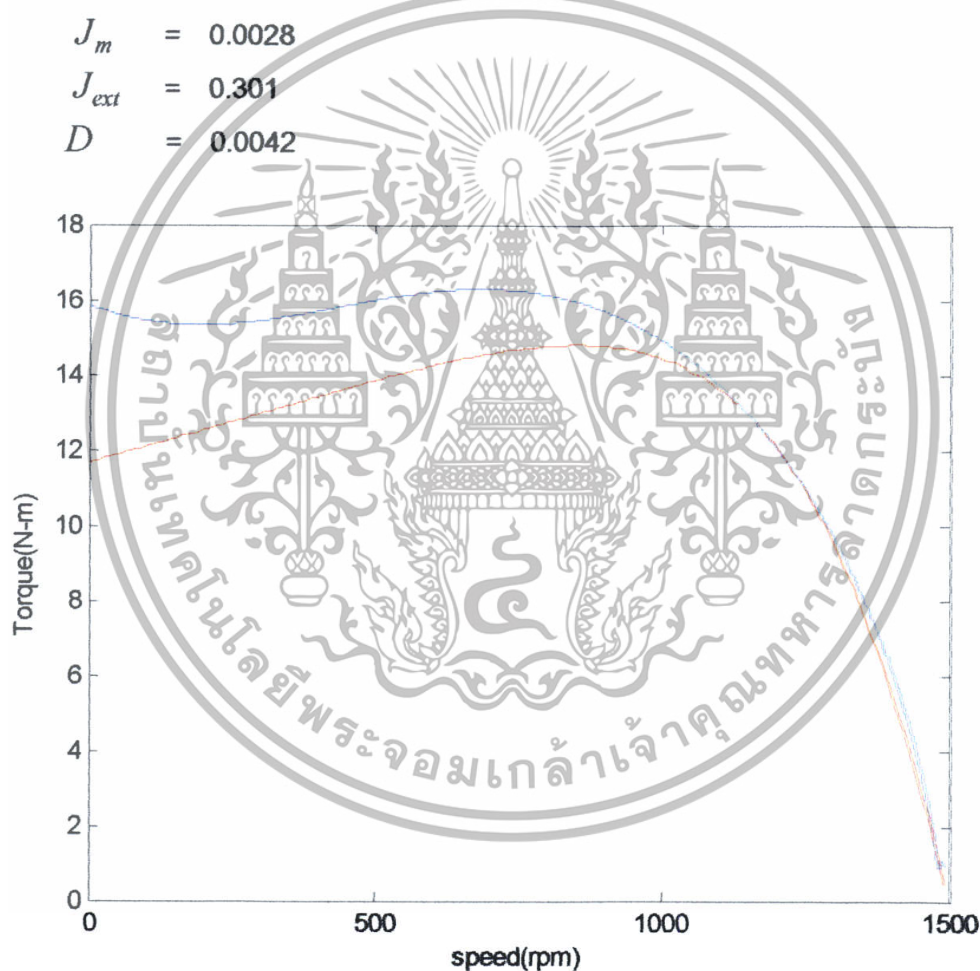
4.4 การทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็ว

4.4.1 ผลการทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์ 1 แรงม้า

จากค่าพารามิเตอร์ความเร็วที่ได้จากการทดสอบนำมาแทนค่าในสมการที่ 3.8 และ

ค่าพารามิเตอร์ R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , X_m นำมาแทนค่าในสมการ $Torque = \frac{3I^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\omega}$ โดยใช้

โปรแกรม MATLAB จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 4.3 จะได้อ่า



- กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการทดสอบโดยวิธีเร่งความเร็ว
- กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์

รูปที่ 4.9 กราฟจากสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการทดสอบเปรียบเทียบกับ กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า

4.4.2 ผลการทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์ 3 แรงม้า

จากค่าพารามิเตอร์ความเร็วที่ได้จากการทดสอบนำมาแทนค่าในสมการที่ 3.8 และ

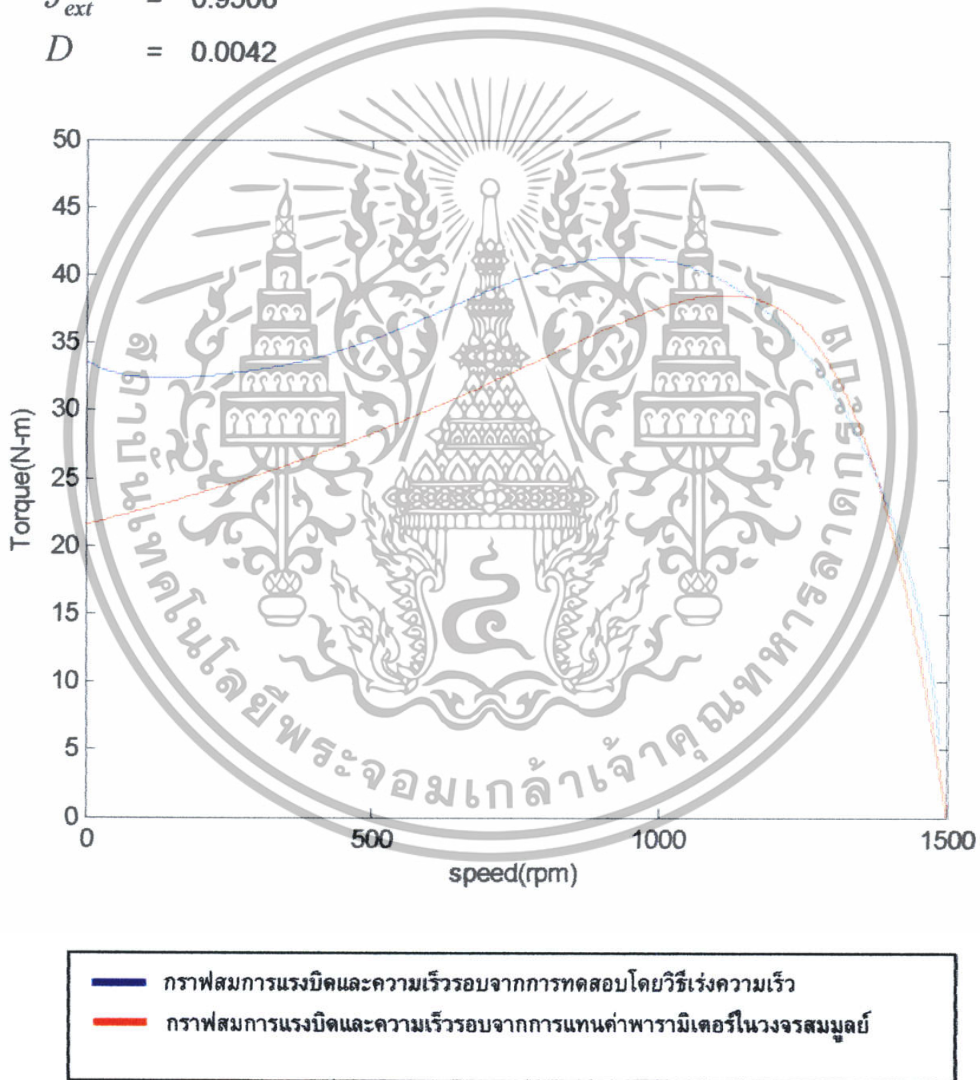
ค่าพารามิเตอร์ R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , X_m นำมาแทนค่าในสมการ $Torque = \frac{3I^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\omega}$ โดยใช้

