



# กรณีศึกษาและวิเคราะห์อุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

Study and analyze the temperatures that affect the efficiency of Induction motor

นายจารึก จันทร์พุด รหัส 47361555

นายทิวทัศน์ คำหลวงแ้วน รหัส 47363874

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์  
วันที่รับ... 24 / ก.พ. 2552 / .....  
เลขทะเบียน..... 14360642  
เลขเรียกหนังสือ..... 2/8.  
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๑319/1

2551

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2551



## ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

หัวข้อโครงการ      กรณีศึกษาและวิเคราะห์อุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ผู้ดำเนินโครงการ      นายจารึก      จันทร์พุด      รหัส 47361555  
   นายทิวทัศน์      คำหลวงแว่น      รหัส 47363874

อาจารย์ที่ปรึกษา      ดร.สมพร      เรื่องสินชัยวานิช

สาขาวิชา      วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา      วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา      2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม

.....ประธานกรรมการ

(ดร.สมพร      เรื่องสินชัยวานิช)

.....กรรมการ

(ดร.อัศวพันธ์      วงศ์กังแห)

.....กรรมการ

(อ.เป็ยคนัย      ภาชนะพรรณณ์)

หัวข้อโครงการ	การศึกษาและวิเคราะห์อุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายจารึก	จันทร์พุ่ม	รหัส 47361555
	นายทิวทัศน์	คำหลวงแว่น	รหัส 47363874
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมพร	เรื่องสินชัยวานิช	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2551		

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดแบบโรเตอร์กรงกระรอกและแบบขดลวดโรเตอร์ถูกนำมาวิเคราะห์ ผลจากทดสอบมอเตอร์เห็นว่าความสัมพันธ์ทั้งการสูญเสียต่าง ๆ และประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะที่อุณหภูมิของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสัมพันธ์กับหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่อุณหภูมิสูงๆจะทำให้มอเตอร์ทำงานได้ประสิทธิภาพน้อยลง

**Project Title** Study and analyse the temperature that affect the efficiency of Induction Motor  
**Name** Mr. Jaruk Janput ID 47361555  
Mr. Tiewtouch Khamluangwan ID 47363874  
**Project Advisor** Dr. Somporn Ruangsinchaiwanich  
**Major** Electrical Engineering  
**Department** Electrical and Computer Engineering  
**Academic Year** 2008

---

### ABSTRACT

This project presents to educate and analyze the influence of temperature due to the efficiency of induction motor. Both of the squirrel cage and wound rotors of 3-phase induction motor were investigated. The results of measurements show the relationship between the losses and efficiency since the temperature of induction motor was changed. Therefore, the results are related with the fundamental of the induction motor that since the temperature of induction motor was higher, the efficiency was lower.

## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำปริญญาบัตรในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือและให้คำแนะนำจาก คร. สมพร เรืองสินชัยวานิช ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรในครั้งนี้ และขอขอบคุณ คร. ชัยรัตน์ พินทอง และอ.ปิยะฉัย ภาชนะพรรณ ที่ให้ความกรุณาเป็นผู้ตรวจสอบปริญญาบัตรและคอยให้คำแนะนำในส่วนของคุณวุฒิเกี่ยวกับปริญญาบัตรในครั้งนี้ ทำยสุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องที่คอยดูแล คอยเป็นกำลังใจ และเป็นผู้สนับสนุนในด้านต่างๆ มาโดยตลอดในการทำปริญญาบัตร และขอขอบคุณบุคคลต่างๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงรวมถึงแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องการทำปริญญาบัตรในครั้งนี้

ผู้จัดทำ

นายจรรีก

จันทร์พุ่ม

นายทิวทัศน์

คำหลวงแวน



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบข่ายของโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	1
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งบประมาณ.....	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์	
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	3
2.2 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	4
2.3 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	7
2.4 กำลังและแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	12
2.5 คุณลักษณะของแรงบิด- ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	15
บทที่ 3 การสูญเสียในมอเตอร์และการวิเคราะห์อุณหภูมิ	
3.1 การสูญเสียในมอเตอร์.....	26
3.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิ.....	28
บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์มอเตอร์กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	
4.1 การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานชุดขดลวดสเตเตอร์.....	31
4.2 การทดสอบมอเตอร์สภาวะไม่มีโหลด.....	32
4.3 การทดสอบมอเตอร์สภาวะที่มีโหลด.....	35

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	
5.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบโรเตอร์กรงกระรอกกับอุณหภูมิจ.....38	
5.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบขาค้วโรเตอร์กับอุณหภูมิจ.....65	
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการดำเนินการ	
6.1 สรุปผลการดำเนินการ.....92	
6.2 วิจารณ์ผลการดำเนินการ.....92	
เอกสารอ้างอิง..... 93	
ภาคผนวก.....94	
ประวัติผู้เขียนโครงการ.....96	

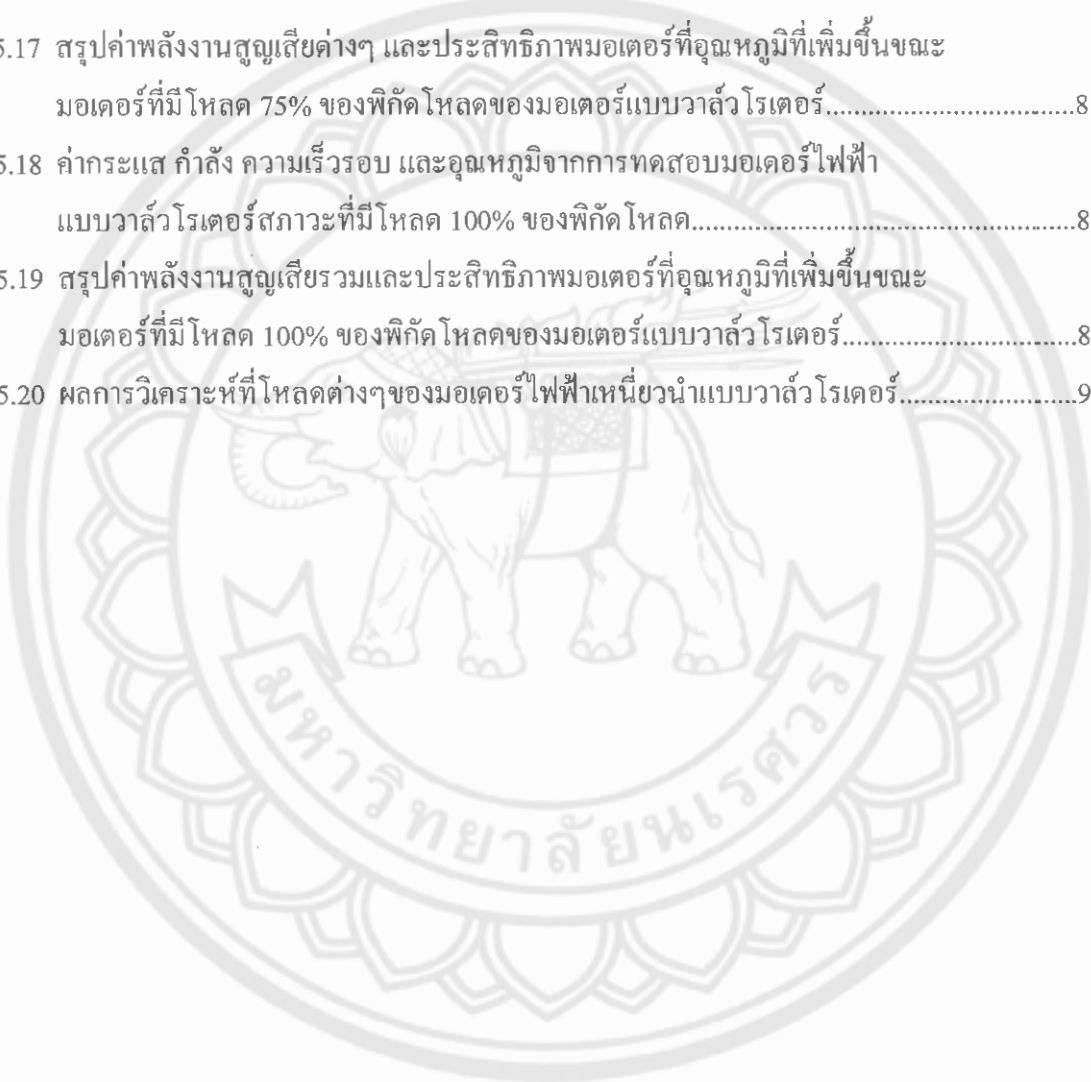
# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	กิจกรรมการดำเนินงาน.....2
3.1	คลาสของฉนวนตาม IEC 85.....28
3.2	เวลาล่าช้าในการวัด.....30
5.1	ค่าพิกัดต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก.....38
5.2	ค่าความต้านของชุดขดลวดสเตเตอร์ที่ได้จากการทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง 31.5 °C.....38
5.3	ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ แบบโรเตอร์กรงกระรอกสถานะที่ไม่มีโหลด.....39
5.4	ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกสถานะที่มีโหลด 50% ของพิกัด โหลด.....40
5.5	สรุปค่าพลังงานสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกโหลดมี 50% ของพิกัด โหลด.....46
5.6	ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกสถานะที่มีโหลด 75% ของพิกัด โหลด.....48
5.7	สรุปค่าพลังงานสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกโหลดมี 75% ของพิกัด โหลด.....54
5.8	ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกสถานะที่มีโหลด 100% ของพิกัด โหลด.....55
5.9	สรุปค่าพลังงานสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกโหลดมี 100% ของพิกัด โหลด.....62
5.10	ผลการวิเคราะห์ที่โหลดต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก.....63
5.11	ค่าพิกัดต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์.....65
5.12	ค่าความต้านของชุดขดลวดสเตเตอร์ที่ได้จากการทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง 30.0 °C.....65
5.13	ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ แบบวาล์วโรเตอร์สถานะที่ไม่มีโหลด.....66
5.14	ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า เหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์สถานะที่มีโหลด 50% ของพิกัด โหลด.....67



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.15	สรุปค่าพลังงานสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะ มอเตอร์ที่มีโหลด 50% ของพิกัดโหลดของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์.....73
5.16	ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า แบบวาล์วโรเตอร์สถานะที่มีโหลด 75% ของพิกัดโหลด.....75
5.17	สรุปค่าพลังงานสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะ มอเตอร์ที่มีโหลด 75% ของพิกัดโหลดของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์.....81
5.18	ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า แบบวาล์วโรเตอร์สถานะที่มีโหลด 100% ของพิกัดโหลด.....83
5.19	สรุปค่าพลังงานสูญเสียรวมและประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะ มอเตอร์ที่มีโหลด 100% ของพิกัดโหลดของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์.....89
5.20	ผลการวิเคราะห์ที่โหลดต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์.....90



# สารบัญรูป

	หน้า
2.1ก. แสดงขดลวดสเตเตอร์ภายในมอเตอร์.....	3
2.1ข. แสดงโรเตอร์ภายในมอเตอร์.....	3
2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบเท่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	7
2.3 รูปเปรียบเทียบเส้นโค้งแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำกับหม้อแปลง.....	8
2.4 วงจรสมมูลโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	9
2.5 วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่สนใจค่าของสลิปในความต้านทาน $R_r$ .....	10
2.6 กระแสโรเตอร์ขณะทำงานที่ความเร็วโรเตอร์.....	10
2.7 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	11
2.8 แผนภาพตำแหน่งกำลังสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	12
2.9ก. สนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่ไม่มีโหลด.....	15
2.9ข. สนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่มีโหลด.....	16
2.10ก. กราฟเปรียบเทียบกระแสโรเตอร์กับความเร็วในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	17
2.10ข. กราฟเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กกับความเร็วของมอเตอร์.....	17
2.10ค. กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบกำลังโรเตอร์กับความเร็วของมอเตอร์.....	17
2.10ง. กราฟเปรียบเทียบผลของทอร์กกับคุณลักษณะความเร็ว.....	18
2.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	19
2.12 วงจรหาแรงดันเทวินิน.....	20
2.13 วงจรหาอิมพีแดนซ์เทวินิน.....	20
2.14 วงจรสมมูลเทวินิน.....	21
2.15 ตัวอย่างเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	22
2.16 เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	23
2.17 ตัวอย่างทอร์กเหนี่ยวนำและกำลังที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับความเร็วมอเตอร์ ในการหมุน 1 รอบ/นาที ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 โพล.....	24
2.18 คุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสลิปโรเตอร์.....	25
4.1 การวัดความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส.....	31
4.2 วงจรทดสอบ.....	32

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ชุดวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส (Three-phase Wattmeter Modules).....	33
4.4 ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำวาล์วโรเตอร์อินดักชันมอเตอร์ (Wound rotor induction motor).....	33
4.5 ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel-Cage induction motor).....	34
4.6 การวัดอุณหภูมิมอเตอร์.....	34
5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิ ของมอเตอร์แบบโรเตอร์กรงกระรอกที่โหลด 50%.....	47
5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิ ของมอเตอร์แบบโรเตอร์กรงกระรอกที่โหลด 75%.....	54
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิ ของมอเตอร์แบบโรเตอร์กรงกระรอกที่โหลด 100%.....	63
5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียรวมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก.....	64
5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพมอเตอร์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก.....	64
5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์ที่โหลด 50%.....	74
5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์ที่โหลด 75%.....	82
5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์ที่โหลด 100%.....	90
5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียรวมกับอุณหภูมิ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์.....	91
5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพมอเตอร์กับอุณหภูมิ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์.....	91
7.1 Infrared Thermometer ST-8828.....	94
7.2 ระยะเวลาทำงานของ Infrared Thermometer ST-8828.....	95

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันนี้ในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตทั่วไปต้องใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนการผลิต ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและมีการเดินเครื่องการผลิตตลอดเวลา ความเสื่อมสภาพจากการใช้งานหรือความผิดปกติต่างๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากโรเตอร์และสเตเตอร์ต้องรับแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กอยู่ตลอดเวลา ความเสียหายที่เกิดขึ้นทางกล จากความร้อนและทางไฟฟ้าจะกระทบโดยตรงกับการทำงานและประสิทธิภาพการใช้งานของมอเตอร์ เทคโนโลยีปัจจุบันที่นำมาใช้ในการตรวจสอบหรือวิเคราะห์ความเสียหายของมอเตอร์ ได้แก่ การวัดและวิเคราะห์อุณหภูมิของมอเตอร์ เป็นต้น

ดังนั้นโครงการนี้จึงจะทำการทดสอบอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้การทดสอบผลของกำลังสูญเสียต่างๆและประสิทธิภาพทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกและมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์ เพื่อสามารถนำมาวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ได้

#### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการสูญเสียต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

#### 1.3 ขอบข่ายของโครงการ

สามารถรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในมอเตอร์และประสิทธิภาพการทำงาน การสูญเสียต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิในมอเตอร์สูงขึ้น

#### 1.4 ขั้นตอนกิจกรรมการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาค้นหาข้อมูลเกี่ยวกับหลักการทำงานและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 1.4.2 ค้นหาข้อมูลเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 1.4.3 ออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในมอเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการทำงาน

## 1.4.4 ทดลองการทำงานของมอเตอร์

## 1.4.5 สรุปผลการทดลอง

## ตารางที่ 1 กิจกรรมการดำเนินงาน

กิจกรรมการดำเนินงาน	ปี 2551					
	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับหลักการทำงานและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	←→					
ค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	←→					
ออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในมอเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการทำงาน		←→				
ทดลองการทำงานของมอเตอร์			←→			
สรุปผลการทดลอง					←→	

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถเข้าใจหลักการทำงานและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 1.5.2 สามารถเข้าใจประสิทธิภาพและการสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง
- 1.5.3 สามารถวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่อุณหภูมิสูงๆ ได้

## 1.6 งบประมาณ

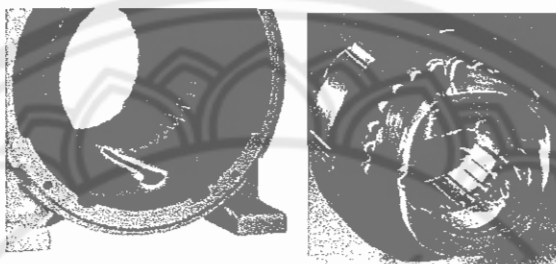
- 1.6.1 ค่าอุปกรณ์
- 1.6.2 ค่าถ่ายเอกสาร
- 1.6.3 ค่าพิมพ์เอกสาร
- 1.6.4 กระดาษ
- 1.6.5 หนังสือประกอบการทำโครงการ  
รวมเป็นเงิน 2,000 บาท (หนึ่งพันบาทถ้วน)

## บทที่ 2

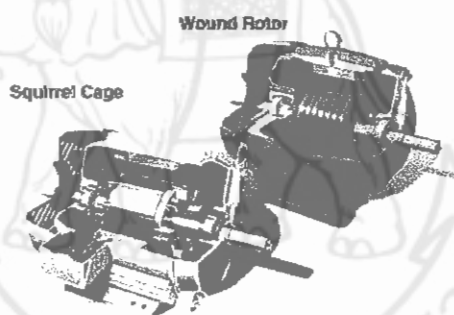
### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยส่วนใหญ่ๆ 2 ส่วน คือ



รูป 2.1ก. แสดงขดลวดสเตเตอร์ภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูป 2.1ข. แสดง โรเตอร์ภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

##### 2.1.1 ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator)

ส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันและทำเป็นช่องสล็อตไว้เพื่อบรรจุขดลวด ความเร็วรอบของมอเตอร์จะแปรผันตรงตามจำนวนขั้วแม่เหล็ก เมื่อจ่ายไฟกระแสสลับให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กค่าคงตัวค่าหนึ่ง ซึ่งหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส  $n_s$  สนามแม่เหล็กหมุนจะเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในโรเตอร์โดยเป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำ

##### 2.1.2 ตัวหมุน (Rotor) โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

###### 1.) โรเตอร์แบบขดลวดหรือเฟสขดลวด (Wound rotor or phase wound rotor)

เรียกมอเตอร์ชนิดนี้ว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสขดลวดหรือสลลิปริงมอเตอร์ พบมากในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส การพันขดลวดจะเป็นแบบ 2 ชั้นเหมือนกับขดลวดที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสลับ ภายในโรเตอร์จะถูกต่อแบบสตาร์มีปลายสายออกมา 3 เส้น ต่อเข้ากับสลิปริงที่ติดกับเพลลาของโรเตอร์ เราสามารถนำความต้านทานที่ต่อแบบสตาร์มาต่อเข้ากับสลิปริงที่ต่อมาจากขดลวดในโรเตอร์แบบวาล์วเพื่อเพิ่มแรงบิดเริ่มหมุน เมื่อมอเตอร์หมุนเข้าสู่ความเร็วปกติ สลิปริงจะถูกตัดวงจร ทำให้โรเตอร์ทำงานแบบกรงกระรอก

## 2.) โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor motor)

มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้ เรียกว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก มีประมาณ 90% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทั้งนี้เนื่องจากทำได้ง่ายและทนทาน โดยประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอก และถูกทำให้เป็นช่องสล็อตขนานกันเพื่อบรรจุตัวนำของตัวหมุน ลงในช่องสล็อตนั้น ตัวนำที่ฝังเป็นแท่งทองแดง โดยในหนึ่งสล็อตจะบรรจุตัวนำเพียง 1 แท่งเท่านั้น ปลายสุดของแท่งตัวนำทั้ง 2 ด้านจะถูกตัดวงจรเข้าด้วยกันอย่างถาวร จึงไม่สามารถที่จะนำความต้านทานจากภายนอกมาต่ออนุกรมเข้ากับวงจรตัวหมุนเพื่อช่วยในการเริ่มหมุนได้ สล็อตของตัวหมุนจะวางให้มีลักษณะที่ไม่ขนานกับเพลลา โดยเฉียงเล็กน้อย เพื่อช่วยให้มอเตอร์หมุนได้เร็ว ด้วยการลดการฮัมของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic hum) และช่วยในการลดการเกิดการลัดวงจรของตัวหมุนอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ที่พื้นของสเตเตอร์กับโรเตอร์ ส่วนโรเตอร์แบบอื่นๆ ก็มีลักษณะคล้ายกันกับตัวหมุนโรเตอร์แบบกรงกระรอก โดยประกอบด้วยแท่งเหล็กทรงกระบอกตัน มอเตอร์จะหมุนได้ขึ้นอยู่กับผลของการเกิดกระแสไหลวนในแท่งเหล็กของโรเตอร์

## 2.2 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีพื้นฐานใกล้เคียงกับมอเตอร์แบบซิงโครไนส์ ซึ่งสามารถอธิบายหลักการพื้นฐานได้และสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ได้ดังนี้

### 2.2.1 การเหนี่ยวนำให้เริ่มหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลังจากที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบคงตัวหรือความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์เนื่องมาจากการจ่ายแรงดัน กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็ก  $B_r$  มีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนสามารถหาได้จากสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$n_{sync} = \frac{120f_e}{P} \quad (2.1)$$

โดยที่  $n_{sync}$  = ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน [r/min]  
 $P$  = จำนวนขั้วแม่เหล็ก [ขั้ว]  
 $f_e$  = ความถี่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ [Hz]

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์สามารถหาได้จาก

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (2.2)$$

โดยที่

- $e_{ind}$  = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำ
- $v$  = ความเร็วในการเคลื่อนตัวตัดฟลักแม่เหล็ก
- $B$  = ความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็ก
- $l$  = ความยาวของตัวนำที่เคลื่อนตัวตัดกับฟลักแม่เหล็ก

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ในโรเตอร์ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของสเตเตอร์ ความเร็วในการเคลื่อนตัวตัดกับสนามแม่เหล็กของแกนโรเตอร์ด้านบนจะสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กทางด้านขวา โดยแรงดันเหนี่ยวนำด้านบนจะพุ่งออกจากหน้ากระดาษและแรงดันเหนี่ยวนำด้านล่างจะมีทิศพุ่งเข้า ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในตัวโรเตอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อโรเตอร์ได้ถูกเหนี่ยวนำ กระแสสูงสุดของโรเตอร์จะนำหน้าแรงดันสูงสุดของโรเตอร์ กระแสที่ไหลในโรเตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็ก  $B_R$  ขึ้นที่ตัวโรเตอร์ ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงบิดขึ้นในเครื่องกลดังสมการ

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_S \quad (2.3)$$

แรงบิดที่เกิดขึ้นจะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและโรเตอร์ก็จะถูกเร่งไปในทิศทางเดียวกัน

### 2.2.2 โรเตอร์สลลิป

การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่แกนของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความเร็วโรเตอร์และสนามแม่เหล็ก เนื่องจากพฤติกรรมของการเหนี่ยวนำมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับแรงดันและกระแสของโรเตอร์ ตัวแปรที่ถูกใช้ในการหาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์และสนามแม่เหล็ก หาได้จากความเร็วสลลิป ซึ่งสามารถหาได้จากผลต่างของความเร็วซิงโครนัสและความเร็วโรเตอร์ดังสมการนี้คือ

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m \quad (2.4)$$

โดยที่

- $n_{slip}$  = ความเร็วสลลิป
- $n_{sync}$  = ความเร็วของสนามแม่เหล็ก
- $n_m$  = ความเร็วที่แกนเพลลาของโรเตอร์

จากสมการสามารถนำไปหาความเร็วสลลิป ซึ่งจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถหาได้จากสมการนี้คือ



$$s = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} (\times 100\%) \quad (2.5)$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} (\times 100\%) \quad (2.6)$$

สมการนี้สามารถเขียนในรูปของความเร็วเชิงมุม  $\omega$  [rad/sec] ดังนี้

$$s = \frac{\omega_{sync} - \omega_m}{\omega_{sync}} (\times 100\%) \quad (2.7)$$

จากสมการจะพบว่าถ้าโรเตอร์หมุนที่ความเร็วซิงโครนัสสลิปจะมีค่าเป็นศูนย์ ( $s = 0$ ) แต่ถ้าโรเตอร์หยุดนิ่งค่าสลิปจะเป็นมีค่าเท่ากับหนึ่ง ( $s = 1$ )

นอกจากนั้นเราสามารถหาค่าความเร็วทางกลของแกนเพลารอเตอร์ในเทอมของความเร็วซิงโครนัสและสลิป โดยหาจากสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7) ดังนี้

$$n_m = (1-s)n_{sync} \quad (2.8)$$

หรือ 
$$\omega_m = (1-s)\omega_{sync} \quad (2.9)$$

### 2.2.3 ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเกิดจากการเหนี่ยวนำของแรงดันและกระแสที่ตัวโรเตอร์ ซึ่งความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ในขณะที่โรเตอร์ยังไม่หมุน แต่เมื่อโรเตอร์เริ่มหมุน ความถี่ของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ (relative speed) หรือความเร็วสลิปดังสมการ คือ