โปรแกรม MATLAB จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 4.3 จะได้ค่า

$$J_m = 0.0056$$

$$J_{ext} = 0.9506$$

$$D = 0.0042$$



รูปที่ 4.10 กราฟจากสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการทดสอบเปรียบเทียบกับ กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า

4.4.3 ผลการทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์ 5 แรงม้า

จากค่าพารามิเตอร์ความเร็วที่ได้จากการทดสอบนำมาแทนค่าในสมการที่ 3.8 และ

ค่าพารามิเตอร์ R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , X_m นำมาแทนค่าในสมการ $Torque = \frac{3I^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\omega}$ โดยใช้

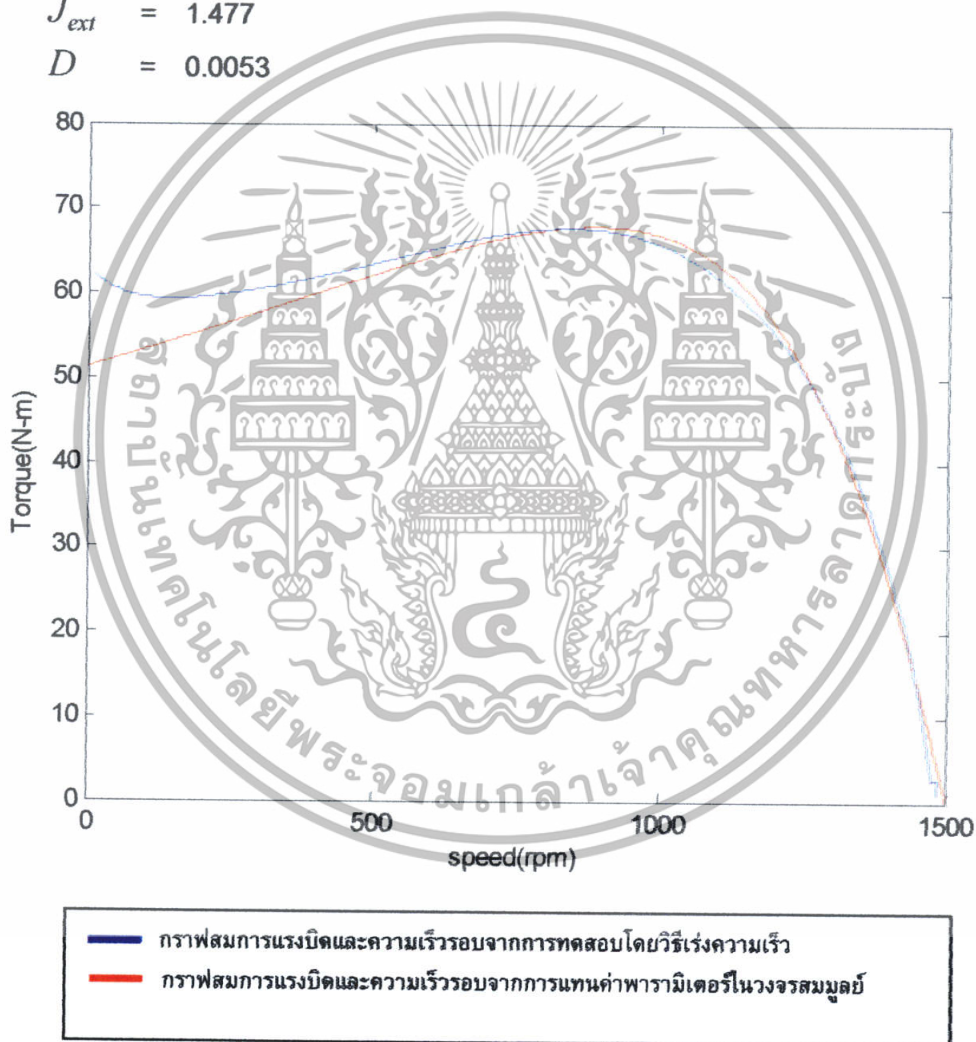
โปรแกรม MATLAB จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบที่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.3 จะได้ค่า

$$J_m = 0.0101$$

$$J_{ext} = 1.477$$

$$D = 0.0053$$



รูปที่ 4.11 กราฟจากสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการทดสอบเปรียบเทียบกับกราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า

จากผลการทดสอบผลการทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์ และนำมาแทนค่าในสมการ จะพบว่าแรงบิดจากการทดสอบโดยวิธีเร่งความเร็วจะมีค่ามากกว่าแรงบิดที่ได้จากการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมุติ ทำให้ทราบได้ว่าวงจรสมมุติแบบเดิมน่าจะมีพารามิเตอร์ตัวใหม่เพิ่มขึ้นมา

4.5 ผลของกระแสที่ได้จากการทดสอบหา Torque โดยวิธีเร่งความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เนื่องจากกราฟแรงบิดที่ได้จากการทดลองกับกราฟแรงบิดที่ได้จากวงจรสมมุติต่างสิ่งทีคิดว่าน่าจะเป็นสาเหตุคือ

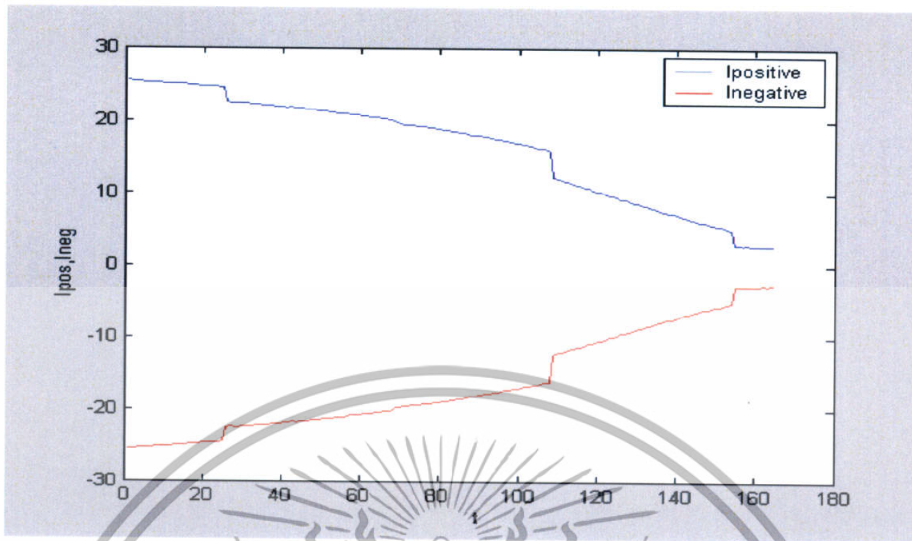
- 1 Electrical Transient
- 2 ผลของ Deep Bar

4.5.1 กระแสสมมาตรของมอเตอร์ 1 แรงม้า



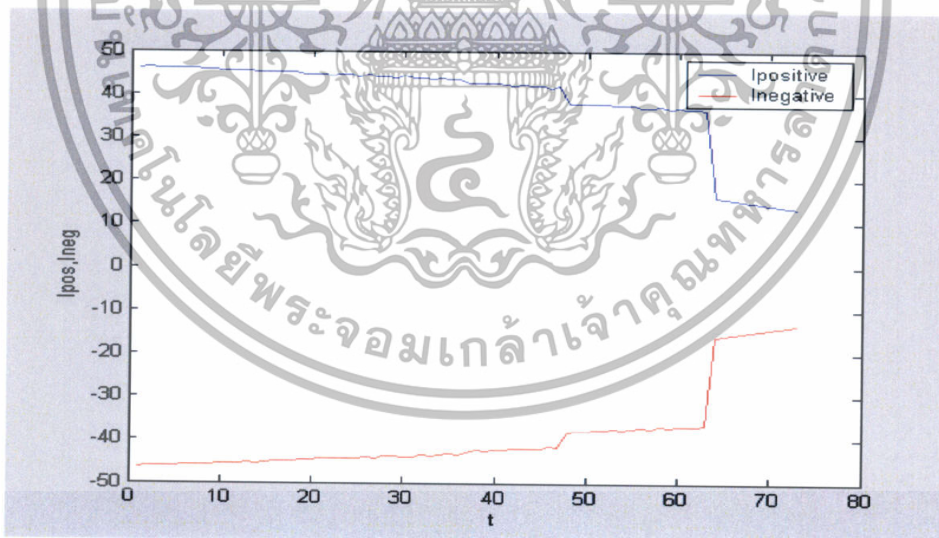
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงกระแสสมมาตรกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า

4.5.2 กระแสสมมาตรของมอเตอร์ 3 แรงม้า



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงกระแสสมมาตรกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า

4.5.3 กระแสสมมาตรของมอเตอร์ 5 แรงม้า



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงกระแสสมมาตรกับเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า

จากรูปที่ 4.12 รูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดที่ได้จากการทดลอง ไม่ได้มีผลของกระแสทรานเซียนต์ เพราะว่ากระแสทางด้านบวกและลบสมมาตรกัน เนื่องจากการสตาร์ทมอเตอร์โดยวิธีการกลับทางหมุนของมอเตอร์ก่อนแล้วเริ่มทำการบันทึกค่ากระแส แรงดัน และความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนไปข้างหน้า