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \quad (2.10)$$

และความถี่ที่โรเตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการนี้คือ

$$f_r = sf_e \quad (2.11)$$

โดยที่  $f_r$  = ความถี่ของโรเตอร์ [Hz]

$f_e$  = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้โรเตอร์ [Hz]

เมื่อแทนสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่ (2.11) จะได้ว่า

$$f_r = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} f_e$$

แต่

$$n_{sync} = \frac{120 f_e}{P}$$

ดังนั้น จะได้ว่า

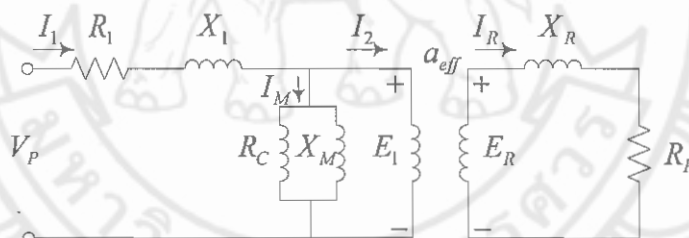
$$f_r = \frac{P}{120} (n_{sync} - n_m) \quad (2.12)$$

### 2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของแรงดันและกระแสที่วงจรของโรเตอร์จากวงจรของสเตเตอร์ ซึ่งมีหลักการเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการลัดวงจรที่ขดลวดโรเตอร์ (ขดลวดทุติยภูมิ) และจะหมุนได้อย่างต่อเนื่องตามขั้วแม่เหล็กของขดลวดปฐมภูมิ (ขดลวดสเตเตอร์) ดังนั้นวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงคล้ายกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 2.3.1 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

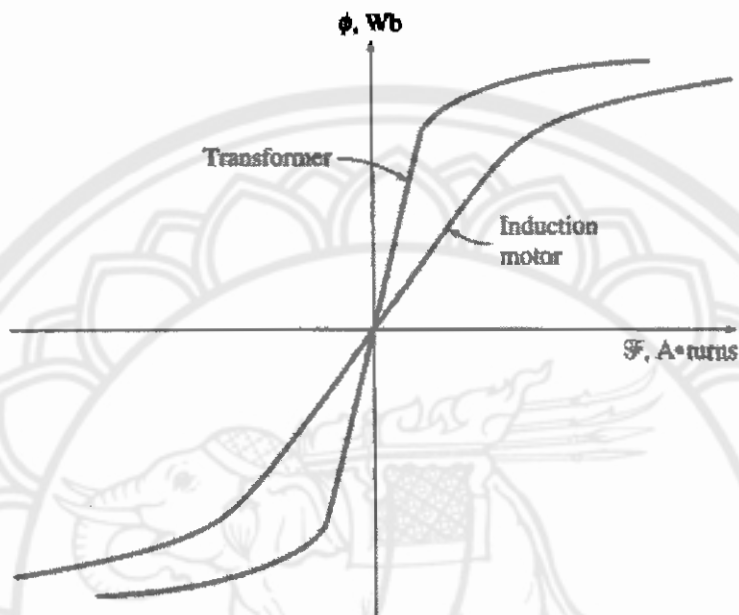
วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการอธิบายถึงหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 จากวงจรจะมีความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำร่วม (self-inductance) ทางด้านขดลวดปฐมภูมิ (ขดลวดสเตเตอร์) ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์คือ  $R_1$  และค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลคือ  $X_1$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่อยู่ทางด้านอินพุตของวงจร



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบท่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ

ฟลักซ์ในแกนเหล็กจะเป็นตัวที่สัมพันธ์กับแรงดัน  $E_1$  เปรียบเทียบได้กับส่วนที่เป็นแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้งของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (magnetomotive-force) - เส้นโค้งของฟลักซ์ (magnetization curve) ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าและมอเตอร์เหนี่ยวนำจะได้นิยามภาพที่รูปที่ 2.3 จะสังเกตเห็นได้ว่าความชันของเส้นโค้งฟลักซ์-แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าจะน้อยกว่าเส้นโค้งของหม้อแปลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในมอเตอร์เหนี่ยวนำมีช่องว่างอากาศเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งจะส่งผลค่ารีลักแตนซ์ของฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นและทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทางด้านทุติยภูมิมีค่าลดลง ค่ารีลักแตนซ์สูงที่เกิดจากช่องว่างอากาศบอกให้ทราบว่าค่ากระแสเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจะส่งผลต่อระดับของฟลักซ์ อย่างไรก็ตามค่า  $X_M$  ในวงจรสมมูลจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับของหม้อแปลงไฟฟ้า

แรงดันสเตเตอร์  $E_1$  สามารถรวมกับแรงดันทางด้านโรเตอร์  $E_R$  ได้ถ้าเราทราบค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ แต่การหาค่าอัตราส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกทำได้ยากเพราะไม่มีความแตกต่างของขดลวดที่จะแยกได้อย่างชัดเจน แรงดัน  $E_R$  เกิดขึ้นมาจากกระแสที่ไหลในโรเตอร์ โดยการช็อดวงจรทางด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 2.3 รูปเปรียบเทียบเส้นโค้งฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำกับหม้อแปลง

ค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านปฐมภูมิและกระแสเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเป็นองค์ประกอบที่เหมือนกันกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่วงจรสมมูลของมอเตอร์จะแตกต่างจากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าตรงที่ความถี่ของโรเตอร์ที่ก่อให้เกิดแรงดัน  $E_R$  และค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์  $R_R$  และ  $jX_R$

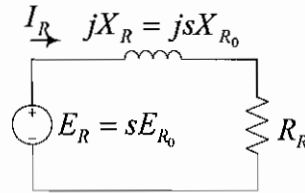
### 2.3.2 วงจรสมมูลของโรเตอร์

เมื่อแรงดันทางด้านขดลวดสเตเตอร์เหนี่ยวนำขดลวดโรเตอร์ โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กด้านสเตเตอร์จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์ ในสภาวะการเคลื่อนที่ที่โรเตอร์หยุดนิ่งเราเรียกว่า locked-rotor หรือ blocked-rotor ซึ่งจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ ส่วนแรงดันที่มีค่าน้อยมากจะเกิดขึ้นเมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเทียบเท่าความเร็วสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ผลที่ได้คือ ไม่มีการเคลื่อนที่นั่นเอง แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ความเร็วโรเตอร์ต่างๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสลิป ดังสมการนี้คือ

$$E_R = sE_{R_0} \tag{2.13}$$

โดยที่  $E_R =$  แรงดันไฟฟ้าของโรเตอร์

$E_{R_0} =$  แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการลื่นของโรเตอร์



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

และที่ความถี่ที่เหนี่ยวนำแรงดันที่สลิตจะสามารถหาได้จากสมการ

$$f_r = sf_e \quad (2.14)$$

แรงดันที่เหนี่ยวนำใน โรเตอร์ประกอบด้วยค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ ความต้านทานโรเตอร์  $R_R$  เป็นค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับค่าสลิต ขณะที่รีแอคแตนซ์ของโรเตอร์จะมีผลของสลิตมาเกี่ยวข้องด้วย

รีแอคแตนซ์ของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าอินดักแตนซ์ของโรเตอร์และความถี่ของแรงดันและกระแสที่เกิดในโรเตอร์ กำหนดให้  $L_R$  เป็นค่าอินดักแตนซ์ของโรเตอร์ จะสามารถหาค่ารีแอคแตนซ์ของโรเตอร์ได้จาก

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R$$

จากสมการ  $f_r = sf_e$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} X_R &= 2\pi s f_e L_R \\ &= s(2\pi f_e L_R) \\ &= sX_{R_0} \end{aligned} \quad (2.14)$$

โดยที่  $X_{R_0} =$  รีแอคแตนซ์ที่ได้จากการลื่นของโรเตอร์

วงจรสมมูลของโรเตอร์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ รูปที่ 2.4 กระแสของโรเตอร์จะหาได้จาก

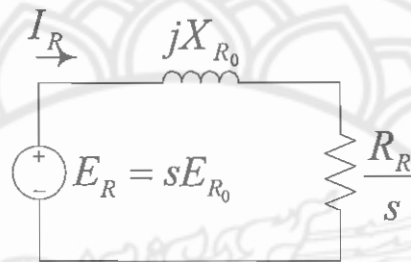
$$\begin{aligned} I_R &= \frac{E_R}{R_R + jX_R} \\ I_R &= \frac{sE_{R_0}}{R_R + jsX_{R_0}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

หรือ 
$$I_R = \frac{E_{R_0}}{R_R/s + jX_{R_0}} \quad (2.16)$$

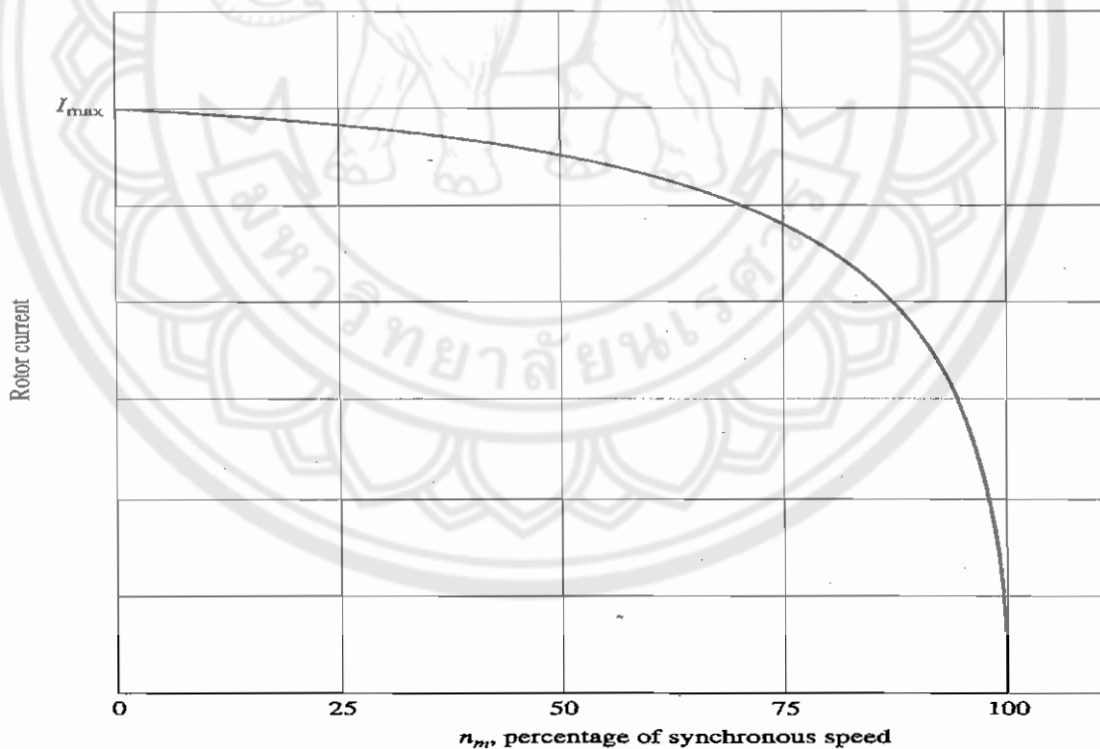
สังเกตว่าสมการที่ (2.16) ค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์มีค่าเท่ากับ

$$Z_{R,eq} = \frac{R_R}{s} + jX_{R_0} \quad (2.17)$$

และวงจรสมมูลของโรเตอร์จะได้ดังรูปที่ 2.5 จากวงจรแรงดันที่โรเตอร์เท่ากับ  $E_{R_0}$  โวลต์ และมีค่าอิมพีแดนซ์รวมเป็น  $Z_{R,eq}$  ค่ากระแสที่ไหลในโรเตอร์สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ดูค่าของสลิปในความต้านทาน  $R_R$



รูปที่ 2.6 กระแสโรเตอร์ขณะทำงานที่ความเร็วโรเตอร์

ที่ค่าสลิปต่ำเทอมของ  $R_R/s \gg X_{R_0}$  ดังนั้นกระแสของโรเตอร์จะแปรตามค่าสลิปเป็นเชิงเส้น แต่ที่ค่าสลิปสูงๆ ค่า  $X_{R_0}$  จะมีค่ามากกว่า  $R_R/s$  มาก ส่งผลให้กระแสมีค่าเข้าใกล้ค่าที่สภาวะคงตัว (steady-state value)

**2.3.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ**

วงจรสมมูลสุดท้ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะอ้างถึงวงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ถูกถ่ายโอนไปยัง ส่วนของสเตเตอร์ดังรูปที่ 2.5 แรงดัน กระแสและค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าปกติสามารถกล่าวถึงทางด้านปฐมภูมิได้โดยอาศัยอัตราส่วนของหม้อแปลงดังสมการนี้ คือ

$$V_P = V'_S = \alpha V_S \tag{2.18}$$

$$I_P = I'_S = \frac{I_S}{\alpha} \tag{2.19}$$

และ 
$$Z'_S = \alpha^2 Z_s \tag{2.20}$$

ถ้าอัตราส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ  $\alpha_{eff}$  จะสามารถเปลี่ยนค่าของแรงดัน โรเตอร์ได้ เป็น

$$E_1 = E'_R = \alpha_{eff} E_{R_0} \tag{2.21}$$

หาค่ากระแสได้จาก

$$I_2 = \frac{I_R}{\alpha_{eff}} \tag{2.22}$$

และหาค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ได้จาก

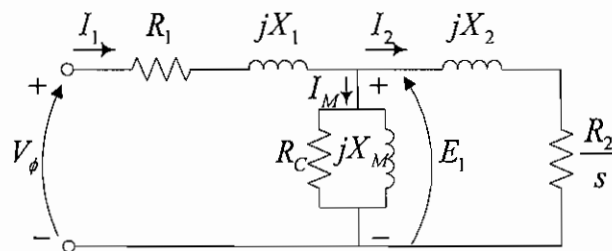
$$Z_2 = \alpha_{eff}^2 \left( \frac{R_R}{s} + jX_{R_0} \right) \tag{2.23}$$

และจะได้

$$R_2 = \alpha_{eff}^2 R_R \tag{2.24}$$

$$X_2 = \alpha_{eff}^2 X_{R_0} \tag{2.25}$$

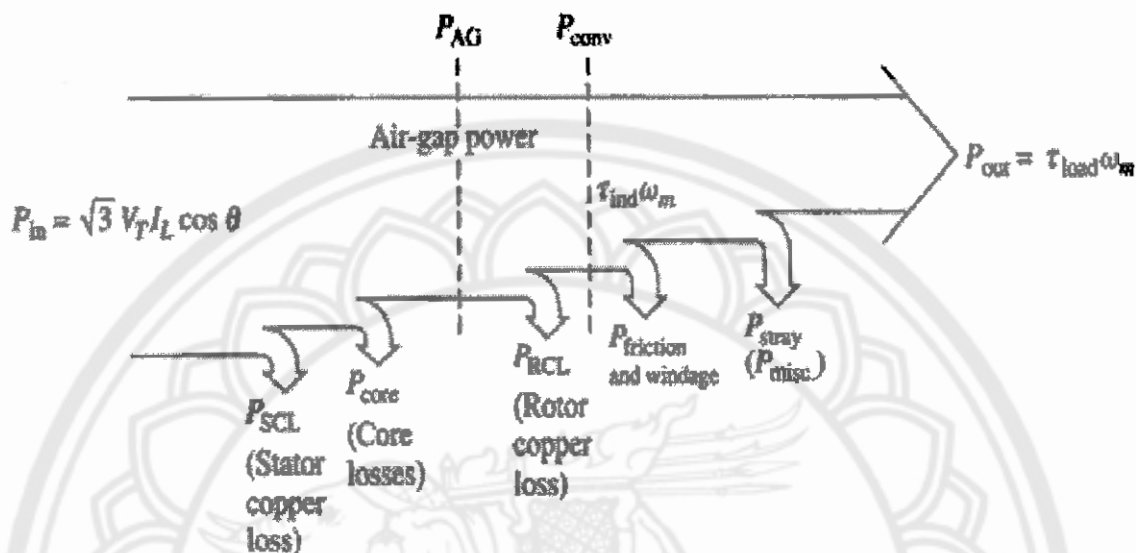
ดังนั้นจะได้วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

## 2.4 กำลังและแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของเครื่องกลเชิงโรนัสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กำลังสูญเสียที่ขดลวดฟیلด์และที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ แต่ในมอเตอร์อินดักชันไม่มีขดลวดฟیلด์จึงไม่มีกำลังสูญเสียในขดลวดฟیلด์ แต่มีกำลังสูญเสียในโรเตอร์เพิ่มขึ้นมาแทน



รูปที่ 2.8 แผนภาพตำแหน่งกำลังสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

### 2.4.1 การสูญเสียและแผนภาพกำลังสูญเสีย

จากรูปที่ 2.8 เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้า  $P_{in}$  (input power) ให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำรวมทั้งเกิดกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง  $P_{SCL}$  (the stator copper loss) และกำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก ( $P_{core}$ ) ของสเตเตอร์ เมื่อสนามแม่เหล็กหมุนที่อยู่ในช่องอากาศ (air gap) ระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ตัดผ่านตัวนำในโรเตอร์จะเกิดกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของโรเตอร์ ( $P_{RCL}$ ) กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศเรียกว่า กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (air gap power) ซึ่งเป็น input power ที่จ่ายให้โรเตอร์ ( $P_{IR}$ ) เมื่อหักค่ากำลังสูญเสียที่กล่าวมาแล้วจะได้กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ ( $P_{IR}$ ) หรือกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล และเมื่อโรเตอร์หมุนจะเกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านจากลม ซึ่งเรียกว่า กำลังสูญเสียทางกล ( $P_{F\&W}$ ) และการสูญเสียจากการจ่ายโหลด ( $P_{misc}$ ) ภายหลังจากหักค่า  $P_{F\&W}$  และ  $P_{misc}$  แล้วก็จะได้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมา  $P_{out}$  (output power)

### 2.4.2 กำลังและแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากวงจรสมมูลเมื่อปิดวงจรสามารถที่จะหาค่ากำลังและทอร์กในสภาวะการทำงานของมอเตอร์ได้ เมื่อป้อนกระแสให้มอเตอร์จะสามารถหาแรงดันของมอเตอร์ได้ได้จากวงจรสมมูลอิมพีแดนซ์

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \quad (2.26)$$

โดยที่

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_C - jB_M + \frac{1}{V_2/s + jX_2}} \quad (2.27)$$

ดังนั้นเราสามารถที่จะหาค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดที่สเตเตอร์ได้จากสมการ

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.28)$$

สามารถหาค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็กได้จากสมการ

$$P_{core} = 3E_1^2 G_C \quad (2.29)$$

และกำลังสูญเสียที่ช่องว่างอากาศหาได้จากสมการ

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \quad (2.30)$$

ที่วงจรมุมล โรเตอร์จะมีขดลวดความต้านทานในวงจรถูกและกำลังในช่องว่างอากาศหาได้จากสมการ โดยคิดจากความต้านทาน  $R_2/s$  ดังนั้นจะได้ว่า กำลังสูญเสียที่ช่องว่างอากาศหาได้จากสมการ

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.31)$$

การสูญเสียที่ความต้านทานในวงจรถูกหาได้จากสมการ

$$P_{RCL} = 3I_R^2 R_R \quad (2.32)$$

หรือ

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2 \quad (2.33)$$

หลังจากที่หาค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กและกำลังสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์กำลังที่เหลือก็จะเปลี่ยนจากกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังทางกลจึงสามารถหาค่ากำลังที่เปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานกลได้จากสมการดังนี้คือ

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{AG} - P_{RCL} \\ &= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 &= 3I_2^2 R_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right) \\
 P_{conv} &= 3I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \tag{2.34}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.31) และ (2.33) นั้นสามารถหาค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ได้จากกำลังในช่องว่างอากาศที่สลิปได้ดังสมการนี้

$$P_{RCL} = sP_{AG} \tag{2.35}$$

ดังนั้นจะได้ว่ามอเตอร์ที่มีค่าสลิปต่ำการสูญเสียที่โรเตอร์ก็จะมีค่าน้อยแต่ถ้าโรเตอร์หยุดนิ่งค่าสลิปก็จะมีค่าเท่ากับ 1 ( $s = 1$ ) และกำลังที่ช่องว่างอากาศทั้งหมดก็จะถูกใช้ไปในโรเตอร์ ถ้าโรเตอร์หยุดหมุนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมา  $P_{out} (= \tau_{load} \omega_m)$  ก็จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจาก  $P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL}$  จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียที่ช่องว่างอากาศและกำลังที่เปลี่ยนแปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 P_{conv} &= P_{AG} - P_{RCL} \\
 &= P_{AG} - sP_{AG} \\
 P_{conv} &= (1-s)P_{AG} \tag{2.36}
 \end{aligned}$$

ท้ายที่สุด ถ้าเรารู้ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านจากลมหรือกำลังสูญเสียทางกลและกำลังสูญเสียเนื่องจากการจ่ายโหลดเราสามารถที่จะหาค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมา  $P_{out}$  ได้จากสมการ

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \tag{2.37}$$

และสามารถหอร์คเหนี่ยวนำได้จากสมการ

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \tag{2.38}$$

จากสมการที่ (2.9) แสดงความเร็วในเทอมของความเร็วซิงโครนัสและสลิปและสมการที่ (2.36)

แสดง  $P_{conv}$  ในเทอมของ  $P_{AG}$  และสลิป นำสมการทั้งสองสมการแทนลงในสมการ (2.38) จะได้

$$\begin{aligned}
 \tau_{ind} &= \frac{(1-s)P_{AG}}{(1-s)\omega_{sync}} \\
 \tau_{ind} &= \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \tag{2.39}
 \end{aligned}$$

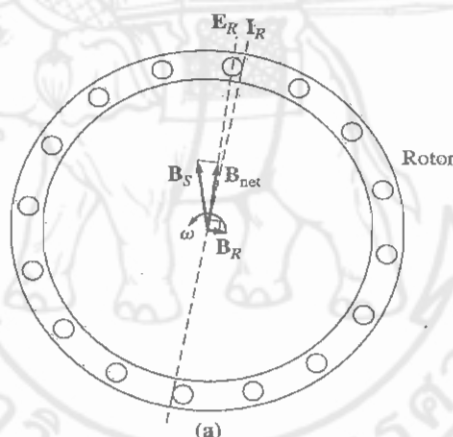
จากสมการที่(2.31) คือสมการที่แสดงกำลังสูญเสียที่ช่องว่างอากาศในมอเตอร์เหนี่ยวนำและสมการที่ (2.33)แสดงกำลังสูญเสียที่โรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ การสูญเสียที่ช่องว่างอากาศคือกำลังสูญเสียในความต้านทานของ  $R_2 / s$  ขณะที่การสูญเสียที่โรเตอร์คือกำลังสูญเสียในความต้านทาน  $R_2$  และผลต่างของการสูญเสียทั้งสองก็คือ  $P_{conv}$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$R_{conv} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right)$$

$$R_{conv} = R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \tag{2.40}$$

### 2.5 คุณสมบัติของแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็วสามารถวิเคราะห์ได้จากการพฤติกรรมที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายใน โรเตอร์ ดังนั้นสมการต่างๆ ไปของแรงบิดจะหาได้จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.9ก. สนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่ไม่มีโหลด

#### 2.5.1 การเหนี่ยวนำให้เกิดแรงบิด

จากรูปที่ 2.9.ก. แสดงหลักการทำงานของโรเตอร์แบบกรงกระรอกในสถานะที่ไม่มีโหลดและมีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส สนามแม่เหล็ก  $B_{net}$  เกิดขึ้นจากกระแสสนามแม่เหล็ก  $I_M$  ที่ไหลในวงจรสมมูล ขนาดของกระแสสนามและสนามแม่เหล็ก  $B_{net}$  จะเป็นสัดส่วนกับแรงดัน  $E_1$  ถ้ากำหนดให้  $E_1$  เป็นค่าคงที่ สนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์ก็จะคงที่ด้วย ซึ่งรวมถึง  $E_1$  ก็จะแปรผันตามโหลด เนื่องจากแรงดันตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ของสเตเตอร์ คือ  $R_1$  และ  $X_1$  แต่อย่างไรก็ตามแรงดันที่ตกคร่อมจะมีค่าน้อยมาก จึงถือเป็นค่าคงที่ได้

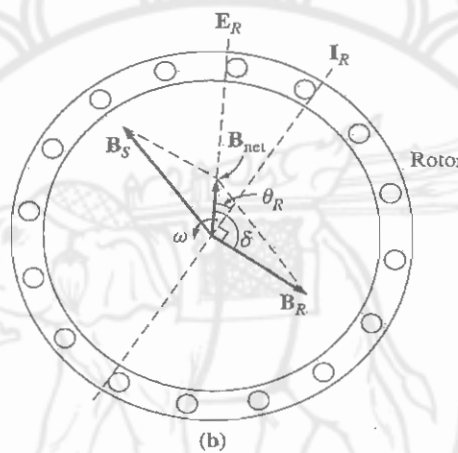
ในสถานะที่ไม่มีโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ความเร็วสลลิปที่โรเตอร์จะมีค่าน้อยมาก ความสัมพันธ์ของการหมุนระหว่างโรเตอร์และสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยมากและความถี่ที่โรเตอร์ก็จะมี

ค่าน้อยมากด้วย อันเนื่องมาจากแรงดัน  $E_R$  ที่ถูกเหนี่ยวนำที่แกนของโรเตอร์และกระแส  $I_R$  ที่ไหลมีค่าน้อยมากเช่นกัน เพราะความถี่ของโรเตอร์มีค่าน้อยจึงทำให้รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และกระแสสูงสุดที่โรเตอร์  $I_R$  จะอินเฟสกับแรงดันที่โรเตอร์  $E_R$  ดังนั้น ผลที่เกิดจากกระแสที่โรเตอร์ จะได้สนามแม่เหล็ก  $B_R$  แรงบิดที่ถูกสร้างขึ้นสามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_{net} \quad (2.41)$$

และหาขนาดได้จาก

$$\tau_{ind} = kB_R B_{net} \sin \delta \quad (2.42)$$



รูปที่ 2.9ข. สนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่มีโหลด

จากรูปที่ 2.9ข. แสดงหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สถานะมีโหลด กระแสที่โรเตอร์และมุม  $\delta$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของ  $B_R$  จะส่งผลทำให้แรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากมุม  $\delta$  ( $\sin \delta, \delta > 90^\circ$ ) และเมื่อแรงบิดเข้าใกล้แรงบิดสูงสุดภาระที่แกนเฟลาจะเพิ่มขึ้นเพราะค่าของ  $\sin \delta$  จะลดลงมากกว่าที่  $B_R$  จะเพิ่มขึ้น ที่สภาวะดังกล่าวแรงบิดเหนี่ยวนำจะลดลงจนมอเตอร์หยุดหมุน จากสมการที่ ( $\tau_{ind} = kB_R B_{net} \sin \delta$ ) เราสามารถพิจารณาถึงพฤติกรรมของมอเตอร์ ได้ดังนี้

1.  $B_R$  สนามแม่เหล็กของโรเตอร์เป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลในแกนโรเตอร์เมื่อโรเตอร์ยังไม่ถึงจุดไม่อิมตัว กระแสที่ไหลในโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของสลิปหรือความเร็วลดลง จากสมการ

$$I_R = \frac{E_{R_0}}{R_R/s + jX_{R_0}}$$

สามารถพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ รูปที่ 2.10ก.