4.6 การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์

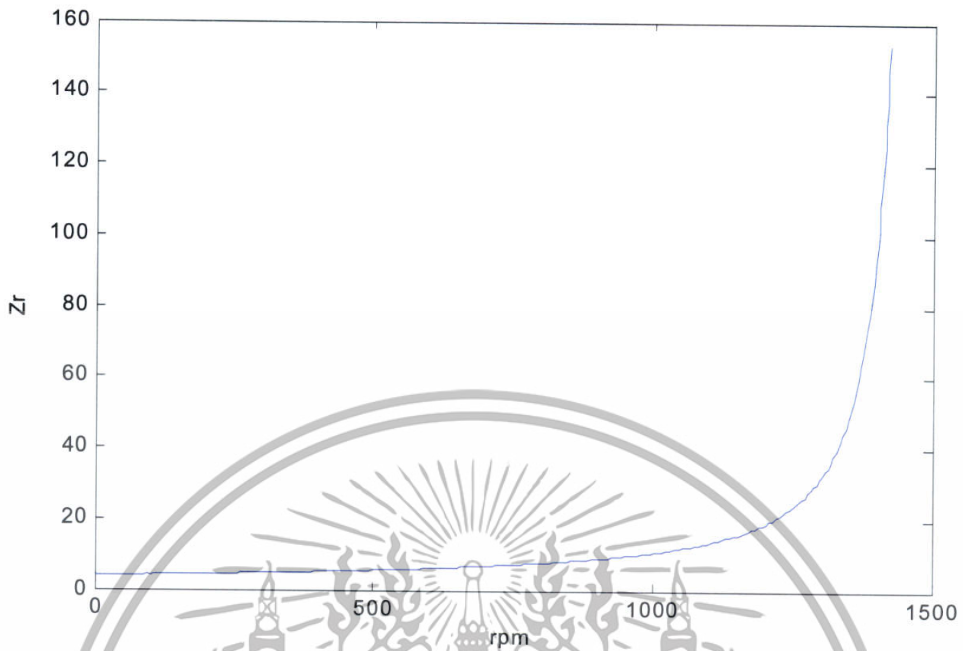
เนื่องจากสกินเอฟเฟกต์มีผลกับค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ ในส่วนของสเตเตอร์เป็นส่วนที่หยุดนิ่งไม่เกี่ยวข้องกับความเร็ว ดังนั้นส่วนของสเตเตอร์จึงไม่มีผลของสกินเอฟเฟกต์ ส่วนโรเตอร์เป็นส่วนที่หมุนจึงมีผลของสกินเอฟเฟกต์เพราะมีความถี่

4.6.1 การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ 1 แรงม้า



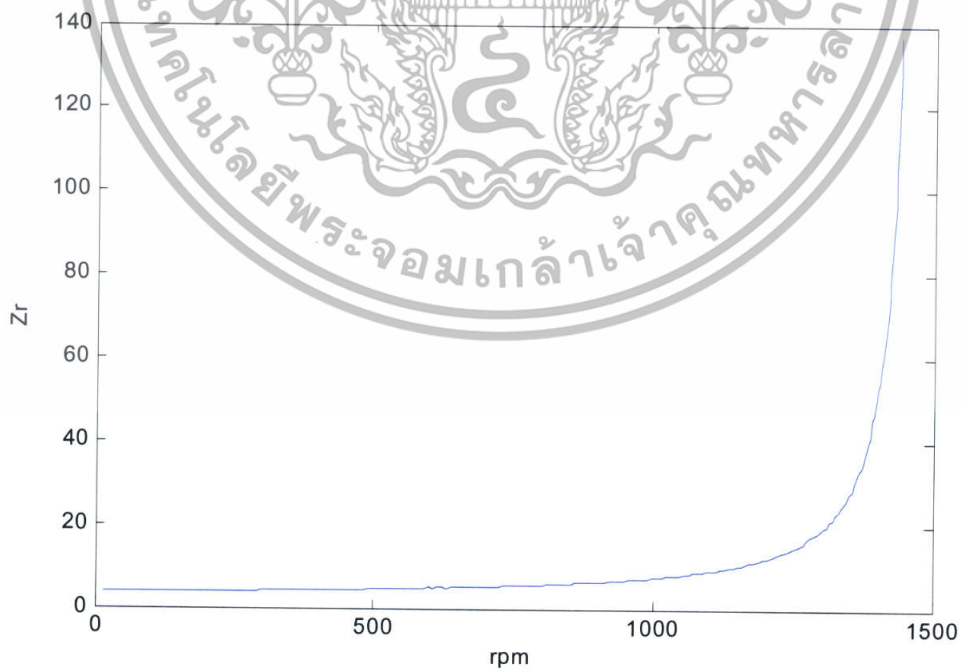
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์กับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า

4.6.2 การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 แรงม้า



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์กับความเร็รรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า