2.  $B_{net}$  สนามแม่เหล็กภายในตัวมอเตอร์เป็นสัดส่วนกับ  $E_1$  และเป็นค่าประมาณคงที่ กราฟเปรียบเทียบระหว่าง  $B_{net}$  และความเร็วเป็นดังรูปที่ รูปที่ 2.10ข.

3.  $\sin \delta$  เป็นมุมระหว่าง  $B_{net}$  และ  $B_R$  จากรูปที่ 2.10ข.จะได้ว่า

$$\delta = \theta_R + 90^\circ \quad (2.43)$$

อย่างไรก็ตาม  $\sin \delta = \sin(\theta_R + 90^\circ) = \cos \theta_R$  ซึ่งเป็นค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของโรเตอร์สามารถหาค่า

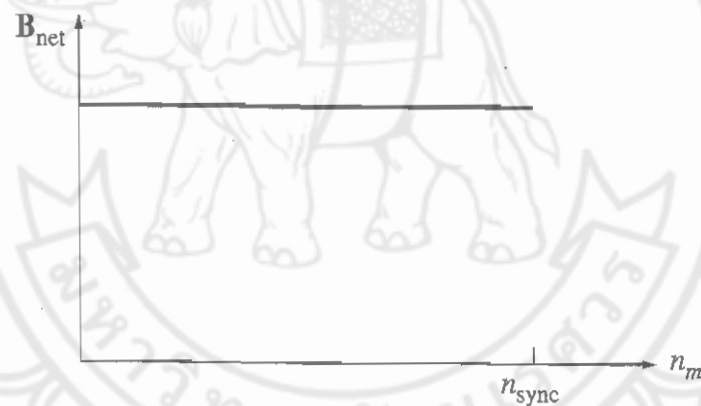
ได้จากสมการนี้คือ

$$\theta_R = \tan^{-1} \frac{X_R}{R_R} \quad (2.44)$$

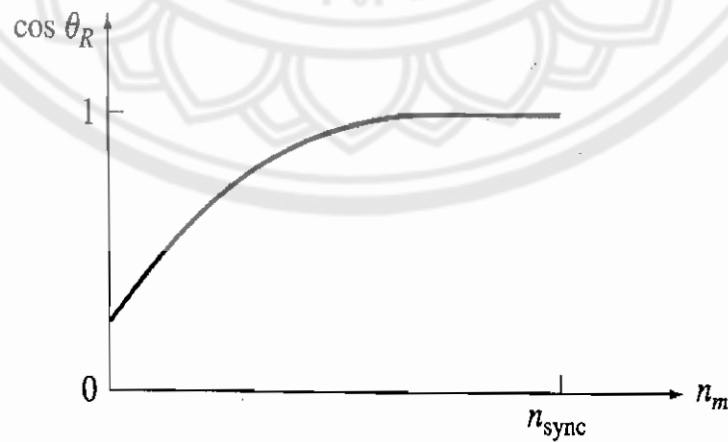
$$= \tan^{-1} sX_{R_0} \quad (2.45)$$



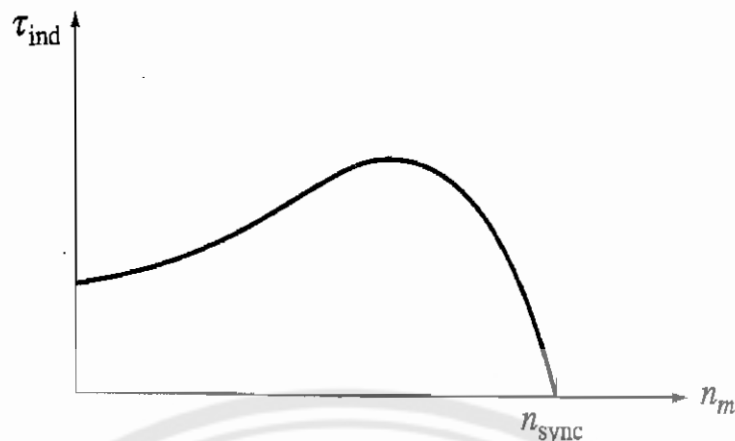
รูปที่ 2.10ก. กราฟเปรียบเทียบกระแสโรเตอร์กับความเร็วในมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.10ข. กราฟเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กกับความเร็วของมอเตอร์



รูปที่ 2.10ค. กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบกำลังโรเตอร์กับความเร็วของมอเตอร์



รูปที่ 2.10ง. กราฟเปรียบเทียบผลของทอร์กกับคุณลักษณะความเร็ว

จะได้ว่า

$$PF_R = \cos \theta_R$$

$$PF_R = \cos \left( \tan^{-1} \frac{sX_{R_0}}{R_R} \right) \quad (2.46)$$

จากสมการ  $(PF_R = \cos \left( \tan^{-1} \frac{sX_{R_0}}{R_R} \right))$  สามารถนำมาพลอตกราฟได้ดังรูปที่ รูปที่ 2.10ค.

เมื่อแรงบิดเหนี่ยวนำเป็นสัดส่วน โดยตรงกับทั้งสามค่าที่กล่าวมานั้น คุณสมบัติของแรงบิด-ความเร็วในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถนำมาอธิบายได้ใหม่ โดยการพล็อตกราฟระหว่างแรงบิด-ความเร็วได้ดังรูปที่ รูปที่ 2.10ง.

จากเส้นโค้งคุณสมบัติที่ได้เราสามารถแบ่งขอบเขตออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเราเรียกว่า “low-slip region” ในช่วงนี้สลลิปของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามโหลดและความเร็วที่โรเตอร์จะลดลงเป็นเชิงเส้นตามโหลดที่เพิ่มขึ้น การทำงานในช่วงนี้จะไม่คำนึงถึงรีแอกแตนซ์ที่โรเตอร์ จึงประมาณว่าค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์มีค่าเป็นหนึ่งเมื่อกระแสที่โรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามค่าสลลิป ช่วงขอบเขตของสถานะการทำงานปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเราถือว่าอยู่ในช่วงนี้ทั้งหมด

ช่วงที่สองของกราฟเราเรียกว่า “moderate slip region” ในช่วงนี้ความถี่ของโรเตอร์จะมีค่าสูงมาก และขนาดของรีแอกแตนซ์มีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานที่โรเตอร์ ในช่วงนี้กระแสของโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นไม่เร็วเท่ากับช่วงแรก ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ก็จะเริ่มลดลงและแรงบิดสูงสุดก็จะเกิดที่จุดเดียวกันนี้ด้วย

ช่วงสุดท้ายของกราฟเราเรียกว่า “high-slip region” เป็นช่วงที่แรงบิดเหนี่ยวนำจะลดลงเมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้น กระแสที่โรเตอร์ก็จะลดลงอย่างมากส่งผลให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ลดลงตามไปด้วย

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ แรงบิดพลเอาท์จะมีค่าเป็น 200 ถึง 250 เปอร์เซ็นต์ของแรงบิดขณะที่มอเตอร์มีภาระสูงสุด และแรงบิดเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 150 เปอร์เซ็นต์หรือมีค่าใกล้เคียงกับแรงบิดขณะที่มอเตอร์มีภาระสูงสุด

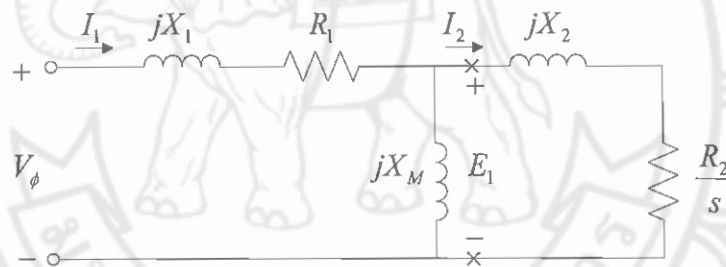
**2.5.2 สมการแรงบิดเหนี่ยวนำที่เกิดจากมอเตอร์เหนี่ยวนำ**

การหาแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์สามารถหาได้จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำและแผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ในการหาแรงบิดเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้คือ

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \tag{2.47}$$

$$= \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \tag{2.48}$$

สมการสุดท้ายจะถูกใช้เมื่อความเร็วเชิงโรตัสเป็นค่าคงที่ เมื่อ  $\omega_{sync}$  เป็นค่าคงที่เราก็จะสามารถเข้าใจได้ว่ากำลังในช่องว่างอากาศจะทำให้เกิดแรงบิดเหนี่ยวนำขึ้นที่มอเตอร์



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

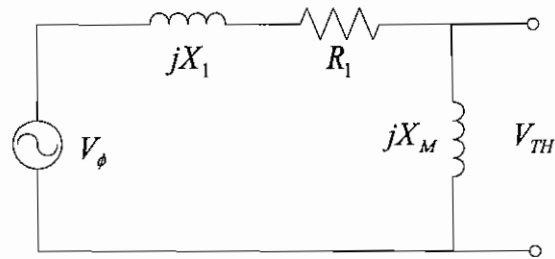
เมื่อกำลังถึงวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.11 จากรูป เป็นวงจร 1 เฟสซึ่งเราจะเห็นได้ว่า

$$P_{AG,1\phi} = I_2^2 \frac{R_2}{s} \tag{2.49}$$

ดังนั้น กำลังที่เกิดในช่องว่างอากาศรวมสามารถหาได้จาก

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \tag{2.50}$$

ถ้าเราหาค่ากระแสได้  $I_2$  เราก็จะทราบค่าของกำลังที่เกิดในช่องว่างอากาศและค่าแรงบิดเหนี่ยวนำ แต่อย่างไรก็ตามเราจะหากระแส  $I_2$  โดยใช้วิธีของเทวินิน



รูปที่ 2.12 วงจรหาแรงดันเทวินิน

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ดังรูปที่ 2.11 จะใช้วิธีของเทวินินในการหาวงจรสมมูลของเทวินินได้โดยใช้กฎการแบ่งแรงดันคือ

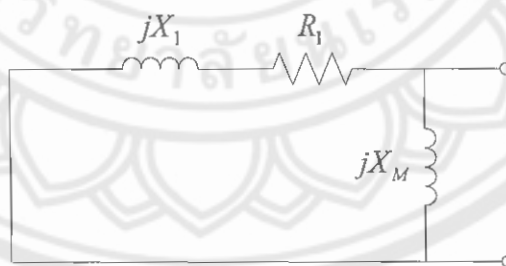
$$\begin{aligned} V_{TH} &= V_\phi \frac{Z_M}{Z_M + Z_1} \\ &= V_\phi \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M} \end{aligned}$$

ขนาดของแรงดันเทวินินคือ

$$V_{TH} = \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} V_\phi \quad (2.51)$$

ถ้า  $X_M \gg X_1$  และ  $X_M \gg R_1$  ขนาดของแรงดันเทวินินสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$V_{TH} = V_\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (2.52)$$



รูปที่ 2.13 วงจรหาอิมพีแดนซ์เทวินิน

หาอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลเทวินินได้จาก

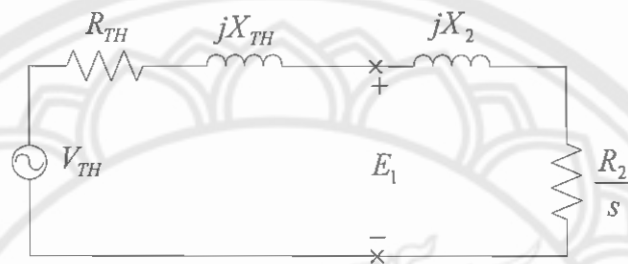
$$\begin{aligned} Z_{TH} &= \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M} \\ Z_{TH} &= R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \end{aligned} \quad (2.53)$$

เพราะ  $X_M \gg X_1$  และ  $X_M + X_1 \gg R_1$  ค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะมีประมาณดังนี้คือ

$$R_{TH} \approx R_1 \left( \frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (2.54)$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (2.55)$$

จะได้วงจรสมมูลดังรูป



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลเทวินิน

จากวงจรจะหาค่ากระแสได้จาก

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} \quad (2.56)$$

$$= \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_2/s + jX_{TH} + jX_2} \quad (2.57)$$

ขนาดของกระแสคือ

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (2.58)$$

หาค่ากำลังในช่องว่างอากาศได้จาก

$$\begin{aligned} P_{AG} &= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \\ &= \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \end{aligned} \quad (2.59)$$

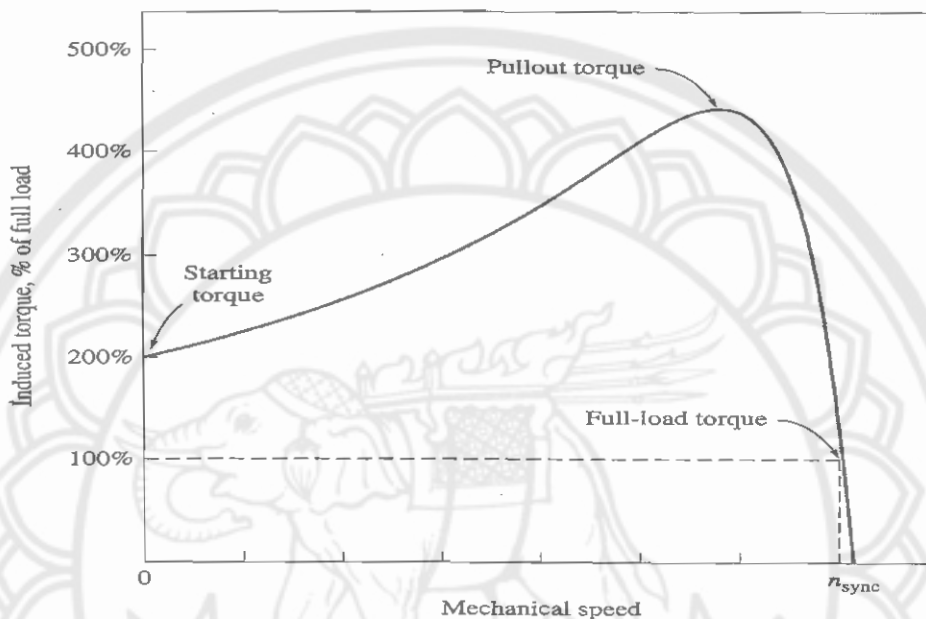
และแรงดันเหนี่ยวนำที่แกนโรเตอร์หาค่าได้จาก

$$\tau_{jnd} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$$



$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_{sync} [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (2.60)$$

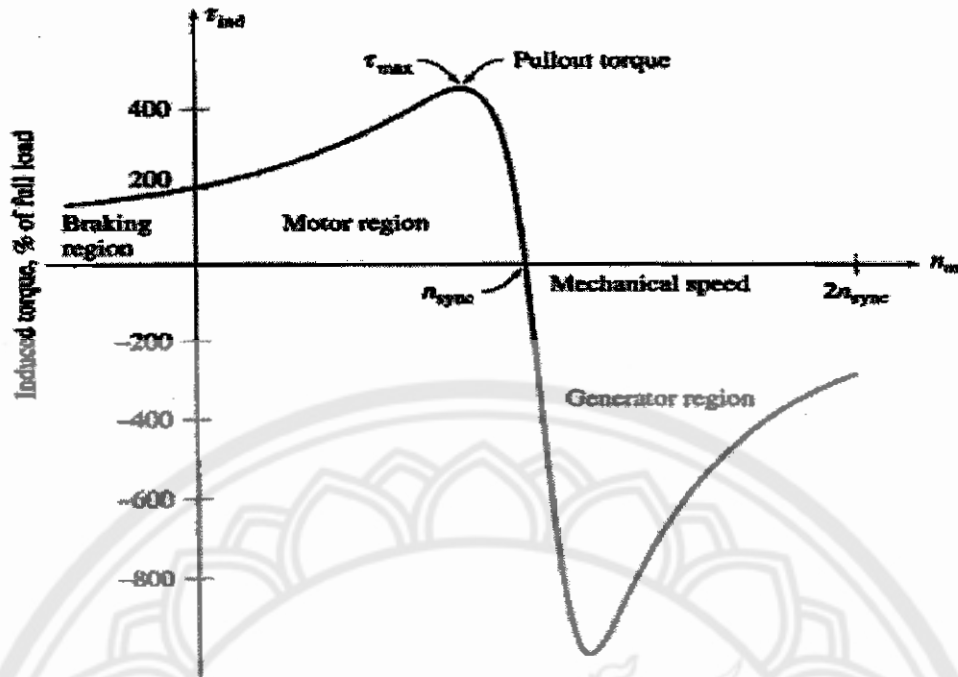
กราฟของแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเทียบกับความเร็ว (และสลิป) จะได้ดังภาพที่ 2.15 และกราฟแสดงความเร็วทั้งสูงและต่ำของมอเตอร์ทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสทำให้ทราบถึงข้อมูลการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังนี้

1. แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นศูนย์ที่ความเร็วซิงโครนัส
2. เส้นโค้งแรงบิด-ความเร็วเกือบเป็นเชิงเส้นในช่วงระหว่างแรงบิดขณะไม่มีโหลดกับแรงบิดขณะที่มีโหลดเต็มที่ ซึ่งจะเรียกช่วงนี้ว่า ย่านการทำงานปกติของมอเตอร์
3. มีแรงบิดสูงสุด แรงบิดนี้เรียกว่า pullout torque หรือ breakdown torque จะมีค่าเป็น 2-3 เท่าของแรงบิดที่พิกัดขณะจ่ายโหลดเต็มที่



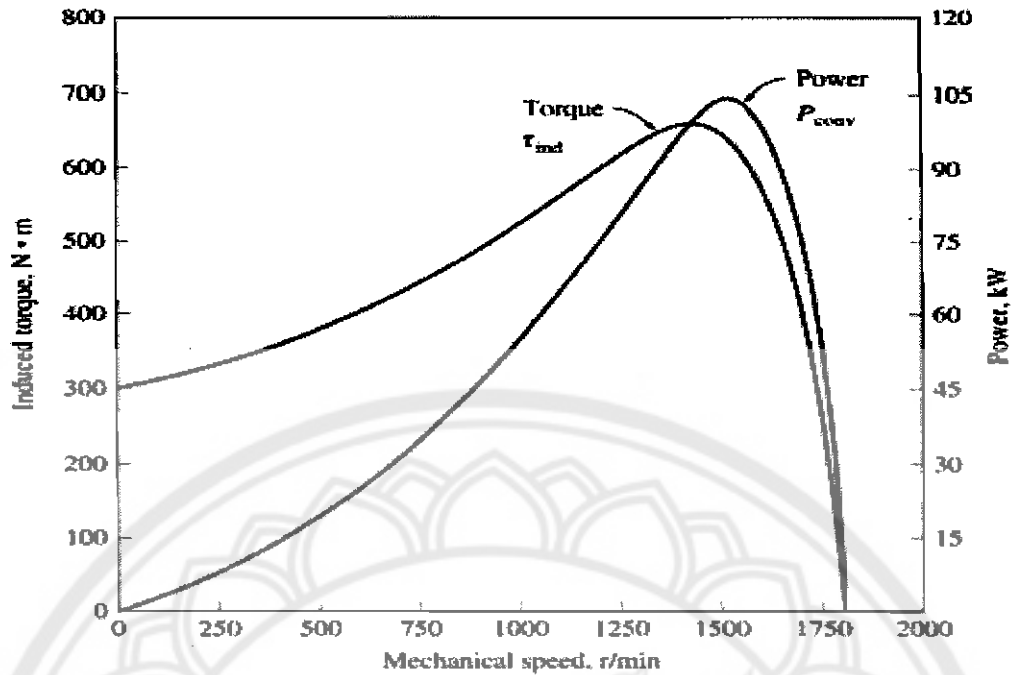
รูปที่ 2.16 เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

4. มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนมากกว่าแรงบิดที่พิกัดเล็กน้อย ดังนั้นมอเตอร์จึงเริ่มต้นขับโหลดหรือต่อกับโหลดขณะเริ่มต้นหมุนได้ทันที โดยแรงบิดที่โหลดนั้นจะต้องไม่มากกว่าแรงบิดที่พิกัด

5. ถ้าโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำถูกขับด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วซิงโครนัส แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์จะกลับทิศทางและมอเตอร์ดังกล่าวจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนกำลังงานกลให้เป็นกำลังงานไฟฟ้า

6. การสลับสายคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนทิศทาง มอเตอร์จึงหมุนกลับทิศทางได้ แต่ก่อนที่จะกลับทิศทางนั้นจะมีอยู่จุดหนึ่งที่มอเตอร์หยุดอยู่กับที่อย่างรวดเร็วซึ่งเราเรียกว่า plugging ซึ่งนำสู่หลักการในการควบคุมมอเตอร์รูปแบบหนึ่ง กำลังงานกลที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทางหมุน หาค่าได้จากสมการ

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m$$



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างทอร์กเหนี่ยวนำและกำลังที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับความเร็วมอเตอร์ในการหมุน 1 รอบ/นาที ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 โพล

จากเส้นโค้งคุณลักษณะจะสังเกตเห็นว่ากำลังสูงสุดที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์เหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นที่ความเร็วมากกว่าจุดที่เกิดค่าแรงบิดสูงสุด และค่ากำลังที่เกิดขึ้นขณะที่มอเตอร์กลับทิศทางการหมุนจะมีค่าเป็นศูนย์

### 2.5.3 แรงบิดสูงสุดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อแรงบิดเหนี่ยวนำที่เกิดในช่องว่างอากาศสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $P_{AG}/\omega_{sync}$  และกำลังที่ช่องว่างอากาศสูงสุดจะมีค่าเท่ากับกำลังตกคร่อมที่รีแอคแตนซ์  $R_2/s$  ก็คือเมื่อค่ารีแอคแตนซ์มีค่าสูงสุด ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อขนาดของรีแอคแตนซ์  $R_2/s$  มีค่าเท่ากับขนาดอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย โดยพิจารณาจากวงจรที่ภาพที่ 2.14 อิมพีแดนซ์ที่แหล่งจ่ายของวงจรสมมูลคือ

$$Z_{source} = R_{TH} + jX_{TH} + jX_2 \quad (2.61)$$

กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดได้เมื่อ

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (2.62)$$

ดังนั้น สลิปที่แรงบิดสูงสุดสามารถหาได้จาก

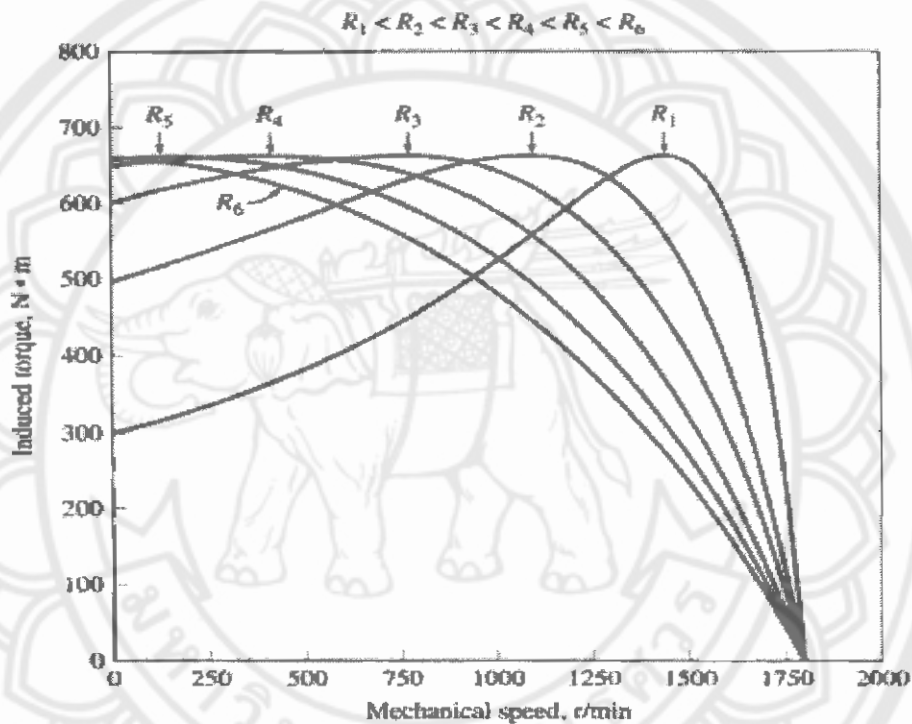
$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (2.63)$$

จากสมการจะเห็นว่าสลิปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ารีซิสแตนซ์ของโรเตอร์

สามารถหาค่าแรงบิดสูงสุดได้จากการแทนค่าสมการที่  $(s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}})$  ลงในสมการ

$(\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_{sync} [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]})$  สมการแรงบิดสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ

$$\tau_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sync} [R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]} \quad (2.64)$$



14360643

ศ.

๑๖/๑๗

๒๕๕๖

รูปที่ 2.18 คุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดควาล์วโรเตอร์

คุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดควาล์วโรเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 2.18 มอเตอร์ชนิดนี้สามารถเพิ่มค่าความต้านทานที่โรเตอร์ได้โดยต่อความต้านทานภายนอกเข้ากับสลิปริง จากภาพจะสังเกตเห็นว่าเมื่อค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ความเร็วรอบต่ำลง แต่ระดับค่าสูงสุดของแรงบิดจะยังคงที่เท่ากับทุกค่าความต้านทาน

ข้อดีของมอเตอร์ชนิดนี้คือสามารถเริ่มเดินได้ขณะที่มีโหลดมากๆ ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มเข้าไปยังวงจรโรเตอร์จะช่วยเพิ่มแรงบิดได้ตามที่ต้องการ แต่ในทางตรงกันข้ามค่าความต้านทานที่ต่อเข้าไปในวงจรจะถูกปลดออกเมื่อแรงบิดหมุนด้วยความเร็วที่เข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัสที่สภาวะการทำงานปกติ

### บทที่ 3

## การสูญเสียในมอเตอร์และการวิเคราะห์อุณหภูมิ

### 3.1 การสูญเสียในมอเตอร์

การสูญเสียในมอเตอร์สามารถแบ่งออกเป็น การสูญเสียในขดลวด การสูญเสียในแกนเหล็ก การสูญเสียทางทางกล และ การสูญเสียจากการจ่ายโหลด

#### 3.1.1 การสูญเสียในขดลวด

เป็นการสูญเสียที่อยู่ในรูปของการสูญเสียทางไฟฟ้า  $I^2R$  ซึ่งจะมีทั้งในโรเตอร์และสเตเตอร์

#### 3.1.2 การสูญเสียในแกนเหล็ก

จะสามารถแบ่งได้เป็น

- การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) การเกิดฮิสเทอรีซิสสูญพันธ์นั้นได้จากการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่จ่ายให้แก่ขดลวดอย่างช้า ๆ ซึ่งเมื่อกระแส เปลี่ยนแปลงไปแต่ละไซเคิล ช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะมีพลังงานบางส่วนไหลออกจากแหล่งจ่ายไปยังกลุ่มขดลวด - แกน และบางส่วนจะไหลกลับสู่แหล่งจ่ายซึ่งพลังงานที่ไหลจากแหล่งจ่ายไปยังกลุ่ม ขดลวด-แกน จะทำให้เกิดพลังงานที่สูญเสียในรูปความร้อน สมการการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส คือ

$$P_h = K_h B_{\max}^n f \quad (3.1)$$

เมื่อ	$K_h$	คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับสารแม่เหล็ก Ferromagnetic และปริมาตรของแกนเหล็ก
	$B_{\max}$	คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด
	$f$	คือ ความถี่ของกระแสที่แปรเปลี่ยนตามเวลา
	$n$	จะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 1.5 – 2.5

- การสูญเสียเนื่องจากกระแสวน (Eddy Current Loss) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอย่างทันทีทันใดในแกนเหล็กจะเกิดกระแส  $i_e$  ไหลรอบเส้นทางปิดซึ่งเรียกว่า “กระแสวน (Eddy Current)” เนื่องจากแกนเหล็กมีความต้านทานจึงเกิดการสูญเสียในรูป  $I^2R$  ขึ้น การสูญเสียเนื่องจากกระแสวนขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็กตามเวลาเขียนสมการได้เป็น

$$P_e = K_e B_{\max}^2 f^2 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $K_e$  คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารและความหนาของมัน โดยความหนาของแผ่นอัดซ้อนอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 5 mm

$B_{\max}$  คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด  
 $f$  คือ ความถี่ของกระแสที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

**3.1.3** การสูญเสียทางกล เนื่องจากแรงเสียดทาน (friction loss) ของตลับลูกปืน และแรงต้านของลมของครีประบายอากาศ (windage loss)

**3.1.4** การสูญเสียจากการจ่ายโหลด (stray load loss) เป็นการสูญเสียเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (leakage flux) ที่เกิดจากกระแสโหลด

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเป็นผลทำให้เกิดค่าความต้านทานในมอเตอร์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าการสูญเสียในขดลวดและกระแสวนซึ่งในรูปของ  $I^2R$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ



### 3.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิ(Thermal Analysis)

การใช้งานมอเตอร์ที่มีความร้อนสูงเป็นเวลานาน ทำให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของมอเตอร์ลดลง ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพิ่ม(Temperature rise) ที่ยอมรับได้ของฉนวนขดลวดและอุณหภูมิของเบร็ง เนื่องจากค่าอุณหภูมิเพิ่มทุก 10 องศา จะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนลดลงครึ่งหนึ่ง และความร้อนสูงยังส่งผลกับความหนืด(Viscosity) ของสารหล่อลื่นในเบร็ง อาจทำให้เบร็งเสียหายจากการขาดสารหล่อลื่นได้เร็วขึ้น ดังนั้นการวัดอุณหภูมิเพื่อป้องกันการใช้งานมอเตอร์ขณะเกิดความร้อนสูงเป็นเวลานานเป็นสิ่งที่จะต้องกระทำ ตามมาตรฐาน IEC 85 ได้แบ่งฉนวนออกเป็นคลาส ดังตัวอย่างในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คลาสของฉนวนตาม IEC 85

คลาส	อุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้ของฉนวน (°C)	อุณหภูมิห้องสูงสุด (°C)	อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดที่ยอมรับได้ (°K)	ค่าเผื่อทางอุณหภูมิ (°C)
Class A	105	40	60	5
Class B	130	40	80	10
Class E	120	40	75	5
Class F	155	40	105	10
Class H	180	40	125	15

หมายเหตุ

- 1 °C (เซลเซียส) เท่ากับ 274.15°K (เคลวิน) มาตรฐาน ISO ได้ระบุหน่วยของสจากาการวัดเป็นเซลเซียส และความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นเคลวิน

- ค่าเผื่อทางอุณหภูมิ เป็นค่าที่เผื่อไว้ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดและอุณหภูมิ ณ จุดร้อนที่สุด (Hottest point) โดย อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดที่ยอมรับได้ = อุณหภูมิสูงสุด – อุณหภูมิห้องสูงสุด – ค่าเผื่อ
- อุณหภูมิเพิ่มทุก 10 องศา คิดจากอุณหภูมิห้องสูงสุด 40 องศา ทำให้อายุของฉนวนลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง โดยอายุการใช้งานของฉนวนสัมพันธ์กับอุณหภูมิเพิ่ม

การวัดอุณหภูมิแบบเปรียบเทียบแนวโน้ม(Trending) เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็วในการประเมินสภาพความร้อนสูงเกิน(Over heat) ในมอเตอร์ สาเหตุหลักของความร้อนสูงเกิน เกิดจากการใช้งานเกินพิกัด เบร็งยึดติดและการเอียงศูนย์ (Misalignment) นอกจากนี้ความผิดปกติอื่นๆที่อาจก่อให้เกิดความร้อนสูงเกินได้คือการระบายความร้อนที่จำกัด อุณหภูมิบรรยากาศโดยรอบสูง อัตราการใช้งาน (Duty cycle) ที่มากเกินไปและแหล่งจ่ายไฟผิดปกติ เช่น แรงดันตก เกินหรือ ไม่สมดุล การวัดอุณหภูมิควรทำ

ในขณะที่มอเตอร์อยู่ในภาวะคงตัว (Steady state) โดยตำแหน่งวัตอุณหภูมิต่างๆที่แนะนำ มีอยู่ 7 ตำแหน่งด้วยกันคือ 3 จุดบริเวณผิวด้านข้างของมอเตอร์ บริเวณแบร์ริงทั้งสองด้าน บริเวณกล่องต่อสายและบริเวณประกบโพล (Coupling)

การวัดอุณหภูมียังมีปัจจัยต่างๆที่มีผลกับการวิเคราะห์ เช่น โพลด อุณหภูมิห้อง ความร้อนจากรังสีจากดวงอาทิตย์ และตำแหน่งที่วัด อุณหภูมิเพิ่มเป็นผลของกำลังสูญเสียต่างๆเช่น แรงเสียดทาน (Bearing friction) แรงลมต้านการหมุน (Windage) ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) การสูญเสียในขดลวด (Copper loss หรือ  $I^2R$  loss) และ Stray load loss ซึ่ง Stray load loss และ Copper loss จะขึ้นอยู่กับโพลด โดยการสูญเสียในขดลวดถือว่ามากที่สุดและอยู่ในรูปของความร้อน ดังนั้นในการวิเคราะห์ปัญหาความร้อนแบร์ริงและที่ผิวของมอเตอร์แบบแนวโน้มจึงจำเป็นต้องนำสถานะโพลดมาพิจารณาด้วย สิ่งที่ต้องตระหนักคืออุณหภูมิห้องยิ่งสูง ทำให้ผิวของมอเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นตาม นอกจากนี้ความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ขณะใช้งานภายใต้แสงแดด ความหนาและคุณสมบัติของโลหะก็ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิที่วัดได้ เพื่อหลีกเลี่ยงหรือลดผลกระทบดังกล่าว การวัดอุณหภูมิผิว ควรวัดในตำแหน่งที่ไม่ได้รับแสง และอยู่ต่ำกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวนอน อีกปัจจัยที่สำคัญ ที่มีผลต่ออุณหภูมิผิวคือตำแหน่งวัด โดยทั่วไปตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดคือตำแหน่งที่มีมวลมากที่สุดและการระบายความร้อนทำได้น้อยสุด

ดังนั้นในมอเตอร์แบบเปิด (Open enclosure) ตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่กลางมอเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์แบบปิด (Totally enclose) ตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงสุดคือตำแหน่งใดก็ตามที่อยู่ระหว่างกึ่งกลางถึงตำแหน่งที่ได้รับลมระบายความร้อนจากพัดลมน้อยที่สุดอุณหภูมิมอเตอร์รอบแนวรัศมีจะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะการระบายความร้อน รวมถึงระยะห่างของสเตเตอร์กับตัวเรือนมอเตอร์จะมีค่าไม่เท่ากันตลอดแนวรัศมีมอเตอร์ ยิ่งสเตเตอร์อยู่ห่างจากโครงมอเตอร์น้อยเท่าใด ค่าที่วัดได้ก็จะคงที่และถูกต้องมากขึ้น ในการวัดอุณหภูมิผิวแบบเปรียบเทียบแนวโน้มควรทำการวัดในตำแหน่งเดิมหรือใกล้เคียงกับตำแหน่งเดิมทุกครั้ง และควรเลือกวัดในตำแหน่งที่สเตเตอร์อยู่ใกล้กับโครงมอเตอร์มากที่สุด ในการพิจารณาอุณหภูมิเพิ่มของมอเตอร์สำหรับการวิเคราะห์แบบเปรียบเทียบแนวโน้ม เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิห้องและสถานะโพลด ค่าอุณหภูมิเพิ่มหลังชดเชยผลของโพลด (Normalized temperature rise) จะเป็นดังนี้

$$T_N = \frac{T_{pt} - T_{amp}}{\%load} \times 100 \quad (3.3)$$

ซึ่ง  $T_N$  คือ Normalized temperature rise mm  
 $T_{pt}$  คือ อุณหภูมิที่วัดได้



$T_{amb}$  คือ อุณหภูมิบรรยากาศ

%load คือ ร้อยละของโหลดขณะทำการวัดเทียบกับโหลดสูงสุดของมอเตอร์

ในการวิเคราะห์แบบแนวโน้ม การเพิ่มขึ้นของค่า Normalized temperature rise แสดงถึงความผิดปกติและความรุนแรงของปัญหา

การวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยวิธีความต้านทาน

วิธีนี้เป็นการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวด จากความต้านทานของขดลวดที่เพิ่มขึ้น การวัดอุณหภูมิของขดลวดมักใช้วิธีความต้านทาน วิธีนี้ใช้หาค่าอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่าความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิที่ถูกละกับค่าความต้านทานที่รู้ค่าของอุณหภูมิแล้ว อุณหภูมิของขดลวดคำนวณได้จากสมการ

$$T_i = T_b + \left( \frac{R_i - R_b}{R_b} \right) \times (T_b + k) \quad (3.4)$$

- เมื่อ  $R_i$  = เป็นค่าความต้านทาน (โอห์ม) เมื่อ  $T_i$  ถูกวัด  
 $R_b$  = เป็นค่าอ้างอิงของความต้านทานก่อนถูกวัด (โอห์ม) ที่รู้ค่าของอุณหภูมิ  $T_b$   
 $k$  = เป็นค่าคงที่ของเนื้อโลหะ ซึ่งหากเป็นทองแดงจะมีค่าเท่ากับ 234.5  
 หากเป็นอลูมิเนียมจะมีค่าเท่ากับ 225  
 $T_i$  = เป็นอุณหภูมิของขดลวด ( $^{\circ}\text{C}$ ) ระหว่างการวัด  
 $T_b$  = เป็นอุณหภูมิของขดลวด เมื่อค่าอ้างอิงของความต้านทาน  $R_b$  ถูกวัด ( $^{\circ}\text{C}$ )

ความต้านทานของขดลวดที่ร้อนขึ้นหลังจากหยุดเครื่องจะถูกวัดโดยทันที เพื่อให้ได้ค่าที่เที่ยงตรงในการคำนวณกำลังสูญเสียในการหาอุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยวิธีความต้านทาน ได้กำหนดเวลาที่จะต้องวัดไม่เกินค่าดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เวลาล่าช้าในการวัด

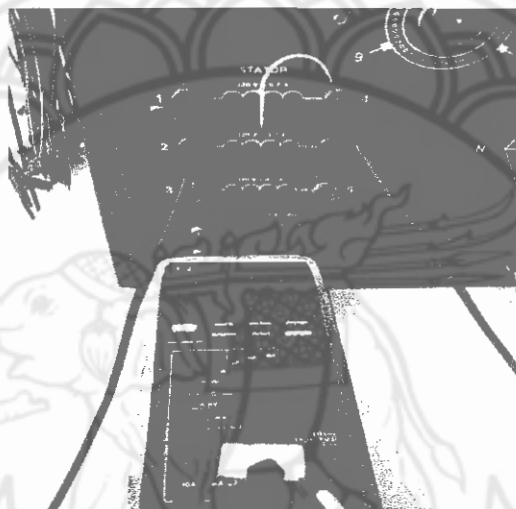
พิกัดมอเตอร์ (แรงม้า)	เวลาที่ล่าช้า (วินาที)
ไม่เกิน 50	30
51 – 200	90
มากกว่า 200	120

## บทที่ 4

# การทดสอบและวิเคราะห์มอเตอร์กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

### 4.1 การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( Stator resistance test ) ทำได้โดยใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์โดยใช้โอห์มมิเตอร์



รูป 4.1 การวัดความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส

#### 4.1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำวาล์วโรเตอร์อินดักชั่นมอเตอร์ (Wound rotor induction motor) อ้างอิงกับอุณหภูมิ
2. เพื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel-Cage induction motor) อ้างอิงกับอุณหภูมิ

#### 4.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำวาล์วโรเตอร์อินดักชั่นมอเตอร์ (Wound rotor induction motor)
2. ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel-Cage induction motor)
3. ชุดโอห์มมิเตอร์
4. สายต่อวงจร (Connection leads)
5. เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิ

### 4.1.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อ โอมมิเตอร์กับชุดขดลวดมอเตอร์
2. บันทึกค่าความต้านทานและอุณหภูมิที่อ่านได้

### 4.1.4 การคำนวณ

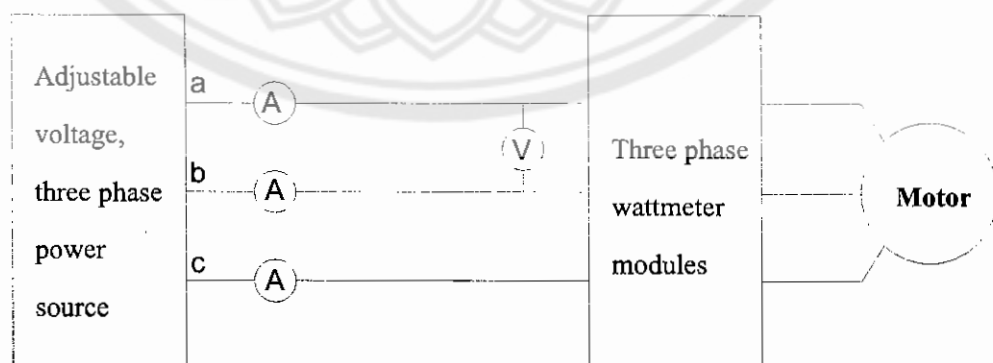
จากการวัดความต้านทานแต่ละเฟสของขดลวดสเตเตอร์จะได้  $R_{S,1}$ ,  $R_{S,2}$  และ  $R_{S,3}$  ดังนั้น จะได้ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟสดังสมการ 4.1

$$R_S = \frac{R_{S,1} + R_{S,2} + R_{S,3}}{3} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $R_{S,1}$  = ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ชุดที่ 1  
 $R_{S,2}$  = ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ชุดที่ 2  
 $R_{S,3}$  = ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ชุดที่ 3  
 $R_S$  = ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส

### 4.2 การทดสอบมอเตอร์สภาวะไม่มีโหลด

การทดสอบนี้เป็นการควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนที่ความเร็วพิกัดโดยไม่มีโหลด ต่ออยู่ที่เพลลาของมอเตอร์ดังนั้น  $n_r$  จึงสูง ส่งผลให้  $s$  ต่ำนอกจากนี้กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์มีค่าต่ำมากเช่นกันจึงไม่คิดค่าความสูญเสียในส่วนนี้ การทดสอบในสภาวะไม่มีโหลดมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของสเตเตอร์กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความฝืดและแรงลมต้านและกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะไม่มีโหลดคือการควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำวิ่งที่ความเร็วพิกัดตามขนาดของแรงดันตามพิกัดโดยไม่มีโหลดอยู่ที่เพลลาของมอเตอร์ และใช้เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าวัดแรงดันระหว่างสายและวัดแรงดันในสายดังรูป 4.2



รูป 4.2 วงจรทดสอบ

#### 4.2.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลด ( $I_{S,NL}$ )
2. เพื่อหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นทางทางกล ( $P_{F&W}$ )

#### 4.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

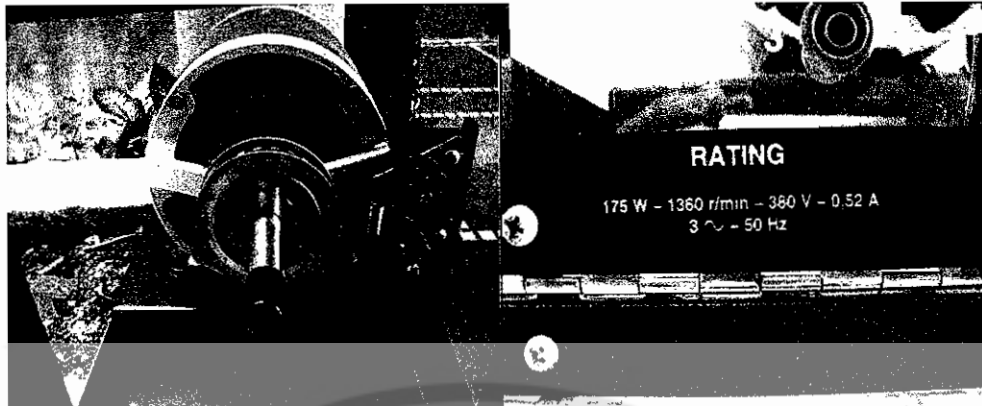
1. ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำวาล์วโรเตอร์อินดักชันมอเตอร์ (Wound Rotor Induction Motor)
2. ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel-Cage induction motor)
3. ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply Modoles)
4. ชุดวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส (Three-phase wattmeter modules)
5. ชุดมิเตอร์วัดกระแสไฟสลับ (AC Metering modoles (1.5 / 5 / 15 A))
6. ชุดมิเตอร์วัดแรงดันไฟสลับ (AC Metering modoles (250 V))
7. สายต่อวงจร (Connection leads)



รูปที่ 4.3 ชุดวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส (Three-phase wattmeter modules)



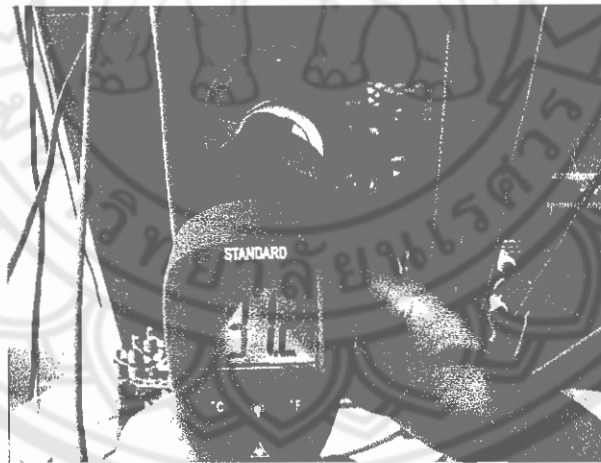
รูปที่ 4.4 ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำวาล์วโรเตอร์อินดักชันมอเตอร์  
(Wound rotor induction motor)



รูปที่ 4.5 ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel-Cage induction motor)

#### 4.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อบริการทดสอบ โดยต่อชุดมอเตอร์เข้ากับชุดแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 3 เฟส ชุดมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและชุดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ตามรูปที่ 4.2
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์โดยค่อยๆปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจนถึงค่าแรงดันพิกัด
3. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และความเร็วรอบที่ได้ตามช่วงเวลาต่างๆตามเวลาที่กำหนดไว้
4. คำนวณค่าความสูญเสียและพารามิเตอร์ต่างๆที่ต้องการทราบ