4.6.3 การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ 5 แรงม้า

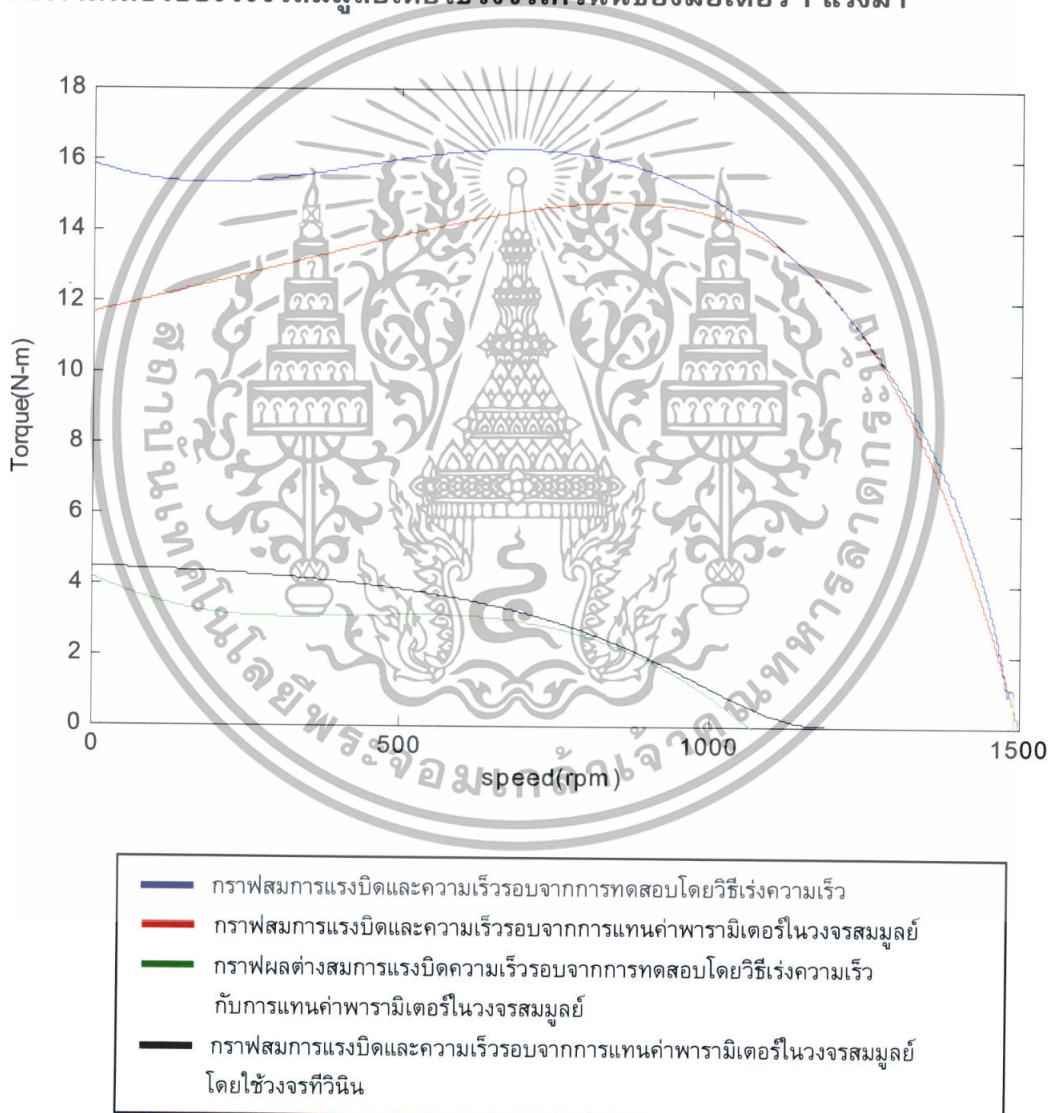


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์กับความเร็รรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า

จากกราฟการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์รูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิปของมอเตอร์ โดยจากกราฟค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่มอเตอร์มีค่าความเร็วรอบใกล้ steady-state จึงสามารถสรุปได้ว่าวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ทางด้านโรเตอร์มีค่าพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นมา ซึ่งก็คือค่า R_3 และ X_3

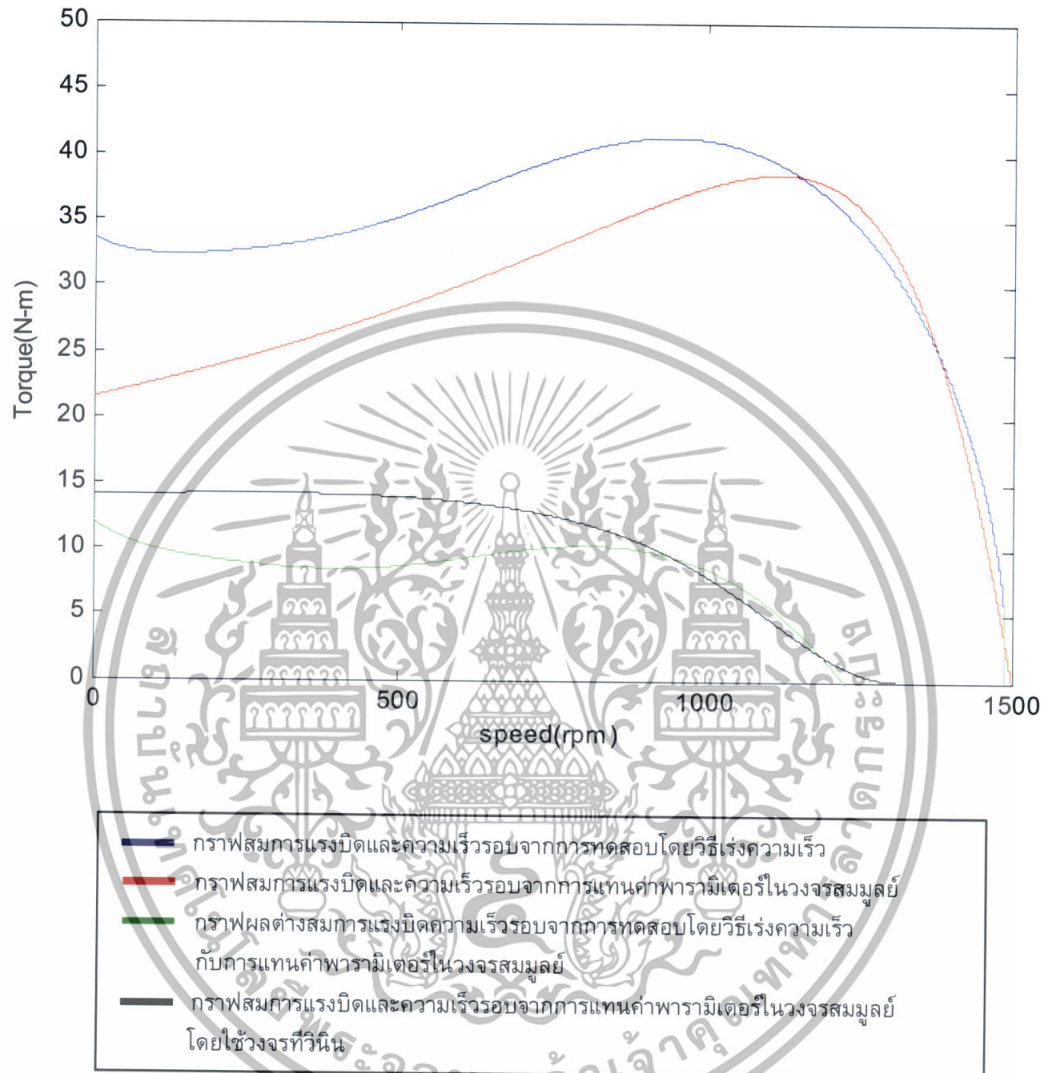
4.7 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์

4.7.1 ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์โดยการแทนค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์โดยใช้วงจรเทวินินของมอเตอร์ 1 แรงม้า



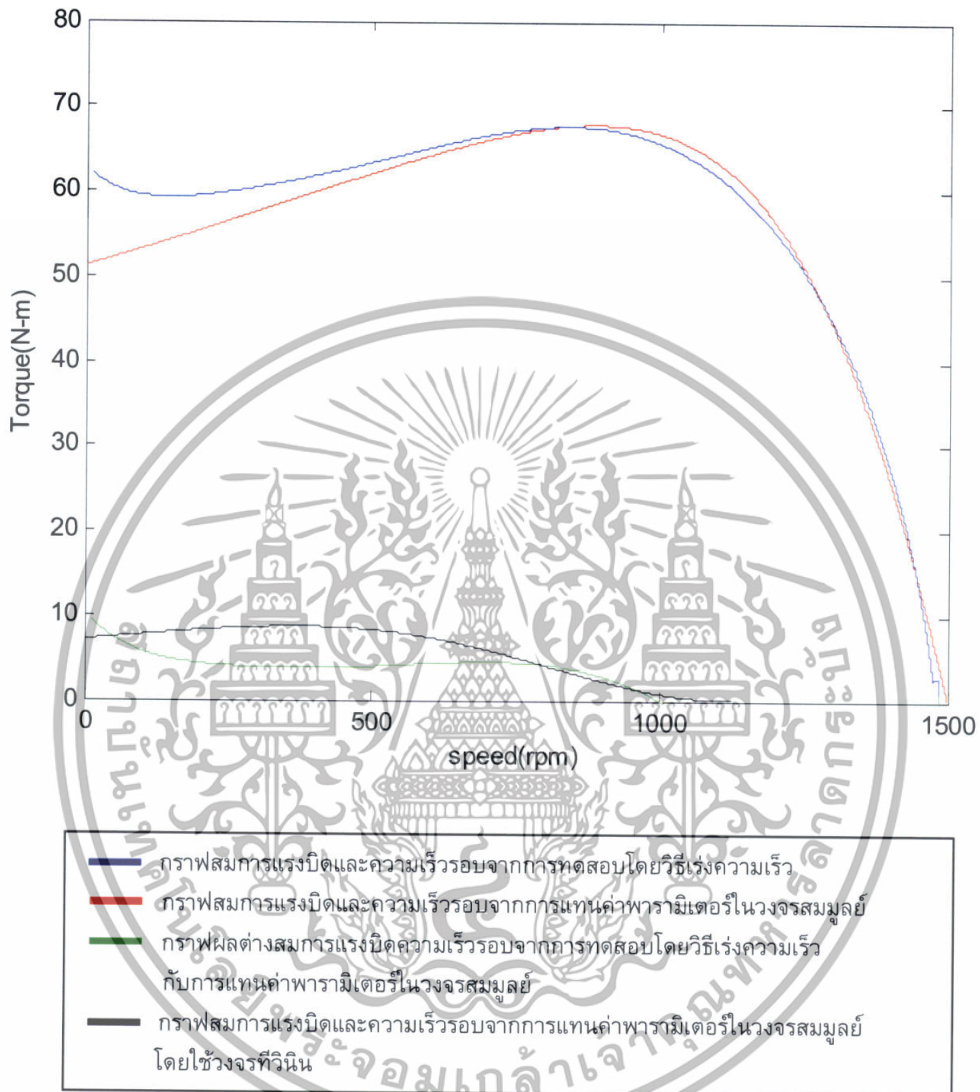
รูปที่ 4.18 กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า

4.7.2 ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์โดยการแทนค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์โดยใช้วงจรเทวินินของมอเตอร์ 3 แรงม้า



รูปที่ 4.19 กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า

4.7.3 ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์โดยการแทนค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์โดยใช้วงจรเทวินินของมอเตอร์ 5 แรงม้า



รูปที่ 4.20 กราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า

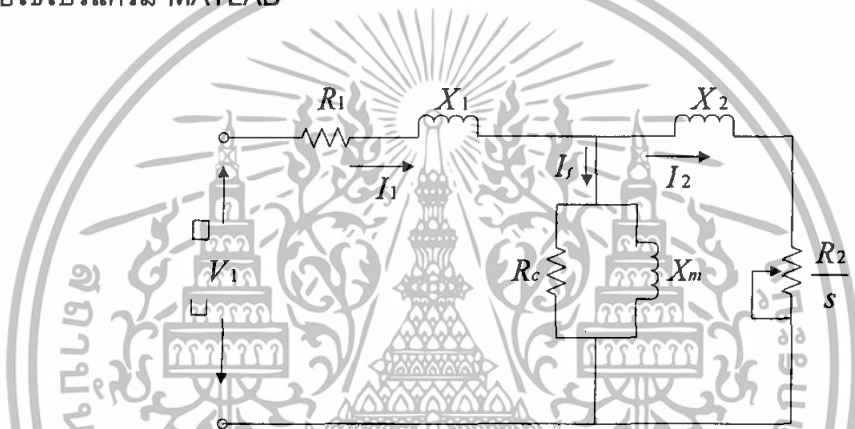
จากรูปที่ 4.18 รูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์โดยการแทนค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์โดยใช้วงจรเทวินินของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับผลต่างสมการแรงบิดความเร็วรอบจากการทดสอบโดยวิธีเร่งความเร็วกับการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์ จึงสามารถสรุปได้ว่าวงจรสมมูลย์ที่ได้มีความถูกต้อง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในการทดสอบหาวงจรสมมูลนั้น เราจะใช้วิธีการทดสอบสองวิธีคือ วิธีทดสอบในสภาวะไร้ภาระ (No-load test) ใช้หาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการสตาร์ทมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะไม่ต่อภาระ เพื่อหาค่า R_c และ X_m จากวงจรสมมูล วิธีทดสอบบล็อกโรเตอร์ (Block Rotor test) ใช้ทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ค่า R_2 และ X_2 วิธี V-I method เพื่อหาค่า R_1 จะได้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.4