รูปที่ 4.6 การวัดอุณหภูมิมอเตอร์

#### 4.2.4 การคำนวณ

ค่าที่วัดได้ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ขณะไม่มีโหลด:  $I_{S1,NL}$ ,  $I_{S2,NL}$  และ  $I_{S3,NL}$   
 ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าในสถานะไม่มีโหลด:  $P_{In,NL}$

จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดต่อเฟสเฉลี่ยดังสมการที่ 4.2

$$I_{S,NL} = \frac{I_{S1,NL} + I_{S2,NL} + I_{S3,NL}}{3} \quad (4.2)$$

เนื่องจากไม่มีกำลังด้านออก ( $P_{out}$ ) จึงทำให้กำลังที่สูญเสียทั้งหมด ( $P_{i,NL}$ ) เท่ากับกำลังสูญเสียด้านเข้า ขณะไม่มีโหลด ( $P_{m,NL}$ )

$$P_{m,NL} = P_{i,NL} \quad (4.3)$$

สามารถหาค่าการสูญเสียทางกล ( $P_{F\&W}$ ) ได้จากการประมาณค่าเนื่องจากในมอเตอร์ทั่วไปจะมี ค่าการสูญเสียทางกล ( $P_{F\&W}$ ) อยู่ 6% ของการสูญเสียทั้งหมด จะได้

$$P_{F\&W} = 0.06P_{i,NL} \quad (4.4)$$

### 4.3 ทดสอบมอเตอร์สถานะที่มีโหลด

การทดสอบนี้เป็นการควบคุมมอเตอร์ให้ขับ โหลดซึ่งต่ออยู่ที่เพลามอเตอร์โดยทดสอบที่โหลด 50%, 75% และ 100% ของพิกัดโหลด

#### 4.3.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาค่าพลังงานสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ ( $P_{SCL}$ ) ขณะมอเตอร์มีโหลดขนาดต่างๆ
2. เพื่อหาค่าสลิปมอเตอร์ ( $s$ )
3. เพื่อหาค่าพลังงานสูญเสียในขดลวด โรเตอร์ ( $P_{RCL}$ ) ขณะมอเตอร์มีโหลดขนาดต่างๆ
4. เพื่อหาค่าพลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{core}$ ) ขณะมอเตอร์มีโหลดขนาดต่างๆ
5. เพื่อหาค่าพลังงานสูญเสียจาก Stay load ( $P_{misc}$ ) ขณะมอเตอร์มีโหลดขนาดต่างๆ
6. เพื่อหาค่าพลังงานสูญเสียรวม ( $P_{total}$ ) ขณะมอเตอร์มีโหลดขนาดต่างๆ
7. เพื่อหาประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) ขณะมอเตอร์มีโหลดขนาดต่างๆ

#### 4.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำวาล์วโรเตอร์อินดักชั่นมอเตอร์ (Wound rotor induction motor)
2. ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel-Cage induction motor)
3. ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply modules)
4. ชุดวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส (Three-phase wattmeter modules)
5. ชุดมิเตอร์วัดกระแสไฟสลับ (AC Metering modules (1.5 / 5 / 15 A))
6. ชุดมิเตอร์วัดแรงดันไฟสลับ (AC Metering modules (250 V))
7. สายต่อวงจร (Connection leads)
8. ชุดอิเล็กทรอนิกส์ไดนาโมมิเตอร์

### 4.3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจรมอเตอร์ดังรูป 4.2 โดยใส่สายพานเข้ากับชุดอิเล็กทรอนิกส์ไดนาโมมิเตอร์
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์โดยค่อยๆปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจนถึงค่าแรงดันพิกัด
3. ปรับชุดอิเล็กทรอนิกส์ไดนาโมมิเตอร์เพื่อให้โหลดกับมอเตอร์โดยปรับให้มีค่าทอร์กที่ 50%, 75% และ 100%
4. บันทึกที่ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และความเร็วรอบที่ได้ตามช่วงเวลาต่างๆตามเวลาที่กำหนดไว้
5. คำนวณค่าความสูญเสียและพารามิเตอร์ต่างๆที่ต้องการทราบ

### 4.3.4 การคำนวณ

ค่าที่วัดได้ คือ	ค่ากระแสไฟฟ้าขณะมีโหลดต่อเฟส	: $I_{S1}, I_{S2}$ และ $I_{S3}$
	ค่ากำลังไฟฟ้าขณะมีโหลด	: $P_m$
	ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์	: $n_r$
	อุณหภูมิที่ได้จากการวัด	: $T_t$

จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าขณะมีโหลดต่อเฟสเฉลี่ย

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} \quad (4.4)$$

ค่า  $R_s$  ที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อ 3.1 และจากสมการหาค่าอุณหภูมิสามารถนำมาหา  $R_t$  ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้ตามสมการ

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] \quad (4.5)$$

- เมื่อ  $R_t$  = เป็นค่าความต้านทาน (โอห์ม) เมื่อ  $T_t$  ถูกวัด  
 $R_b$  = เป็นค่าอ้างอิงของความต้านทานก่อนถูกวัด (โอห์ม) ที่รู้ค่าของอุณหภูมิ  $T_b$   
 $k$  = เป็นค่าคงที่ของเนื้อ โลหะ ซึ่งหากเป็นทองแดงจะมีค่าเท่ากับ 234.5  
 หากเป็นอลูมิเนียมจะมีค่าเท่ากับ 225  
 $T_t$  = เป็นอุณหภูมิของขดลวด ( $^{\circ}\text{C}$ ) ระหว่างการวัด  
 $T_b$  = เป็นอุณหภูมิของขดลวด เมื่อค่าอ้างอิงของความต้านทาน  $R_b$  ถูกวัด ( $^{\circ}\text{C}$ )

ค่าพลังงานสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์หาได้จาก

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_S \quad (4.6)$$

ค่าสลิปของมอเตอร์สามารถหาได้จาก

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \quad (4.7)$$

เมื่อ  $n_{sync}$  คือความเร็วซิงโครนัส

ค่าพลังงานสูญเสียในแกนเหล็กสามารถหาได้จาก

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_S - P_{F\&W} \quad (4.8)$$

เมื่อ  $P_{SCL,NL}$  = กำลังสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ขณะไม่มีโหลด

ค่าพลังงานสูญเสียในขดลวดโรเตอร์หาได้จาก

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) \quad (4.9)$$

และค่า Stay load loss ( $P_{misc}$ ) หาได้จาก

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r} \quad (4.10)$$

เมื่อ  $P_r$  = กำลังที่พิกัดของมอเตอร์

ดังนั้น กำลังสูญเสียทั้งหมด ( $P_{tl}$ ) จะได้

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} \quad (4.11)$$

สามารถหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ ( $\eta$ ) ได้จาก

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 \quad (4.12)$$



## บทที่ 5

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 5.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกกับ อุณหภูมิ

- บันทึกค่าพิกัดต่างๆ ของมอเตอร์

ตารางที่ 5.1 ค่าพิกัดต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก

$P_{out}$	$n_{m,Rate}$	$V_{Rate}$	$I_{Rate}$	$f$	$P$
175 W	1360 rpm	380 V	0.53 A	50 Hz	4 poles

จากค่าพิกัดต่างๆ ที่ได้ คำนวณหาค่าความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed)

$$n_{sync} = \frac{120f}{P} = 1500 \text{ rpm}$$

- ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์

ตารางที่ 5.2 ค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 31.5 °C

ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์	$\Omega$
$R_{S1}$	44.5
$R_{S2}$	44.5
$R_{S3}$	44.4
$R_S = \frac{R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}}{3}$	44.5

ดังนั้นจากสมการ

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right]$$

จะได้ค่า  $T_b = 31.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$R_b = 44.5 \text{ } \Omega$$

$$k = 234.5$$

- ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกสถานะที่ไม่มีโหลด
- ตารางที่ 5.3 ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์แบบโรเตอร์กรงกระรอกสถานะที่ไม่มีโหลด

time (min)	$T_i$ (°C)	$I_{S1,NL}$ (A)	$I_{S2,NL}$ (A)	$I_{S3,NL}$ (A)	$W_1$ (W)	$W_2$ (W)	$n_m$ (rpm)
0	27.0	0.30	0.35	0.30	-40	80	1495
15	29.7	0.30	0.35	0.30	-40	80	1495
30	30.2	0.30	0.35	0.30	-40	80	1495
45	30.0	0.30	0.35	0.30	-40	80	1495
60	30.8	0.30	0.35	0.30	-40	80	1495
75	31.7	0.30	0.35	0.30	-40	80	1495
90	33.3	0.30	0.35	0.30	-40	80	1495
105	33.9	0.30	0.35	0.30	-40	80	1495
120	34.1	0.30	0.35	0.30	-40	80	1495

จากการทดสอบสถานะที่ไม่มีโหลด จะได้

$$I_{S,NL} = \frac{I_{S1,NL} + I_{S2,NL} + I_{S3,NL}}{3} = \frac{0.30 + 0.35 + 0.30}{3} = 0.32 \text{ A}$$

$$P_{in,NL} = W_1 + W_2 = -40 + 80 = 40 \text{ W}$$

ดังนั้น จะได้กำลังสูญเสียทางกล ( $P_{F\&W}$ ) เป็น

$$P_{F\&W} = 0.06P_{total} = 0.06P_m = 0.06(40) = 2.4 \text{ W}$$

- ผลการทดสอบมอเตอร์สถานะที่มีโหลด 50% ของพิกัดโหลด

$$\text{จาก } T_{shaft} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{P_{out}}{\left(\frac{2\pi n_m}{60}\right)} = \frac{P_{out} \times 60}{2\pi n_m}$$

จะได้  $T_{shaft}$  ที่ค่าโหลด 100 %

$$T_{shaft,FL} = \frac{(P_{out}) \times 60}{2\pi(n_{m,Rate})} = \frac{(175)(60)}{2\pi(1360)} = 1.23 \text{ N-m}$$

ดังนั้น  $T_{shaft}$  ที่ค่าโหลด 50 % = 0.62 N-m

ตารางที่ 5.4 ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกสถานะที่มีโหลด 50% ของพิกัดโหลด

time (min)	$T_t$ (°C)	$I_{S1}$ (A)	$I_{S2}$ (A)	$I_{S3}$ (A)	$W_1$ (W)	$W_2$ (W)	$n_m$ (rpm)
0	31.5	0.49	0.48	0.39	27	150	1430
15	39.9	0.49	0.48	0.39	26	149	1429
30	43.8	0.49	0.48	0.39	25	147	1429
45	45.3	0.49	0.48	0.39	25	147	1428
60	46.4	0.49	0.48	0.39	25	147	1428
75	47.5	0.49	0.48	0.39	25	147	1428
90	47.6	0.49	0.48	0.39	25	147	1428
105	47.7	0.49	0.48	0.39	25	147	1428
120	47.7	0.49	0.48	0.39	25	147	1428

จากผลการทดลองได้นำมาคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเฟส ( $I_S$ ), ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้า ( $P_{in}$ ), ค่าสลิป ( $s$ ), ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ ( $P_{SCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก ( $P_{core}$ ), ค่ากำลังสูญเสียจาก Stay Load ( $P_{misc}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่โรเตอร์ ( $P_{RCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียรวม ( $P_{II}$ ) และประสิทธิภาพมอเตอร์ ( $\eta$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆได้

ที่  $T_t = 31.5^\circ\text{C}$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.49 + 0.48 + 0.39}{3} = 0.45 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 27 + 150 = 177 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1430}{1500} = 0.0467$$

$$R_S = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{31.5 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 44.50 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_S = 3(0.45)^2 (44.50) = 27.44 \quad \text{W}$$

$$\begin{aligned} P_{core} &= P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_S - P_m \\ &= 40 - 3(0.32)^2 44.50 - 2.4 = 23.93 \quad \text{W} \end{aligned}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.047(177 - 27.44 - 23.93) = 5.86 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.0467)(177 - 27.44 - 23.93 - 2.4)]^2}{175} = 0.39 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 27.44 + 5.86 + 23.93 + 2.4 + 0.39 = 60.02 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{177 - 60.02}{177} \times 100 = 66.09 \%$$

$$\hat{v} T_t = 39.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.49 + 0.48 + 0.39}{3} = 0.45 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 26 + 149 = 177 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1429}{1500} = 0.0473$$

$$R_t = R_b + \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{39.9 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 45.91 \text{ } \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.45)^2 (45.91) = 28.30 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m$$

$$= 40 - 3(0.32)^2 (45.91) - 2.4 = 23.50 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.0473(175 - 28.30 - 23.50) = 5.83 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.042)(175 - 28.30 - 23.50 - 2.4)]^2}{175} = 0.38 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 28.30 + 5.83 + 23.50 + 2.4 + 0.38 = 60.41 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_m - P_{ul}}{P_{in}} \times 100 = \frac{175 - 60.41}{175} \times 100 = 65.48 \%$$

$$\hat{1} T_t = 43.8^\circ\text{C}$$

$$I_s = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.49 + 0.48 + 0.39}{3} = 0.45 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 147 = 172 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1429}{1500} = 0.0473$$

$$R_t = R_b + \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{43.8 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 46.56 \ \Omega$$

$$P_{SCL} = I_s^2 R_s = (0.45)^2 (45.56) = 28.70 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} P_{core} &= P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ &= 40 - 3(0.32)^2 45.56 - 2.4 = 23.30 \text{ W} \end{aligned}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.0473(172 - 28.70 - 23.30) = 5.68 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} P_{misc} &= \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r} \\ &= \frac{0.005[(1-0.0473)(172 - 28.70 - 23.30 - 2.4)]^2}{175} = 0.36 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{ul} &= P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc} \\ &= 28.70 + 5.68 + 23.30 + 2.4 + 0.36 = 60.44 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{ul}}{P_{in}} \times 100 = \frac{172 - 60.44}{172} \times 100 = 64.86 \%$$

$$\hat{2} T_t = 45.3^\circ\text{C}$$

$$I_s = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.49 + 0.48 + 0.39}{3} = 0.45 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 147 = 172 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1428}{1500} = 0.0480$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{45.3 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 46.81 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.45)^2 (46.81) = 28.86 \quad \text{W}$$

$$\begin{aligned} P_{core} &= P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ &= 40 - 3(0.32)^2 (46.81) - 2.4 = 23.22 \quad \text{W} \end{aligned}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.0480(172 - 28.86 - 23.22) = 5.76 \quad \text{W}$$

$$\begin{aligned} P_{misc} &= \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r} \\ &= \frac{0.005[(1-0.0480)(172 - 28.86 - 23.22 - 2.4)]^2}{175} = 0.36 \quad \text{W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{dl} &= P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc} \\ &= 28.86 + 5.76 + 23.22 + 2.4 + 0.36 = 60.59 \quad \text{W} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{dl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{172 - 60.59}{172} \times 100 = 64.77 \quad \%$$

$$\hat{n} T_t = 46.4 \quad ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.49 + 0.48 + 0.39}{3} = 0.45 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 147 = 172 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1428}{1500} = 0.0480$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{46.4 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 46.99 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.45)^2 (46.99) = 28.97 \quad \text{W}$$

$$\begin{aligned} P_{core} &= P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ &= 40 - (3 \times 0.32^2 \times 46.99) - 2.4 = 23.16 \quad \text{W} \end{aligned}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.0480(172 - 28.97 - 23.16) = 5.75 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.0480)(172 - 28.97 - 23.16 - 2.4)]^2}{175} = 0.36 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 28.97 + 5.75 + 23.16 + 2.4 + 0.36 = 60.65 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{172 - 60.65}{172} \times 100 = 64.74 \%$$

$$T_i = 47.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.49 + 0.48 + 0.39}{3} = 0.45 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 147 = 172 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1428}{1500} = 0.0480$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_i - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{47.5 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.18 \text{ } \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.45)^2 (47.18) = 29.09 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m$$

$$= 40 - 3(0.32)^2 47.18 - 2.4 = 23.11 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.0480(172 - 29.09 - 23.11) = 5.75 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.0480)(172 - 29.09 - 23.11 - 2.4)]^2}{175} = 0.36 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 29.09 + 23.11 + 5.75 + 2.4 + 0.36 = 60.70 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{172 - 60.70}{172} \times 100 = 64.71\%$$

$$\text{ที่ } T_t = 47.6^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.49 + 0.48 + 0.39}{3} = 0.45 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 147 = 172 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1428}{1500} = 0.0480$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{47.6 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.19 \ \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.45)^2 (47.19) = 29.10 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ = 40 - 3(0.32)^2 47.19 - 2.4 = 23.10 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.0480(172 - 29.10 - 23.10) = 5.75 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.0480)(172 - 29.10 - 23.10 - 2.4)]^2}{175} = 0.36 \text{ W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc} \\ = 29.10 + 5.75 + 23.10 + 2.4 + 0.36 = 60.71 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{172 - 60.71}{172} \times 100 = 64.71 \%$$

$$\text{ที่ } T_t = 47.7^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.49 + 0.48 + 0.39}{3} = 0.45 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 147 = 172 \text{ W}$$



$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1428}{1500} = 0.0480$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{47.7 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.21 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.45)^2 (47.21) = 29.11 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ = 40 - 3(0.32)^2 47.21 - 2.4 = 23.10 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCu} - P_{core}) = 0.0480(172 - 29.11 - 23.10) = 5.75 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.0480)(172 - 29.11 - 23.10 - 2.4)]^2}{175} = 0.36 \quad \text{W}$$

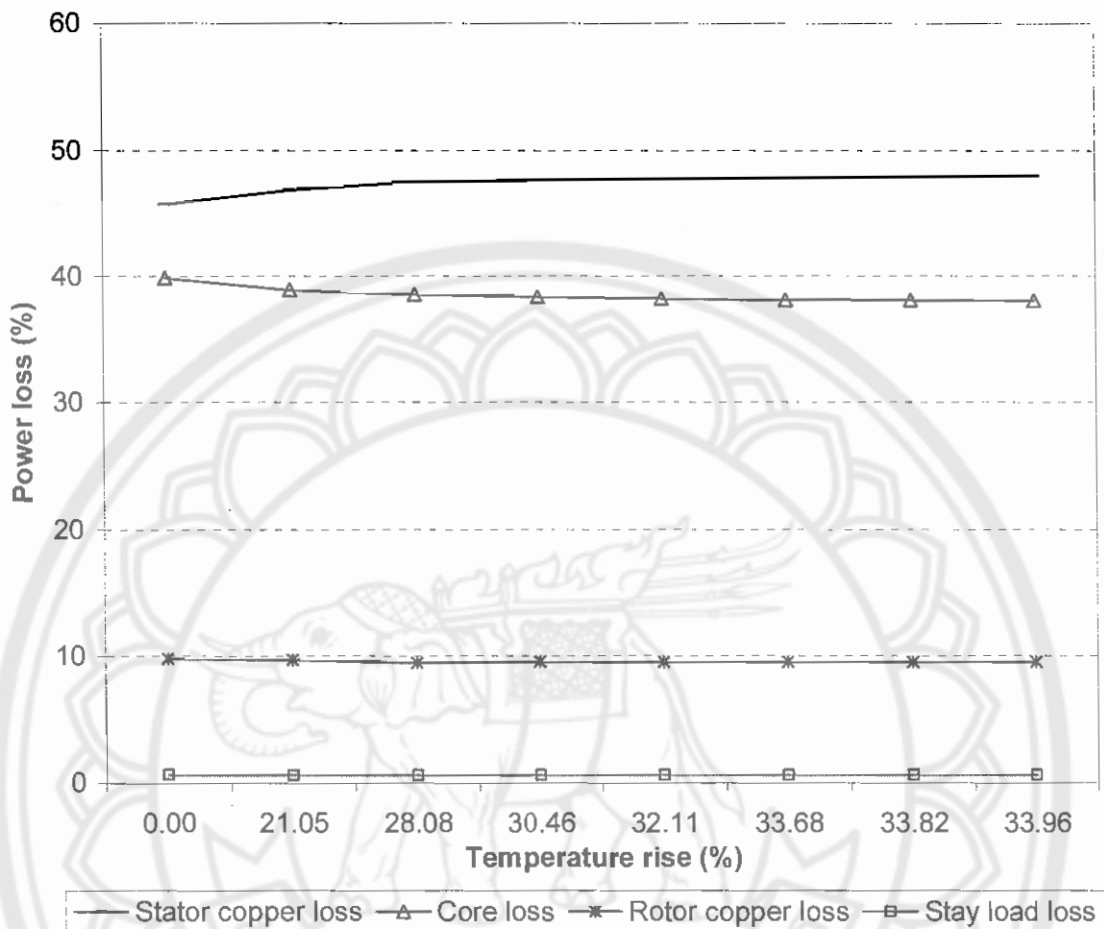
$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc} \\ = 29.11 + 5.75 + 23.10 + 2.4 + 0.36 = 60.71 \quad \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{172 - 60.71}{172} \times 100 = 64.70 \quad \%$$

ตารางที่ 5.5 สรุปค่าพลังงานสูญเสียต่างๆและประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกโหลดมี 50% ของพิกัดโหลด

$T_t$ (°C)	$R_t$ (Ω)	$P_{SCL}$ (W)	$P_{core}$ (W)	$P_{RCL}$ (W)	$P_{misc}$ (W)	$P_{il}$ (W)	$T_t$ (%)	$P_{SCL}$ (%)	$P_{core}$ (%)	$P_{RCL}$ (%)	$P_{misc}$ (%)	$\eta$ (%)
31.5	44.50	27.44	23.93	5.86	0.39	60.02	0.00	45.71	39.87	9.77	0.66	66.09
39.9	45.91	28.30	23.50	5.83	0.38	60.41	21.05	46.85	38.90	9.65	0.63	65.48
43.8	46.56	28.70	23.30	5.68	0.36	60.44	28.08	47.49	38.55	9.40	0.59	64.86
45.3	46.81	28.86	23.22	5.76	0.36	60.59	30.46	47.63	38.32	9.50	0.59	64.77
46.4	46.99	28.97	23.16	5.75	0.36	60.65	32.11	47.77	38.19	9.49	0.59	64.74
47.5	47.18	29.09	23.11	5.75	0.36	60.70	33.68	47.92	38.07	9.47	0.59	64.71
47.6	47.19	29.10	23.10	5.75	0.36	60.71	33.82	47.93	38.06	9.47	0.59	64.71
47.7	47.21	29.11	23.10	5.75	0.36	60.71	33.96	47.94	38.04	9.47	0.59	64.70

จากตารางที่ 5.5 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบ โรเตอร์กรงกระรอกที่โหลด 50% ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบ โรเตอร์กรงกระรอกที่โหลด 50%

- ผลการทดสอบมอเตอร์สถานะที่มีโหลด 75% ของพิกัดโหลด

จาก 
$$T_{shaft} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{P_{out}}{\left(\frac{2\pi n_m}{60}\right)} = \frac{P_{out} \times 60}{2\pi n_m}$$

จะได้  $T_{shaft}$  ที่ค่าโหลด 100 %

$$T_{shaft,FL} = \frac{(P_{out}) \times 60}{2\pi(n_{m,Rate})} = 1.23 \text{ N-m}$$

ดังนั้น  $T_{shaft}$  ที่ค่าโหลด 50 % = 0.92 N-m

ตารางที่ 5.6 ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกสถานะที่มีโหลด 75% ของพิกัดโหลด

time (min)	$T_t$ (°C)	$I_{S1}$ (A)	$I_{S2}$ (A)	$I_{S3}$ (A)	$W_1$ (W)	$W_2$ (W)	$n_m$ (rpm)
0	30.0	0.57	0.55	0.45	49	166	1407
15	41.9	0.57	0.55	0.45	49	166	1408
30	45.4	0.57	0.55	0.45	47	165	1407
45	46.7	0.57	0.55	0.45	47	165	1406
60	47.7	0.57	0.55	0.45	47	165	1407
75	48.2	0.57	0.55	0.45	47	165	1407
90	48.8	0.57	0.55	0.45	47	165	1407
105	49.3	0.57	0.55	0.45	47	165	1405
120	49.3	0.57	0.55	0.45	47	165	1405

จากผลการทดลองได้นำมาคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเฟส ( $I_S$ ), ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้า ( $P_{in}$ ), ค่าสลิป ( $s$ ), ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $R_s$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ ( $P_{SCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก ( $P_{core}$ ), ค่ากำลังสูญเสียจาก Stay Load ( $P_{misc}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่โรเตอร์ ( $P_{RCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียรวม ( $P_H$ ) และประสิทธิภาพมอเตอร์ ( $\eta$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้