นำค่า R_c , X_m , R_1 , R_2 และ X_2 ที่ได้มาคำนวณหาแรงบิดจากวงจรสมมูลแบบเดิม ดังรูปโดยใช้โปรแกรม MATLAB



รูปที่ 5.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเดิม

การทดสอบหากกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้วิธีเพิ่มล้อช่วยแรง หรือ วิธีเร่งความเร็วรอบ การทดสอบนี้จะได้กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ เพื่อทำการเปรียบเทียบกราฟแรงบิด-ความเร็วรอบ เพื่อหาค่าวงจรมูลที่ใช้งานได้ตลอดย่านการทำงาน

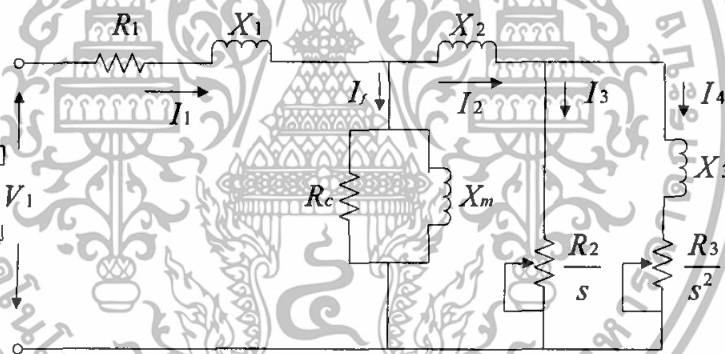
ในการทดสอบจะพบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบจากการทดลองกับกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบจากการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรมูลในมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า จะพบว่ามีค่าไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 4.9 รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 โดยในช่วงสตาร์ทแรงบิดมีค่าแตกต่างกันมากและเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง steady-state

เมื่อทำการวิเคราะห์รูปกระแสของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า ดังรูปที่ 4.12 รูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 จะพบว่าไม่มีผลของ electrical transient ในช่วงสตาร์ทที่ทำให้ส่งผลต่อแรงบิดขณะเริ่มต้น เนื่องจากใช้วิธีสตาร์ทแบบกลับทางหมุนเพื่อลด electrical transient ขณะเริ่มสตาร์ท

เมื่อทำการหาค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ดังรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิปของอินดักชันมอเตอร์ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์จึงมีค่า R_3 และ X_3 เพิ่มขึ้นมา

เมื่อทำการคำนวณและพลอตกราฟแรงบิดความ-เร็วรอบของกราฟผลต่างสมการแรงบิด ความเร็วรอบจากการทดสอบโดยวิธีเร่งความเร็วกับการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์ เปรียบเทียบกับกราฟสมการแรงบิดและความเร็วรอบจากการแทนค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์โดยใช้วงจรที่วินิตตามรูปที่ 4.18 รูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 จะพบว่ากราฟมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าวงจรสมมูลย์ควรจะเป็นดังรูปที่ 5.2

จากผลของปรากฏการณ์ตามผิว (skin effect) ซึ่งมีค่าเกี่ยวเนื่องกับความถี่บนโรเตอร์ คือ เมื่อสลิปมีค่าสูง ความถี่บนโรเตอร์จะมีค่าสูงทำให้เกิดผลของปรากฏการณ์ตามผิว (skin effect) แต่เมื่อสลิปมีค่าต่ำ (ความเร็วใกล้ซิงโครนัสสปีด) ความถี่บนโรเตอร์จะมีค่าต่ำทำให้ปรากฏการณ์ตามผิว (skin effect) หายไป ผลของ R_3 และ X_3 จึงหายไปในช่วง steady-state แรงบิดจึงมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง steady-state



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่หาได้

บรรณานุกรม

- [1] IEEE Standard 112-2004, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.
- [2] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, Stephen D. Umans. Electric Machinery. 5th Edition. London : McGraw Hill. 1992.
- [3] วรชาติ แซ่ก๊ก, พิซิต ล้ายอง. “เทคนิคในการหาคูณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2544. หน้า 122-127.
- [4] วรชาติ แซ่ก๊ก, พิซิต ล้ายอง. “การหาคูณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยวิธีการเร่งความเร็ว” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24), สจล.22-23 พฤษภาคม 2544 หน้า 199-204
- [5] วรชาติ แซ่ก๊ก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต “เทคนิคในการหาคูณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545.
- [6] ณัฐวุฒิ โอสมพรวิวัฒน์, “เทคนิคในการหาคูณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย” วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2549.