ที่  $T_t = 30.0^\circ\text{C}$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.57 + 0.55 + 0.45}{3} = 0.52 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 49 + 166 = 215 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1407}{1500} = 0.062$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{30.0 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 44.00 \ \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.52)^2 (44.00) = 36.15 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} P_{core} &= P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ &= 40 - 3(0.32)^2 44.00 - 2.4 = 24.08 \text{ W} \end{aligned}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.062(215 - 36.15 - 24.08) = 9.06 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.062)(215 - 36.15 - 24.08 - 2.4)]^2}{175} = 0.58 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 36.15 + 24.08 + 9.06 + 0.58 + 2.4 = 72.81 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{215 - 72.81}{215} \times 100 = 66.13\%$$

$$\dot{n} T_t = 41.9^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.57 + 0.55 + 0.45}{3} = 0.52 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 49 + 166 = 215 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1408}{1500} = 0.061$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{41.9 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 46.24 \text{ } \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.52)^2 (46.24) = 37.99 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m$$

$$= 40 - 3(0.32)^2 46.24 - 2.4 = 23.40 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.061(215 - 37.99 - 23.40) = 9.42 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.061)(215 - 37.99 - 23.40 - 2.4)]^2}{175} = 0.58 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 37.99 + 23.40 + 9.42 + 0.58 + 2.4 = 73.48 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{215 - 73.78}{215} \times 100 = 65.68 \%$$

$$\text{ที่ } T_t = 45.4^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.57 + 0.55 + 0.45}{3} = 0.52 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 47 + 165 = 212 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1407}{1500} = 0.062$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{45.4 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 46.83 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.52)^2 (46.83) = 38.47 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ = 40 - 3(0.32)^2 46.83 - 2.4 = 23.22 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.062(212 - 38.47 - 23.22) = 9.32 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.062)(212 - 38.47 - 23.22 - 2.4)]^2}{175} = 0.55 \text{ W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc} \\ = 38.47 + 9.32 + 23.22 + 2.4 + 0.55 = 73.96 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{212 - 73.96}{212} \times 100 = 65.11 \%$$

$$\text{ที่ } T_t = 46.7^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.57 + 0.55 + 0.45}{3} = 0.52 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 47 + 165 = 212 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1406}{1500} = 0.063$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{46.7 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.04 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.52)^2 47.04 = 38.65 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ = 40 - 3(0.32)^2 47.04 - 2.4 = 23.15 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.063(212 - 38.65 - 23.15) = 9.41 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.063)(212 - 38.65 - 23.15 - 2.4)]^2}{175} = 0.55 \quad \text{W}$$

$$P_{ul} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc} \\ = 38.66 + 23.15 + 9.41 + 0.55 + 2.4 = 74.16 \quad \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{ul}}{P_{in}} \times 100 = \frac{212 - 74.16}{212} \times 100 = 65.02 \quad \%$$

$$\hat{T}_t = 47.7 \quad ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.57 + 0.55 + 0.45}{3} = 0.52 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 47 + 165 = 212 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1407}{1500} = 0.062$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{47.7 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.21 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.52)^2 (47.21) = 38.79 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ = 40 - 3(0.32)^2 47.21 - 2.4 = 23.10 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.062(212 - 38.79 - 23.10) = 9.31 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.062)(212 - 38.79 - 23.10 - 2.4)]^2}{175} = 0.55 \text{ W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 38.79 + 23.10 + 9.31 + 0.55 + 2.4 = 74.14 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{212 - 74.14}{212} \times 100 = 65.03 \%$$

$$\hat{n} T_i = 48.2^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.57 + 0.55 + 0.45}{3} = 0.52 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 47 + 165 = 212 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1407}{1500} = 0.062$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_i - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{48.2 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.29 \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.52)^2 (47.29) = 38.86 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{m,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m$$

$$= 40 - 3(0.32)^2 (47.29) - 2.4 = 23.07 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.062(212 - 38.86 - 23.07) = 9.30 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.062)(212 - 38.86 - 23.07 - 2.4)]^2}{175} = 0.55 \text{ W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 38.86 + 23.07 + 9.30 + 0.55 + 2.4 = 74.18 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{212 - 74.18}{212} \times 100 = 65.01 \%$$

$$\text{ที่ } T_t = 49.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_s = \frac{I_{s1} + I_{s2} + I_{s3}}{3} = \frac{0.57 + 0.55 + 0.45}{3} = 0.52 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 47 + 165 = 212 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1405}{1500} = 0.063$$

$$R_s = R_b + \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 + \left[ \left( \frac{49.3 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.48 \text{ } \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_s^2 R_s = 3(0.52)^2 = 39.01 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} P_{core} &= P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{s,NL}^2 R_s - P_m \\ &= 40 - 3(0.32)^2 47.48 - 2.4 = 32.74 \text{ W} \end{aligned}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.063(212 - 39.01 - 32.74) = 8.88 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r} = 0.48 \text{ W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc} = 83.51 \text{ W}$$

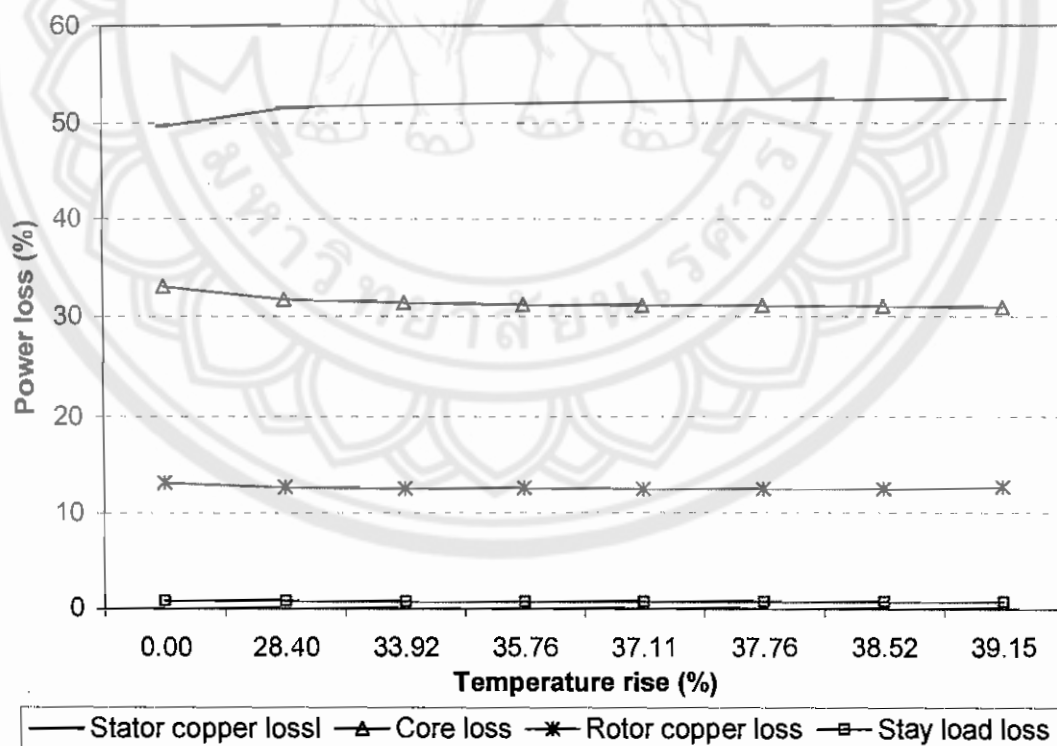
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = 60.61\%$$



ตารางที่ 5.7 สรุปค่าพลังงานสูญเสียต่างๆและประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกโหลดมี 75% ของพิกัดโหลด

$T_t$ (°C)	$R_t$ (Ω)	$P_{SCL}$ (W)	$P_{core}$ (W)	$P_{RCL}$ (W)	$P_{misc}$ (W)	$P_{ll}$ (W)	$T_t$ (%)	$P_{SCL}$ (%)	$P_{core}$ (%)	$P_{RCL}$ (%)	$P_{misc}$ (%)	$\eta$ (%)
30.0	44.00	36.15	24.08	9.60	0.58	72.81	0.00	49.65	33.07	13.18	0.78	66.13
41.9	46.24	37.99	23.40	9.42	0.58	73.78	28.40	51.49	31.71	12.77	0.74	65.68
45.4	46.83	38.47	23.22	9.32	0.55	73.96	33.92	52.02	31.39	12.60	0.74	65.11
46.7	47.04	38.65	23.15	9.41	0.55	74.16	35.76	52.12	31.21	12.69	0.74	65.02
47.7	47.21	38.79	23.10	9.31	0.55	74.14	37.11	52.32	31.15	12.55	0.74	65.03
48.2	47.29	38.86	23.07	9.30	0.55	74.18	37.76	52.38	31.10	12.54	0.74	65.01
48.8	47.39	38.94	23.04	9.30	0.55	74.23	38.52	52.46	31.04	12.53	0.73	64.99
49.3	47.48	39.01	23.01	9.50	0.55	74.47	39.15	52.38	30.91	12.76	0.78	64.87

จากตารางที่ 5.7 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบโรเตอร์กรงกระรอกที่โหลด 75% ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆกับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบโรเตอร์กรงกระรอกที่โหลด 75%

- ผลการทดสอบมอเตอร์สภาวะที่มีโหลด 100% ของพิกัดโหลด

$$\text{จาก } T_{shaft} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{P_{out}}{\left(\frac{2\pi n_m}{60}\right)} = \frac{P_{out} \times 60}{2\pi n_m}$$

จะได้  $T_{shaft}$  ที่ค่าโหลด 100 %

$$T_{shaft,FL} = \frac{(P_{out}) \times 60}{2\pi(n_{m,Rate})} = 1.23 \text{ N-m}$$

ตารางที่ 5.8 ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์แบบโรเตอร์กรง  
กระรอกสภาวะที่มีโหลด 100% ของพิกัดโหลด

time (min)	$T_i$ (°C)	$I_{S1}$ (A)	$I_{S2}$ (A)	$I_{S3}$ (A)	$W_1$ (W)	$W_2$ (W)	$n_m$ (rpm)
0	30.0	0.62	0.62	0.65	70	190	1385
15	41.9	0.62	0.62	0.65	75	189	1384
30	45.4	0.62	0.62	0.65	70	185	1381
45	46.7	0.62	0.62	0.65	70	185	1381
60	47.7	0.62	0.62	0.65	70	185	1381
75	48.2	0.62	0.62	0.65	70	185	1382
90	48.8	0.62	0.62	0.65	70	185	1382
105	49.3	0.62	0.62	0.65	70	185	1382
120	49.3	0.62	0.62	0.65	70	185	1382

จากผลการทดลองได้นำมาคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเฟส ( $I_S$ ), ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้า ( $P_{in}$ ), ค่าสลิป ( $s$ ), ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ ( $P_{SCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก ( $P_{core}$ ), ค่ากำลังสูญเสียจาก Stay Load ( $P_{misc}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่โรเตอร์ ( $P_{RCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียรวม ( $P_{it}$ ) และประสิทธิภาพมอเตอร์ ( $\eta$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆได้

ที่  $T_i = 30.0$  °C

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.62 + 0.62 + 0.65}{3} = 0.63 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 70 + 190 = 260 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1385}{1500} = 0.077$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{30.0 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 44.00 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.63)^2 (44.00) = 52.39 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ = 40 - 3(0.32)^2 44.00 - 2.4 = 24.08 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.077(260 - 52.39 - 24.08) = 14.07 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.077)(260 - 52.39 - 24.08 - 2.4)]^2}{175} = 0.80 \quad \text{W}$$

$$P_{ll} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc} \\ = 52.39 + 14.07 + 24.08 + 0.80 + 2.4 = 93.74 \quad \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{ll}}{P_{in}} \times 100 = \frac{260 - 93.74}{260} \times 100 = 63.94 \quad \%$$

$$\dot{T}_t = 44.0 \quad ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.62 + 0.62 + 0.65}{3} = 0.63 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 70 + 189 = 260 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1384}{1500} = 0.077$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{44.0 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 46.59 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.63)^2 (46.59) = 55.48 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ = 40 - 3(0.32)^2 46.59 - 2.4 = 23.29 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.077(264 - 55.48 - 23.29) = 14.32 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.077)(264 - 55.48 - 23.29 - 2.4)]^2}{175} = 0.81 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCu} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 55.48 + 23.29 + 14.32 + 0.81 + 2.4 = 96.30 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{264 - 96.30}{264} \times 100 = 63.52 \%$$

$$\hat{w} T_t = 49.0^\circ\text{C}$$

$$I_s = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.62 + 0.62 + 0.65}{3} = 0.63 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 70 + 185 = 255 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1381}{1500} = 0.079$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{49.0 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.43 \ \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_s^2 R_s = 3(0.63)^2 47.43 = 56.47 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m$$

$$= 40 - 3(0.32)^2 47.43 - 2.4 = 23.03 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.079(255 - 56.47 - 23.03) = 13.92 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCu} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.079)(255 - 56.47 - 23.03 - 2.4)]^2}{175} = 0.73 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 56.47 + 23.07 + 13.92 + 0.73 + 2.4 = 96.55 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{255 - 96.55}{255} \times 100 = 62.14 \%$$

$$\hat{n} \quad T_t = 51.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.62 + 0.62 + 0.65}{3} = 0.63 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 70 + 185 = 255 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1381}{1500} = 0.079$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{51.9 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.91 \text{ } \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.63)^2 47.91 = 57.05 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m$$

$$= 40 - 3(0.32)^2 47.91 - 2.4 = 22.88 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.079(255 - 57.05 - 22.88) = 13.89 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.079)(255 - 57.05 - 22.88 - 2.4)]^2}{175} = 0.72 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 57.05 + 22.88 + 13.89 + 0.72 + 2.4 = 96.94 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{255 - 96.94}{255} \times 100 = 61.98 \text{ } \%$$

$$\hat{n} \quad T_t = 53.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.62 + 0.62 + 0.65}{3} = 0.63 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 70 + 185 = 255 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1381}{1500} = 0.079$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{53.3 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.15 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.63)^2 48.15 = 57.33 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ = 40 - 3(0.32)^2 48.15 - 2.4 = 22.81 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_m - P_{SCL} - P_{core}) = 0.079(255 - 57.05 - 22.81) = 13.87 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_m - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.079)(255 - 57.33 - 22.81 - 2.4)]^2}{175} = 0.72 \quad \text{W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc} \\ = 57.33 + 22.81 + 13.87 + 0.72 + 2.4 = 97.13 \quad \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{255 - 97.13}{255} \times 100 = 61.91 \quad \%$$

$$\dot{T}_t = 54.1 \quad ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.62 + 0.62 + 0.65}{3} = 0.63 \quad \text{A}$$

$$P_m = W_1 + W_2 = 70 + 185 = 255 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1381}{1500} = 0.079$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{54.1 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.28 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.63)^2 48.28 = 57.49 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ = 40 - 3(0.32)^2 48.28 - 2.4 = 22.77 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_m - P_{SCL} - P_{core}) = 0.079(255 - 57.49 - 22.81) = 13.75 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.079)(255 - 57.49 - 22.77 - 2.4)]^2}{175} = 0.72 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 57.49 + 22.77 + 13.75 + 0.72 + 2.4 = 97.12 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{255 - 97.12}{255} \times 100 = 61.91 \%$$

$$\hat{v} T_l = 54.5^\circ\text{C}$$

$$I_s = \frac{I_{s1} + I_{s2} + I_{s3}}{3} = \frac{0.62 + 0.62 + 0.65}{3} = 0.63 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 70 + 185 = 255 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1381}{1500} = 0.079$$

$$R_l = R_b \times \left[ \left( \frac{T_l - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{54.5 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.35 \ \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_s^2 R_s = 3(0.63)^2 48.35 = 57.57 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{s,NL}^2 R_s - P_m$$

$$= 40 - 3(0.32)^2 48.35 - 2.4 = 22.75 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.079(255 - 57.57 - 22.75) = 13.74 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.079)(255 - 57.57 - 22.75 - 2.4)]^2}{175} = 0.72 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc}$$

$$= 57.57 + 22.75 + 13.74 + 0.72 + 2.4 = 97.18 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{255 - 97.18}{255} \times 100 = 61.89 \%$$

$$\text{đ } T_i = 54.9^\circ\text{C}$$

$$I_s = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.62 + 0.62 + 0.65}{3} = 0.63 \text{ A}$$

$$P_m = W_1 + W_2 = 70 + 185 = 255 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1381}{1500} = 0.079$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{54.9 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.41 \text{ } \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_s^2 R_s = 3(0.63)^2 48.41 = 57.65 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ = 40 - 3(0.32)^2 48.41 - 2.4 = 22.73 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.079(255 - 57.65 - 22.73) = 13.74 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.079)(255 - 57.65 - 22.73 - 2.4)]^2}{175} = 0.72 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc} \\ = 57.57 + 22.75 + 13.74 + 0.72 + 2.4 = 97.18 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{255 - 97.18}{255} \times 100 = 61.89 \text{ } \%$$

$$\text{đ } T_i = 55.3^\circ\text{C}$$

$$I_s = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.62 + 0.62 + 0.65}{3} = 0.63 \text{ A}$$

$$P_m = W_1 + W_2 = 70 + 185 = 255 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1381}{1500} = 0.079$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 44.5 \times \left[ \left( \frac{55.3 - 31.5}{31.5 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.48 \text{ } \Omega$$



$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.63)^2 48.48 = 57.73 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_m = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_m \\ = 40 - 3(0.32)^2 48.48 - 2.4 = 22.71 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.079(255 - 57.73 - 22.71) = 13.73 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_m)]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.079)(255 - 57.73 - 22.71 - 2.4)]^2}{175} = 0.72 \text{ W}$$

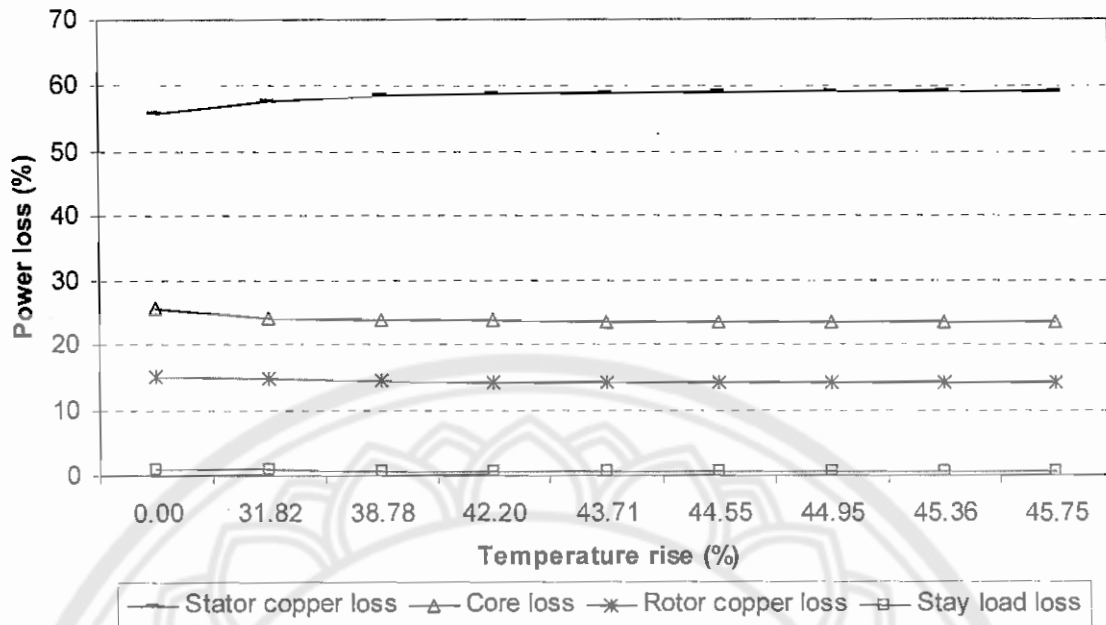
$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_m + P_{misc} \\ = 57.73 + 22.71 + 13.73 + 0.72 + 2.4 = 97.28 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{255 - 97.28}{255} \times 100 = 61.85 \%$$

ตารางที่ 5.9 สรุปค่าพลังงานสูญเสียต่างๆและประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกที่มีโหลด 100% ของพิกัดโหลด

$T_i$ (°C)	$R_t$ (Ω)	$P_{SCL}$ (W)	$P_{core}$ (W)	$P_{RCL}$ (W)	$P_{misc}$ (W)	$P_{il}$ (W)	$T_i$ (%)	$P_{SCL}$ (%)	$P_{core}$ (%)	$P_{RCL}$ (%)	$P_{misc}$ (%)	$\eta$ (%)
30.0	44.00	52.39	24.08	14.07	0.80	93.74	0.00	55.89	25.69	15.01	0.85	63.94
44.0	46.59	55.48	23.29	14.32	0.81	96.30	31.82	57.61	24.18	14.88	0.84	63.52
49.0	47.43	56.47	23.03	13.92	0.73	96.55	38.78	58.49	23.85	14.42	0.75	62.14
51.9	47.91	57.05	22.88	13.89	0.72	96.94	42.20	58.85	23.60	14.33	0.74	61.98
53.3	48.15	57.33	22.81	13.87	0.72	97.13	43.71	59.02	23.48	14.28	0.74	61.91
54.1	48.28	57.49	22.77	13.75	0.72	97.12	44.55	59.19	23.44	14.15	0.74	61.91
54.5	48.35	57.57	22.75	13.74	0.72	97.18	44.95	59.24	23.41	14.14	0.74	61.89
54.9	48.41	57.65	22.73	13.74	0.72	97.23	45.36	59.29	23.37	14.13	0.74	61.87
55.3	48.48	57.73	22.71	13.73	0.72	97.28	45.75	59.34	23.34	14.12	0.74	61.85

จากตารางที่ 5.9 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบโรเตอร์กรงกระรอกที่โหลด 100% ดังรูปที่ 5.3



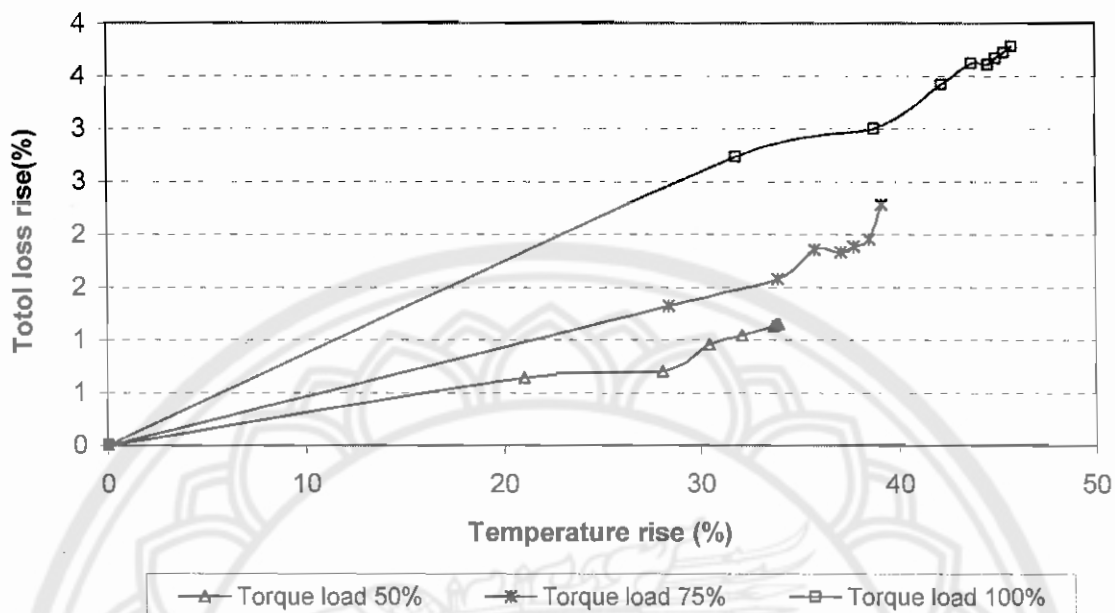
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างกับอุณหภูมิ  
ของมอเตอร์แบบโรเตอร์กรงกระรอกที่โหลด 100%

จากผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกสามารถนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ต่างๆของมอเตอร์กับอุณหภูมิได้เป็น

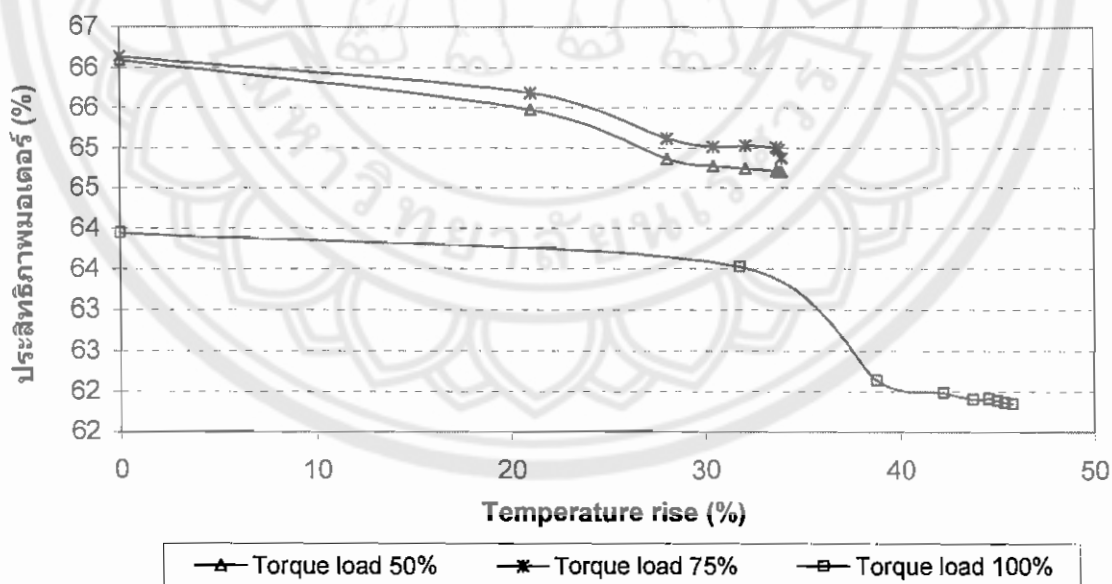
ตารางที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์ที่โหลดต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก

Load 50%			Load 75%			Load 100%		
$T_i$ (%)	$P_{ii}$ (%)	$\eta$ (%)	$T_i$ (%)	$P_{ii}$ (%)	$\eta$ (%)	$T_i$ (%)	$P_{ii}$ (%)	$\eta$ (%)
0.00	0.00	66.09	0.00	0.00	66.13	0.00	0.00	63.94
21.05	0.65	65.48	28.40	1.32	65.68	31.82	2.73	63.52
28.08	0.70	64.86	33.92	1.58	65.11	38.78	3.00	62.14
30.46	0.96	64.77	35.76	1.86	65.02	42.20	3.42	61.98
32.11	1.04	64.74	37.11	1.83	65.03	43.71	3.62	61.91
33.68	1.13	64.71	37.76	1.88	65.01	44.55	3.61	61.91
33.82	1.14	64.71	38.52	1.95	64.99	44.95	3.67	61.89
33.96	1.15	64.70	39.15	2.28	64.87	45.36	3.72	61.87
33.96	1.15	64.70	39.15	2.28	64.87	45.75	3.78	61.85

จากตารางที่ 5.10 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับการสูญเสียรวมและประสิทธิภาพของมอเตอร์ ดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียรวมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพมอเตอร์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก

## 5.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์กับ อุณหภูมิ

- บันทึกค่าพิกัดต่างๆ ของมอเตอร์

ตารางที่ 5.11 ค่าพิกัดต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์

$P_{out}$	$n_{m,Rate}$	$V_{Rate}$	$I_{Rate}$	$f$	$P$
175 W	1240 rpm	380 V	0.53 A	50 Hz	4 poles

จากค่าพิกัดต่างๆ ที่ได้ คำนวณหาค่าความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed)

$$n_{sync} = \frac{120f}{P} = 1500 \text{ rpm}$$

- ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์

ตารางที่ 5.12 ค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 30.0 °C

ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์	$\Omega$
$R_{S1}$	43.8
$R_{S2}$	43.9
$R_{S3}$	43.8
$R_S = \frac{R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}}{3}$	43.8

ดังนั้นจากสมการ

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right]$$

$$T_b = 30.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_b = 43.8 \text{ } \Omega$$

$$k = 234.5$$

- ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์สถานะที่ไม่มีโหลด
- ตารางที่ 5.13 ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์สถานะที่ไม่มีโหลด

time (min)	$T_r$ (°C)	$I_{S1}$ (A)	$I_{S2}$ (A)	$I_{S3}$ (A)	$W_1$ (W)	$W_2$ (W)	$n_m$ (rpm)
0	30.0	0.35	0.35	0.40	-40	90	1488
15	34.1	0.35	0.35	0.40	-40	90	1488
30	38.4	0.35	0.35	0.40	-40	90	1488
45	39.7	0.35	0.35	0.40	-40	90	1488
60	40.5	0.35	0.35	0.40	-40	90	1488
75	41.2	0.35	0.35	0.40	-40	90	1488
90	42.2	0.35	0.35	0.40	-40	90	1488
105	42.6	0.35	0.35	0.40	-40	90	1488
120	42.9	0.35	0.35	0.40	-40	90	1488

จากการทดสอบสถานะที่ไม่มีโหลด จะได้

$$I_{S,NL} = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = 0.37 \quad \text{A}$$

$$P_{in,NL} = W_1 + W_2 = 50 \quad \text{W}$$

ดังนั้น จะได้กำลังสูญเสียทางกล ( $P_{F\&W}$ ) เป็น

$$P_{F\&W} = 0.06P_{in} = 0.06P_m = 3.0 \text{ W}$$

- ผลการทดสอบมอเตอร์สถานะที่มีโหลด 50% ของพิกัดโหลด

จาก 
$$T_{shaft} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{P_{out}}{\left(\frac{2\pi n_m}{60}\right)} = \frac{P_{out} \times 60}{2\pi n_m}$$

จะได้  $T_{shaft}$  ที่ค่าโหลด 100 %

$$T_{shaft,FL} = \frac{(P_{out}) \times 60}{2\pi(n_{m,Rate})} = 1.35 \text{ N-m}$$

ดังนั้น  $T_{shaft}$  ที่ค่าโหลด 50 % = 0.68 N-m

ตารางที่ 5.14 ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ  
 วัตต์โรเตอร์สภาวะที่มีโหลด 50% ของพิกัดโหลด

time (min)	$T_t$ (°C)	$I_{S1}$ (A)	$I_{S2}$ (A)	$I_{S3}$ (A)	$W_1$ (W)	$W_2$ (W)	$n_m$ (rpm)
0	31.5	0.5	0.5	0.4	28	150	1369
15	43.0	0.5	0.5	0.4	27	148	1369
30	49.3	0.5	0.5	0.4	25	146	1367
45	51.9	0.5	0.5	0.4	25	146	1368
60	53.9	0.5	0.5	0.4	25	146	1367
75	55.5	0.5	0.5	0.4	25	146	1367
90	56.2	0.5	0.5	0.4	25	146	1366
105	56.8	0.5	0.5	0.4	25	146	1366
120	56.8	0.5	0.5	0.4	25	146	1366

จากผลการทดลองได้นำมาคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเฟส ( $I_s$ ), ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้า ( $P_{in}$ ), ค่าสลลิป( $s$ ), ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $R_s$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ ( $P_{SCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก ( $P_{core}$ ), ค่ากำลังสูญเสียจาก Stay Load ( $P_{misc}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่โรเตอร์ ( $P_{RCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียรวม ( $P_{ll}$ ) และประสิทธิภาพมอเตอร์ ( $\eta$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้

ที่  $T_t = 31.5$  °C

$$I_s = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.5 + 0.5 + 0.4}{3} = 0.47 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 28 + 150 = 178 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1367}{1500} = 0.089$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{31.5 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 44.05 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_s^2 R_s = 3(0.47)^2 44.05 = 28.78 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} P_{core} &= P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W} \\ &= 50 - 3(0.37)^2 44.05 - 3.0 = 28.91 \text{ W} \end{aligned}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.089(178 - 28.78 - 28.91) = 10.51 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.089)(178 - 28.78 - 28.91 - 3.0)]^2}{175} = 0.33 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 28.78 + 28.91 + 10.51 + 0.33 + 3.0 = 71.52 \quad \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{178 - 71.52}{178} \times 100 = 59.82\%$$

$$\hat{n} T_i = 43.0^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.5 + 0.5 + 0.4}{3} = 0.47 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 27 + 148 = 175 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1369}{1500} = 0.087$$

$$R_r = R_b \times \left[ \left( \frac{T_i - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{43.0 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.95 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.47)^2 44.95 = 30.02 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 45.95 - 3.0 = 28.13 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.087(175 - 30.02 - 28.13) = 10.20 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.087)(175 - 30.02 - 28.13 - 3.0)]^2}{175} = 0.31 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 30.02 + 28.13 + 10.20 + 0.33 + 3.0 = 71.66 \quad \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{175 - 71.66}{175} \times 100 = 59.05\%$$

$$\text{ที่ } T_t = 49.3^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.5 + 0.5 + 0.4}{3} = 0.47 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 146 = 171 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1369}{1500} = 0.087$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{49.3 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.00 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.47)^2 47.00 = 30.07 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCu,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W} \\ = 50 - 3(0.37)^2 47.00 - 3.0 = 27.70 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.087(171 - 30.07 - 27.70) = 9.98 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.089)(171 - 30.07 - 27.70 - 3.0)]^2}{175} = 0.29 \quad \text{W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} \\ = 30.07 + 27.70 + 9.98 + 0.29 + 3.0 = 71.67 \quad \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{171 - 71.67}{171} \times 100 = 58.09\%$$

$$\text{ที่ } T_t = 51.9^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.5 + 0.5 + 0.4}{3} = 0.47 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 146 = 171 \quad \text{W}$$



$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1366}{1500} = 0.089$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{51.9 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.43 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.47)^2 47.43 = 30.99 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W} \\ = 50 - 3(0.37)^2 47.43 - 3.0 = 27.52 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.089(171 - 30.99 - 27.52) = 9.90 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.089)(171 - 30.99 - 27.52 - 3.0)]^2}{175} = 0.28 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} \\ = 30.99 + 27.52 + 9.90 + 0.28 + 3.0 = 71.69 \quad \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{171 - 71.69}{171} \times 100 = 58.08\%$$

$$\dot{T}_t = 53.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.5 + 0.5 + 0.4}{3} = 0.47 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 146 = 171 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1367}{1500} = 0.089$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{53.9 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.76 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.47)^2 47.76 = 31.20 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W} \\ = 50 - 3(0.37)^2 47.76 - 3.0 = 27.39 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.089(171 - 30.20 - 27.39) = 9.97 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.089)(171 - 31.20 - 27.39 - 3.0)]^2}{175} = 0.28 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 31.20 + 27.39 + 9.97 + 0.28 + 3.0 = 71.84 \quad \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{171 - 71.84}{171} \times 100 = 57.99\%$$

$$\hat{n} \quad T_t = 55.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.5 + 0.5 + 0.4}{3} = 0.47 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 146 = 171 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1367}{1500} = 0.089$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{55.5 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.02 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.47)^2 48.02 = 31.87 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCu,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 48.02 - 3.0 = 27.28 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.089(171 - 31.37 - 27.28) = 9.96 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.089)(171 - 31.37 - 27.28 - 3.0)]^2}{175} = 0.28 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 31.37 + 27.28 + 9.96 + 0.28 + 3.0 = 71.90 \quad \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{171 - 71.90}{171} \times 100 = 57.95\%$$

$$\text{ที่ } T_t = 56.2^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.5 + 0.5 + 0.4}{3} = 0.47 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 146 = 171 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1367}{1500} = 0.089$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{56.2 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.14 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.47)^2 48.14 = 31.45 \quad \text{W}$$

$$\begin{aligned} P_{core} &= P_{in,NL} - P_{SCu,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W} \\ &= 50 - 3(0.37)^2 48.14 - 3.0 = 27.23 \quad \text{W} \end{aligned}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.089(171 - 31.45 - 27.23) = 9.96 \quad \text{W}$$

$$\begin{aligned} P_{misc} &= \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r} \\ &= \frac{0.005[(1-0.089)(171 - 31.45 - 27.23 - 3.0)]^2}{175} = 0.28 \quad \text{W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{il} &= P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} \\ &= 31.45 + 9.96 + 27.23 + 3.0 + 0.28 = 71.92 \quad \text{W} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{171 - 71.92}{171} \times 100 = 57.94\%$$

$$\text{ที่ } T_t = 56.8^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.5 + 0.5 + 0.4}{3} = 0.47 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 25 + 146 = 171 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1367}{1500} = 0.089$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{56.8 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.24 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.47)^2 48.24 = 31.52 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 48.21 - 3.0 = 27.19 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.089(171 - 31.52 - 27.19) = 10.03 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.089)(171 - 31.52 - 27.19 - 3.0)]^2}{175} = 0.28 \quad \text{W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

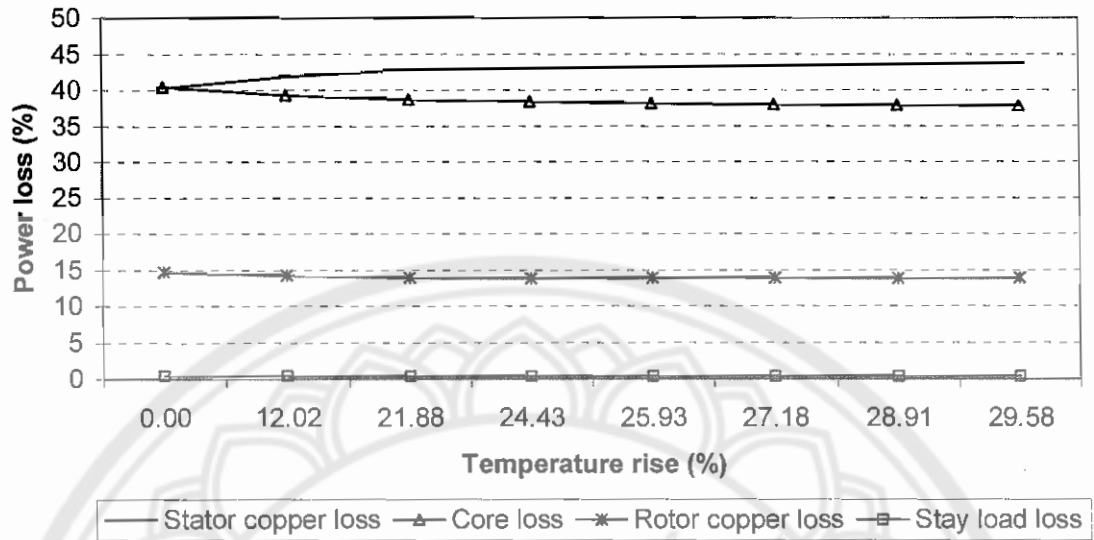
$$= 31.52 + 10.03 + 27.19 + 3.0 + 0.28 = 72.02 \quad \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{171 - 72.02}{171} \times 100 = 57.88\%$$

ตารางที่ 5.15 สรุปค่าพลังงานสูญเสียต่างๆและประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะมอเตอร์ที่มีโหลด 50% ของพิกัดโหลดของมอเตอร์แบบवालวโรเตอร์

$T_t$ (°C)	$R_t$ (Ω)	$P_{SCL}$ (W)	$P_{core}$ (W)	$P_{RCL}$ (W)	$P_{misc}$ (W)	$P_{tl}$ (W)	$T_t$ (%)	$P_{SCL}$ (%)	$P_{core}$ (%)	$P_{RCL}$ (%)	$P_{misc}$ (%)	$\eta$ (%)
31.5	44.05	28.78	28.91	10.51	0.33	71.52	0.00	40.24	40.42	14.69	0.46	59.82
43.0	45.95	30.02	28.13	10.20	0.31	71.66	26.74	41.89	39.25	14.24	0.43	59.05
49.3	47.00	30.70	27.70	9.98	0.29	71.67	36.11	42.84	38.65	13.93	0.40	58.09
51.9	47.43	30.99	27.52	9.90	0.28	71.69	39.31	43.22	38.39	13.81	0.40	58.08
53.9	47.76	31.20	27.39	9.97	0.28	71.84	41.56	43.43	38.12	13.87	0.40	57.99
55.5	48.02	31.37	27.28	9.96	0.28	71.90	43.24	43.64	37.94	13.86	0.39	57.95
56.2	48.14	31.45	27.23	9.96	0.28	71.92	43.95	43.73	37.86	13.85	0.39	57.94
56.8	48.24	31.52	27.19	10.03	0.28	72.02	44.54	43.76	37.75	13.93	0.39	57.88

จากตารางที่ 5.15 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบ วาล์วโรเตอร์ที่โหลด 50% ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์ที่โหลด 50%

- ผลการทดสอบมอเตอร์สถานะที่มีโหลด 75% ของพิกัดโหลด

จาก 
$$T_{shaft} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{P_{out}}{\left(\frac{2\pi n_m}{60}\right)} = \frac{P_{out} \times 60}{2\pi n_m}$$

จะได้  $T_{shaft}$  ที่ค่าโหลด 100 %

$$T_{shaft,FL} = \frac{(P_{out}) \times 60}{2\pi(n_{m,Rate})} = 1.35 \text{ N-m}$$

ดังนั้น

$$T_{shaft} \text{ ที่ค่าโหลด 75 \%} = 1.01 \text{ N-m}$$

ตารางที่ 5.16 ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์  
สถานะที่มีโหลด 75% ของพิกัดโหลด

time (min)	$T_t$ (°C)	$I_{S1}$ (A)	$I_{S2}$ (A)	$I_{S3}$ (A)	$W_1$ (W)	$W_2$ (W)	$n_m$ (rpm)
0	30.0	0.6	0.59	0.45	58	173	1317
15	43.5	0.6	0.59	0.45	55	173	1316
30	51.2	0.6	0.59	0.45	55	172	1311
45	57.4	0.6	0.59	0.45	55	172	1311
60	60.5	0.6	0.59	0.45	55	172	1311
75	63.2	0.6	0.59	0.45	55	172	1310
90	64.5	0.6	0.59	0.45	55	172	1310
105	65.5	0.6	0.59	0.45	55	172	1310
120	65.5	0.6	0.59	0.45	55	172	1310

จากผลการทดลองได้นำมาคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเฟส ( $I_S$ ), ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้า ( $P_{in}$ ), ค่าสลลิป ( $s$ ), ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ ( $P_{SCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก ( $P_{core}$ ), ค่ากำลังสูญเสียจาก Stay Load ( $P_{misc}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่โรเตอร์ ( $P_{RCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียรวม ( $P_{ll}$ ) และประสิทธิภาพมอเตอร์ ( $\eta$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้

ที่  $T_t = 30.0^\circ\text{C}$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.6 + 0.59 + 0.45}{3} = 0.55 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 58 + 173 = 231 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1317}{1500} = 0.122$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{30.0 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 43.80 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.55)^2 43.80 = 39.27 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W} \\ = 50 - 3(0.37)^2 43.80 - 3.0 = 29.01 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.122(231 - 39.27 - 29.01) = 19.85 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.122)(231 - 39.27 - 29.01 - 3.0)]^2}{175} = 0.56 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 39.27 + 29.01 + 19.85 + 0.56 + 3.0 = 91.69 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{231 - 91.69}{231} \times 100 = 60.31\%$$

$$\hat{n} T_t = 43.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.6 + 0.59 + 0.45}{3} = 0.55 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 55 + 173 = 228 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1316}{1500} = 0.123$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{43.5 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 46.04 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.55)^2 46.04 = 41.27 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 46.04 - 3.0 = 28.09 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.123(228 - 41.27 - 28.09) = 19.46 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.123)(228 - 41.27 - 28.09 - 3.0)]^2}{175} = 0.53 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} = 41.27 + 28.09 + 19.46 + 0.53 + 3.0 = 92.36 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{228 - 92.36}{228} \times 100 = 59.49\%$$

$$\hat{I} T_i = 51.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.6 + 0.59 + 0.45}{3} = 0.55 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 55 + 172 = 227 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1311}{1500} = 0.126$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_i - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{51.2 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.31 \text{ } \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.55)^2 47.31 = 42.42 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 47.31 - 3.0 = 27.57 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.126(227 - 42.42 - 27.57) = 19.78 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.126)(227 - 42.42 - 27.57 - 3.0)]^2}{175} = 0.52 \text{ W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 42.42 + 19.78 + 27.57 + 3.0 + 0.52 = 93.29 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{227 - 93.29}{227} \times 100 = 58.90\%$$

$$\hat{I} T_i = 57.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.6 + 0.59 + 0.45}{3} = 0.55 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 55 + 172 = 227 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1311}{1500} = 0.126$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_i - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{57.04 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.34 \text{ } \Omega$$



$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.55)^2 48.34 = 43.34 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W} \\ = 50 - 3(0.37)^2 48.34 - 3.0 = 27.15 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.126(227 - 43.34 - 27.15) = 19.72 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.126)(227 - 43.34 - 27.15 - 3.0)]^2}{175} = 0.51 \quad \text{W}$$

$$P_{dl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} \\ = 43.34 + 27.15 + 19.72 + 0.51 + 3.0 = 93.72 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{dl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{227 - 93.72}{227} \times 100 = 58.71\%$$

$$\text{vii } T_i = 60.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.6 + 0.59 + 0.45}{3} = 0.55 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 55 + 172 = 227 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1311}{1500} = 0.126$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_i - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{60.5 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.85 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.55)^2 48.85 = 43.80 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W} \\ = 50 - 3(0.37)^2 48.85 - 3.0 = 26.94 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.126(227 - 43.80 - 26.94) = 19.69 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.126)(227-43.80-26.94-3.0)]^2}{175} = 0.51 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 43.80 + 26.94 + 19.69 + 0.51 + 3.0 = 93.94 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_m} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{227 - 93.94}{227} \times 100 = 58.62\%$$

$$\hat{n} T_t = 63.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.6 + 0.59 + 0.45}{3} = 0.55 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 55 + 172 = 227 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1310}{1500} = 0.127$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{63.2 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 49.30 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.55)^2 49.30 = 44.20 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 49.30 - 3.0 = 26.75 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.127(227 - 44.20 - 26.75) = 19.77 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.127)(227 - 44.20 - 26.75 - 3.0)]^2}{175} = 0.51 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 41.20 + 26.75 + 19.77 + 0.51 + 3.0 = 94.23 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{227 - 94.23}{227} \times 100 = 58.49\%$$

$$\text{ที่ } T_t = 64.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.6 + 0.59 + 0.45}{3} = 0.55 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 55 + 172 = 227 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1310}{1500} = 0.127$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{64.5 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 49.51 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.55)^2 49.51 = 44.39 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 49.51 - 3.0 = 26.66 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.127(227 - 44.39 - 26.66) = 19.75 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.127)(227 - 44.39 - 26.66 - 3.0)]^2}{175} = 0.51 \text{ W}$$

$$P_{ul} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 44.39 + 26.66 + 19.75 + 0.51 + 3.0 = 94.32 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{ul}}{P_{in}} \times 100 = \frac{227 - 94.32}{227} \times 100 = 58.45\%$$

$$\text{ที่ } T_t = 65.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.6 + 0.59 + 0.45}{3} = 0.55 \text{ A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 55 + 172 = 227 \text{ W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1310}{1500} = 0.127$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{65.5 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 49.68 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.55)^2 49.68 = 44.54 \text{ W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W} \\ = 50 - 3(0.37)^2 49.68 - 3.0 = 26.60 \text{ W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.127(227 - 44.54 - 26.60) = 19.74 \text{ W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.127)(227 - 44.54 - 26.60 - 3.0)]^2}{175} = 0.51 \text{ W}$$

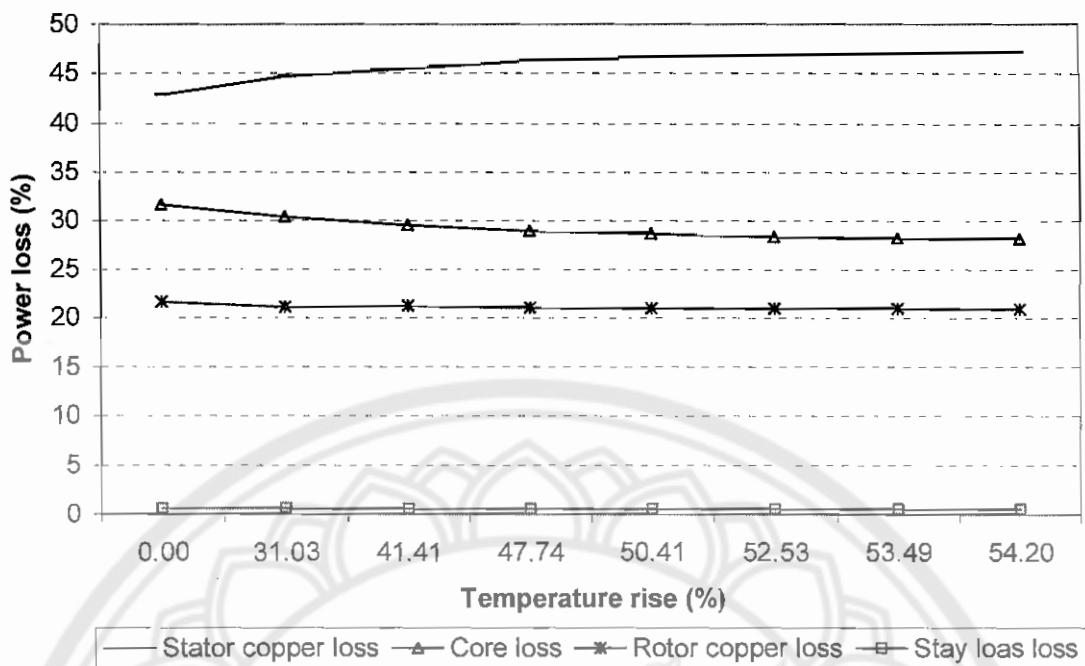
$$P_{dl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} \\ = 44.54 + 26.60 + 19.74 + 0.51 + 3.0 = 94.39 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{dl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{227 - 94.39}{227} \times 100 = 58.42\%$$