1. โมเมนต์ความเฉื่อย

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

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

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

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

1.1 ทฤษฎีบทแกนขนาน

ทฤษฎีบทแกนขนานมีเนื้อหาดังนี้ โมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นวัตถุรอบแกนที่ตั้งฉากกับแผ่นวัตถุและจุดตั้งบนแผ่นวัตถุ (J) เท่ากับผลบวกของโมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นวัตถุรอบแกนที่ตั้งฉากและเส้นผ่านศูนย์กลางมวลของแผ่นวัตถุ (J_{cm}) กับโมเมนต์ความเฉื่อยของศูนย์กลางมวลรอบแกนที่ตั้งฉากและผ่านจุดตั้ง (o) บนแผ่นวัตถุดังกล่าว (Ma^2)

จากทฤษฎีบทนี้จะกล่าวได้ว่า โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนหนึ่ง (J_0) เท่ากับผลบวกของโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนที่ขนานกับแกนนั้นและเส้นผ่านศูนย์กลางมวล (J_{cm}) กับผลคูณของมวลวัตถุกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างแกนทั้งสองนั้น (Ma^2) โดยสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ตามสมการที่ 3

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

1.2 รัศมีโรเรชัน

รัศมีโรเรชัน (radius of gyration, k) เป็นค่าสมมติของระยะทางจากตำแหน่งที่คิดว่ามวลทั้งหมดรวมกันอยู่ที่ถึงแกนหมุน โดยรัศมีโรเรชันเป็นดังสมการที่ 4

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

1.3 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรูปทรงกระบอกกลวง

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

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

จากทฤษฎีบทแกนขนานจะได้โมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกกลวงรอบแกนที่ขอบและขนานกับแกน เป็นดังสมการที่ 6

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



```

clc
clear
%here are the motor parameters 1 hp
V1 = 380/sqrt(3);
nph = 3;
pole = 4;
fe = 50;
R1 = ;
X1 = ;
X2 = ;
Xm = ;
R2 = ;
%Calculate the syn speed
omegas = 4*pi*fe/pole;
ns = 120*fe/pole;
%Calculate stator Thevenin Equivalent
Z1eq = j*Xm*(R1+j*X1)/(R1+j*(X1+Xm));
R1eq = real(Z1eq);
X1eq = imag(Z1eq);
V1eq = abs(V1*j*Xm/(R1+j*(X1+Xm)));
%Here is the loop over slip
for n = 1:200
    s(n) = n/200;
    rpm(n) = ns*(1-s(n));
    I2 = abs(V1eq/(Z1eq+j*X2+R2/s(n)));
    Tmech(n) = nph*(I2^2)*R2/(s(n)*omegas);
end
%now plot
plot(rpm,Tmech)
hold
xlabel('speed(rpm)')
ylabel('Torque(N-m)')
figure(1)
plot(speed,T)

```

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อ : นาย พงศ์พันธ์ จิระวัฒนา
วันเดือนปี เกิด : 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529
ที่อยู่ : 651/1 พ ซอยชมสำราญ บ้านโชด อำเภอเมือง ชลบุรี 20000
การศึกษา : สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนชลราษฎรบำรุง ชลบุรี
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนชลราษฎรบำรุง ชลบุรี
ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความสนใจ : วิศวกรรมไฟฟ้า สาขาไฟฟ้ากำลัง

การใช้โปรแกรม : Matlab PLC

ภาษาต่าง : ภาษาอังกฤษ

ประเทศ

ฝึกงาน : บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)
ระหว่างเดือน เมษายน - พฤษภาคม ปี พ.ศ. 2550



ชื่อ : นาย พงศกร อัมพวันวงศ์
วันเดือนปี เกิด : 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2528
ที่อยู่ : 236 หมู่ 9 นครสวรรค์ตึก อำเภอเมือง นครสวรรค์ 60000
การศึกษา : สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนนครสวรรค์ นครสวรรค์
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสตรีนครสวรรค์
นครสวรรค์
ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความสนใจ : วิศวกรรมไฟฟ้า สาขาไฟฟ้ากำลัง

การใช้โปรแกรม : Matlab PLC

ภาษาต่าง : ภาษาอังกฤษ

ประเทศ

ฝึกงาน : บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

ระหว่างเดือน เมษายน - พฤษภาคม ปี พ.ศ. 2550



ชื่อ : นาย วีระ พัวพลเทพ
วันเดือนปีเกิด : 24 ตุลาคม พ.ศ. 2528
ที่อยู่ : 1/7 หมู่ 1 สามชุก สามชุก สุพรรณบุรี 72130
การศึกษา : สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสามชุกรัตนโกการาม
สุพรรณบุรี
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสามชุกรัตนโกการาม
สุพรรณบุรี

ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความสนใจ : วิศวกรรมไฟฟ้า สาขาไฟฟ้ากำลัง
การใช้โปรแกรม : Matlab PLC
ภาษาต่าง : ภาษาอังกฤษ
ประเทศ :
ฝึกงาน : บริษัท เพาเวอร์ไลน์เอ็นจิเนียริง จำกัด (มหาชน)
ระหว่างเดือน เมษายน - พฤษภาคม ปี พ.ศ. 2550



ชื่อ : นาย สมศักดิ์ จิระไพบุลย์วินิชย์
วันเดือนปีเกิด : 14 มีนาคม พ.ศ. 2529
ที่อยู่ : 9/14 หมู่ 4 ห้วยกะปิ อำเภอเมือง ชลบุรี 20130
การศึกษา : สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนชลราษฎรบำรุง ชลบุรี
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนชลราษฎรบำรุง ชลบุรี
ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความสนใจ : วิศวกรรมไฟฟ้า สาขาไฟฟ้ากำลัง
การใช้โปรแกรม : Matlab PLC SCADA
ภาษาต่าง : ภาษาอังกฤษ
ประเทศ :
ฝึกงาน : บริษัท NOK Precisian component LTD
ระหว่างเดือน เมษายน - พฤษภาคม ปี พ.ศ. 2550