ตารางที่ 5.17 สรุปค่าพลังงานสูญเสียต่างๆและประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะมอเตอร์ที่มีโหลด 75% ของพิกัดโหลดของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์

$T_i$ (°C)	$R_i$ (Ω)	$P_{SCL}$ (W)	$P_{core}$ (W)	$P_{RCL}$ (W)	$P_{misc}$ (W)	$P_{dl}$ (W)	$T_t$ (%)	$P_{SCL}$ (%)	$P_{core}$ (%)	$P_{RCL}$ (%)	$P_{misc}$ (%)	$\eta$ (%)
30.0	43.80	39.27	29.01	19.85	0.56	91.69	0.00	42.83	31.64	21.65	0.61	60.31
43.5	46.04	41.27	28.09	19.46	0.53	92.36	31.03	44.69	30.42	21.07	0.58	59.49
51.2	47.31	42.42	27.57	19.78	0.52	93.29	41.41	45.47	29.55	21.21	0.55	58.90
57.4	48.34	43.34	27.15	19.72	0.51	93.72	47.74	46.24	28.97	21.04	0.55	58.71
60.5	48.85	43.80	26.94	19.69	0.51	93.94	50.41	46.62	28.68	20.96	0.55	58.62
63.2	49.30	44.20	26.75	19.77	0.51	94.23	52.53	46.90	28.39	20.98	0.54	58.49
64.5	49.51	44.39	26.66	19.75	0.51	94.32	53.49	47.06	28.27	20.94	0.54	58.45
65.5	49.68	44.54	26.60	19.74	0.51	94.39	54.20	47.19	28.18	20.92	0.54	58.42

จากตารางที่ 5.17 จะ ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์ที่โหลด 75% ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์ที่โหลด 75%

- ผลการทดสอบมอเตอร์สถานะที่มีโหลด 100% ของพิกัดโหลด

จาก 
$$T_{shaft} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{P_{out}}{\left(\frac{2\pi n_m}{60}\right)} = \frac{P_{out} \times 60}{2\pi n_m}$$

ดังนั้น  $T_{shaft}$  ที่ค่าโหลด 100 %

$$T_{shaft,FL} = \frac{(P_{out}) \times 60}{2\pi(n_{m,Rate})} = 1.35 \text{ N-m}$$

ตารางที่ 5.18 ค่ากระแส กำลัง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์  
สถานะที่มีโหลด 100% ของพิกัดโหลด

time (min)	$T_t$ (°C)	$I_{S1}$ (A)	$I_{S2}$ (A)	$I_{S3}$ (A)	$W_1$ (W)	$W_2$ (W)	$n_m$ (rpm)
0	31.5	0.7	0.69	0.54	86	206	1246
15	51.2	0.7	0.69	0.54	86	204	1242
30	61.1	0.7	0.69	0.54	85	203	1240
45	67.2	0.7	0.69	0.54	85	203	1228
60	72.2	0.7	0.69	0.54	85	202	1226
75	74.0	0.7	0.69	0.54	85	202	1222
90	74.1	0.7	0.69	0.54	85	202	1222
105	74.2	0.7	0.69	0.54	85	202	1222
120	74.2	0.7	0.69	0.54	85	202	1222

จากผลการทดลองได้นำมาคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเฟส ( $I_S$ ), ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้า ( $P_{in}$ ), ค่าสลิป ( $s$ ), ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ ( $P_{SCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก ( $P_{core}$ ), ค่ากำลังสูญเสียจาก Stay Load ( $P_{misc}$ ), ค่ากำลังสูญเสียที่โรเตอร์ ( $P_{RCL}$ ), ค่ากำลังสูญเสียรวม ( $P_{II}$ ) และประสิทธิภาพมอเตอร์ ( $\eta$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้

ที่  $T_t = 31.5^\circ\text{C}$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.75 + 0.69 + 0.54}{3} = 0.64 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 86 + 206 = 292 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1246}{1500} = 0.169$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{31.5 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 44.05 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.64)^2 44.05 = 54.69 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 44.05 - 3.0 = 28.91 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.169(292 - 54.69 - 28.91) = 35.29 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.169)(292 - 54.69 - 28.91 - 3.0)]^2}{175} = 0.83 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 54.69 + 28.91 + 35.29 + 0.83 + 3.0 = 122.72 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{292 - 122.72}{292} \times 100 = 57.97\%$$

$$\dot{m} T_t = 51.2^\circ \text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.75 + 0.69 + 0.54}{3} = 0.64 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 86 + 204 = 290 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1242}{1500} = 0.172$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{51.2 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 47.31 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.64)^2 47.31 = 58.74 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 47.31 - 3.0 = 27.57 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.172(290 - 58.74 - 27.57) = 35.03 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.172)(290 - 58.74 - 27.57 - 3.0)]^2}{175} = 0.79 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 58.74 + 27.57 + 35.03 + 0.79 + 3.0 = 125.14 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{290 - 125.14}{290} \times 100 = 56.85\%$$

$$\text{ที่ } T_t = 61.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_s = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.75 + 0.69 + 0.54}{3} = 0.64 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 85 + 203 = 288 \quad \text{A}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_{in}}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1240}{1500} = 0.173$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{61.1 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 48.95 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_s^2 R_s = 3(0.64)^2 48.95 = 60.72 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W} \\ = 50 - 3(0.37)^2 48.95 - 3.0 = 26.90 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.173(288 - 60.72 - 26.90) = 34.72 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r} \\ = \frac{0.005[(1-0.173)(288 - 60.72 - 26.90 - 3.0)]^2}{175} = 0.76 \quad \text{W}$$

$$P_{il} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} \\ = 60.72 + 26.90 + 34.72 + 0.76 + 3.0 = 126.16 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{il}}{P_{in}} \times 100 = \frac{288 - 126.16}{288} \times 100 = 56.20\%$$

$$\text{ที่ } T_t = 67.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_s = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.75 + 0.69 + 0.54}{3} = 0.64 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 85 + 203 = 288 \quad \text{W}$$



$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1228}{1500} = 0.181$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{67.2 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 49.96 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.64)^2 49.96 = 62.03 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 49.96 - 3.0 = 26.48 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.181(288 - 62.03 - 26.48) = 36.17 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.181)(288 - 62.03 - 26.48 - 3.0)]^2}{175} = 0.74 \quad \text{W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 62.03 + 26.48 + 36.17 + 0.74 + 3.0 = 128.43 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{288 - 128.43}{288} \times 100 = 55.41\%$$

$$\dot{T}_t = 72.2^\circ \text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.75 + 0.69 + 0.54}{3} = 0.64 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 85 + 202 = 287 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1226}{1500} = 0.183$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{72.2 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 50.79 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.64)^2 50.79 = 63.06 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 50.79 - 3.0 = 26.14 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.183(287 - 63.06 - 26.14) = 36.13 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.183)(287 - 63.06 - 26.14 - 3.0)]^2}{175} = 0.72 \quad \text{W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} = 63.06 + 26.14 + 36.13 + 0.72 + 3.0 = 129.06 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{287 - 129.06}{287} \times 100 = 55.03\%$$

$$\dot{n} T_i = 74.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.75 + 0.69 + 0.54}{3} = 0.64 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 85 + 202 = 287 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1222}{1500} = 0.185$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_i - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{74.0 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 51.09 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.64)^2 51.09 = 63.43 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 51.09 - 3.0 = 26.02 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.185(287 - 63.43 - 26.02) = 36.61 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.185)(287 - 63.43 - 26.02 - 3.0)]^2}{175} = 0.72 \quad \text{W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 63.43 + 26.02 + 36.61 + 0.72 + 3.0 = 129.78 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{287 - 129.78}{287} \times 100 = 54.78\%$$

$$\hat{n} T_i = 74.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.75 + 0.69 + 0.54}{3} = 0.64 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 85 + 202 = 287 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1222}{1500} = 0.185$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{74.1 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 51.10 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_S^2 R_s = 3(0.64)^2 51.10 = 63.45 \quad \text{W}$$

$$P_{core} = P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{S,NL}^2 R_s - P_{F\&W}$$

$$= 50 - 3(0.37)^2 51.10 - 3.0 = 26.01 \quad \text{W}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.185(287 - 63.15 - 26.01) = 36.61 \quad \text{W}$$

$$P_{misc} = \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r}$$

$$= \frac{0.005[(1-0.185)(287 - 63.45 - 26.01 - 3.0)]^2}{175} = 0.72 \quad \text{W}$$

$$P_{tl} = P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$= 63.45 + 26.01 + 36.61 + 0.72 + 3.0 = 129.79 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{287 - 129.79}{287} \times 100 = 54.78\%$$

$$\hat{n} T_i = 74.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}}{3} = \frac{0.75 + 0.69 + 0.54}{3} = 0.64 \quad \text{A}$$

$$P_{in} = W_1 + W_2 = 85 + 202 = 287 \quad \text{W}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{1500 - 1222}{1500} = 0.185$$

$$R_t = R_b \times \left[ \left( \frac{T_t - T_b}{T_b + k} \right) + 1 \right] = 43.8 \times \left[ \left( \frac{74.2 - 30.0}{30.0 + 234.5} \right) + 1 \right] = 51.12 \quad \Omega$$

$$P_{SCL} = 3I_s^2 R_s = 3(0.64)^2 51.12 = 63.47 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} P_{core} &= P_{in,NL} - P_{SCL,NL} - P_{F\&W} = P_{in,NL} - 3I_{s,NL}^2 R_s - P_{F\&W} \\ &= 50 - 3(0.37)^2 51.12 - 3.0 = 26.01 \text{ W} \end{aligned}$$

$$P_{RCL} = s(P_{in} - P_{SCL} - P_{core}) = 0.185(287 - 63.47 - 26.01) = 36.61 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} P_{misc} &= \frac{0.005[(1-s)(P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{F\&W})]^2}{P_r} \\ &= \frac{0.005[(1-0.185)(287 - 63.47 - 26.01 - 3.0)]^2}{175} = 0.72 \text{ W} \end{aligned}$$

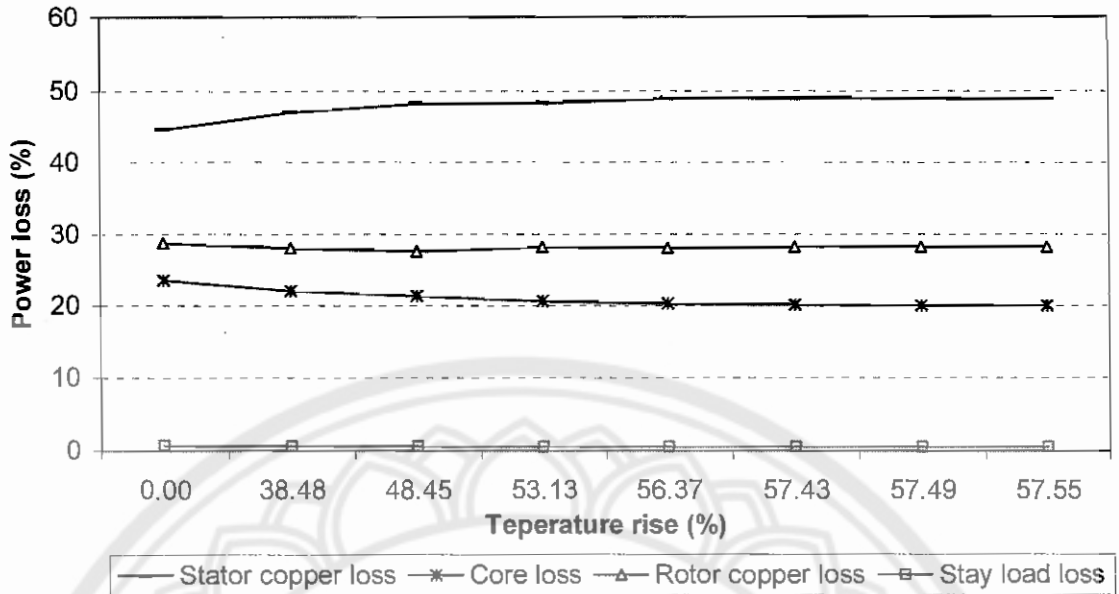
$$\begin{aligned} P_{tl} &= P_{SCL} + P_{RCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} \\ &= 63.47 + 26.01 + 36.61 + 0.72 + 3.0 = 129.80 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{in} - P_{tl}}{P_{in}} \times 100 = \frac{287 - 129.80}{287} \times 100 = 54.77\%$$

ตารางที่ 5.19 สรุปค่าพลังงานสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพมอเตอร์ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะมอเตอร์ที่มีโหลด 100% ของพิกัด โหลดของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์

$T_t$ (°C)	$R_t$ (Ω)	$P_{SCL}$ (W)	$P_{core}$ (W)	$P_{RCL}$ (W)	$P_{misc}$ (W)	$P_{tl}$ (W)	$T_t$ (%)	$P_{SCL}$ (%)	$P_{core}$ (%)	$P_{RCL}$ (%)	$P_{misc}$ (%)	$\eta$ (%)
31.5	44.05	54.69	28.91	35.29	0.83	122.72	0.00	44.57	23.56	28.76	0.68	57.97
51.2	47.31	58.74	27.57	35.03	0.79	125.14	38.48	46.94	22.03	28.00	0.63	56.85
61.1	48.95	60.78	26.90	34.72	0.76	126.16	48.45	48.18	21.32	27.52	0.60	56.20
67.2	49.96	62.03	26.48	36.17	0.74	128.43	53.13	48.30	20.62	28.17	0.58	55.41
72.2	50.79	63.06	26.14	36.13	0.72	129.06	56.37	48.86	20.26	28.00	0.56	55.03
74.0	51.09	63.43	26.02	36.61	0.72	129.78	57.43	48.88	20.05	28.21	0.55	54.78
74.1	51.10	63.45	26.01	36.61	0.72	129.79	57.49	48.89	20.04	28.21	0.55	54.78
74.2	51.12	63.47	26.01	36.61	0.72	129.80	57.55	48.90	20.03	28.20	0.55	54.77

จากตารางที่ 5.19 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์ที่โหลด 100% ดังรูปที่ 5.8



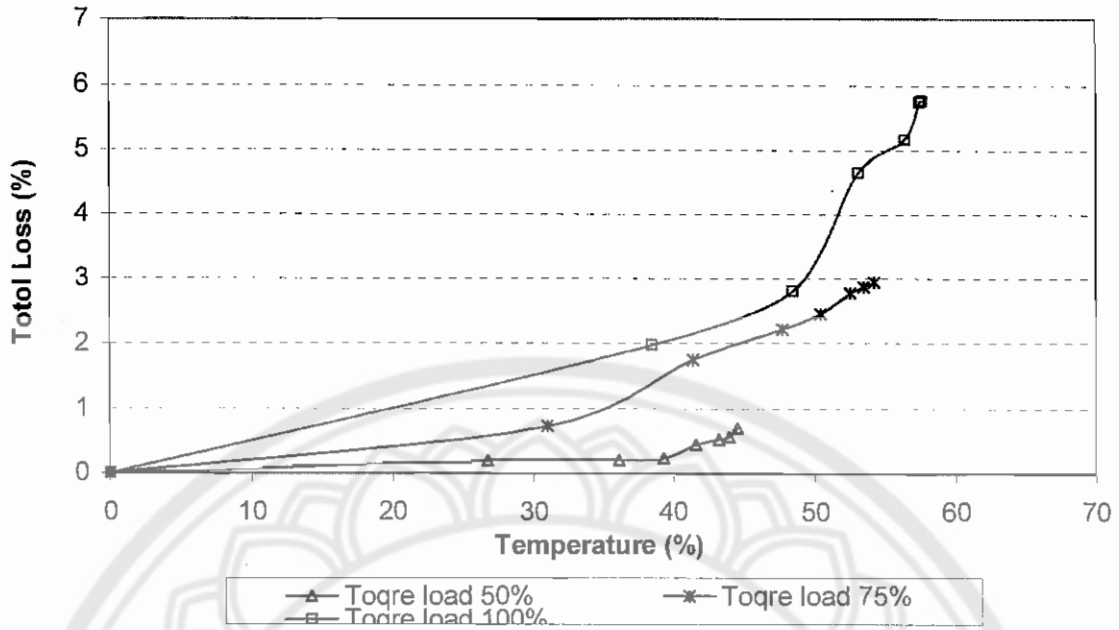
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่างๆ กับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบवालั้โรเตอร์ที่โหลด 100%

จากผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบवालั้โรเตอร์สามารถนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ต่างๆ ของมอเตอร์กับอุณหภูมิได้เป็น

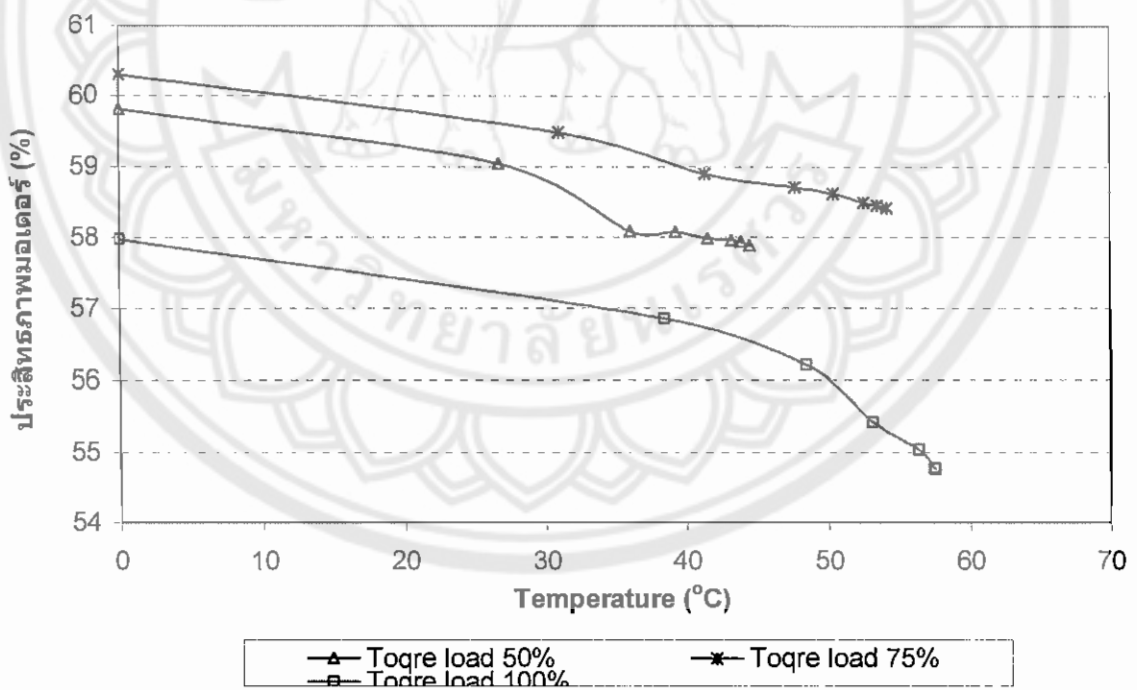
ตารางที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์ที่โหลดต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบवालั้โรเตอร์

	Load 50%			Load 75%			Load 100%		
	$T_i$ (%)	$P_{II}$ (%)	$\eta$ (%)	$T_i$ (%)	$P_{II}$ (%)	$\eta$ (%)	$T_i$ (%)	$P_{II}$ (%)	$\eta$ (%)
0.00	0.00	0.00	59.82	0.00	0.00	60.31	0.00	0.00	57.97
26.74	0.20	0.20	59.05	31.03	0.73	59.49	38.48	1.97	56.85
36.11	0.21	0.21	58.09	41.41	1.74	58.90	48.45	2.80	56.20
39.31	0.24	0.24	58.08	47.74	2.21	58.71	53.13	4.65	55.41
41.56	0.45	0.45	57.99	50.41	2.45	58.62	56.37	5.16	55.03
43.24	0.53	0.53	57.95	52.53	2.77	58.49	57.43	5.75	54.78
43.95	0.56	0.56	57.94	53.49	2.87	58.45	57.49	5.76	54.78
44.54	0.70	0.70	57.88	54.20	2.94	58.42	57.55	5.77	54.77

จากตารางที่ 5.20 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับการสูญเสียรวมและประสิทธิภาพของมอเตอร์ ดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียรวมกับอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพมอเตอร์กับอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการดำเนินการ

#### 6.1 สรุปผลการดำเนินการ

การดำเนินการทดสอบผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่มีต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความต้านทานของขดลวดตัวนำในมอเตอร์ตามอุณหภูมิของมอเตอร์ส่งผลให้ค่ากำลังสูญเสียในขดลวดซึ่งเป็นกำลังสูญเสียที่มีมากในมอเตอร์เพิ่มขึ้น แม้กำลังสูญเสียในส่วนอื่นๆจะลดลงบ้างแต่ถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของกำลังสูญเสียในขดลวด ทำให้กำลังสูญเสียรวมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมอเตอร์สูงขึ้นสูง ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงมีผลกระทบให้ประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นลดลง

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในมอเตอร์นั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน ได้แก่ ปริมาณโหลด สภาพแวดล้อม ความผิดปกติของมอเตอร์ หรือแหล่งจ่าย ฯลฯ นอกจากจะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลงแล้วการใช้งานมอเตอร์ในอุณหภูมิที่สูงยังส่งผลต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อความเสื่อมของฉนวนไฟฟ้าที่เคลือบเส้นลวดตัวนำในมอเตอร์

#### 6.2 วิจารณ์ผลการดำเนินการ

การดำเนินการทดสอบผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่มีต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำครั้งนี้ ในการวิเคราะห์ค่าความต้านทานของขดลวดจะใช้จากการคำนวณเพื่อให้ง่ายต่อการทดสอบ เนื่องจากการใช้เครื่องมือวัดนั้นต้องใช้เวลาในการวัดมาก ซึ่งผลจากการคำนวณนั้นอาจจะมีคลาดเคลื่อนจากการใช้เครื่องมือวัดอยู่บ้างเล็กน้อยประมาณ 0.001% และผลที่ได้จะมีแนวโน้มที่ตรงกันคือ ค่าความต้านทานของขดลวดจะเพิ่มขึ้นและลดลงตามอุณหภูมิ

ส่วนในการวิเคราะห์กำลังสูญเสียต่างๆของมอเตอร์นั้น ผลจากการดำเนินการจะได้ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานของขดลวดซึ่งเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ แต่ในส่วนกำลังสูญเสียบางอย่างนั้นจะมีค่าลดลง เช่น กำลังสูญเสียในแกนเหล็กอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้แกนเหล็กมีค่าความต้านทานฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กลดลงแต่ในการทดสอบครั้งนี้ไม่สามารถนำค่าดังกล่าวมาแสดงได้เนื่องจากขาดอุปกรณ์และความเข้าใจในการแสดงค่าดังกล่าว

และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขณะทำการทดสอบมอเตอร์ถืออยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยแต่ช่วงอุณหภูมิอาจจะไม่กว้างมากนักเนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์ขนาดเล็ก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ผศ.มนตรี สุวรรณภินคาร, “เทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง”, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป; 2550
- [2] มงคล ทองสงคราม, “เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ”, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: รามการพิมพ์; 2535
- [3] A.C.Smith. “Influence of Manufacturing Process on Iron loss.” [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/iel3/3529/10613/00497699.pdf>. 1995.
- [4] M.K.Yoon, C.S.Jeon, and S.Ken Kauh. “Efficiency Increase of an Induction Motor by Improving Cooling Performance.” [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/60/21257/00986430.pdf>. 2002.
- [5] สุวัฒน์ชัย. “การวิเคราะห์ความผิดปกติในมอเตอร์” [Online]. Available: <http://www.vcharkarn.com/varticle/32721>





## ผนวก

### รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์

#### เครื่องวัดอุณหภูมิ Infrared Thermometer ST-8828



รูปที่ 7.1 Infrared Thermometer ST-8828

- ช่วงวัดอุณหภูมิ -50 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส
- ระยะการวัด 12 ต่อ 1 , อ่านค่าเร็ว 0.5 วินาที
- ค่าความละเอียด 0.1C , Emissivity 0.95
- เลือกหน่วยวัดอุณหภูมิ เป็น องศาเซลเซียส หรือ องศาฟาเรนไฮต์ ได้
- มีระบบค้ำถ้ำ , เลขออร์ซีตำแหน่ง

- มีไฟหน้าจอ Back Light
- ใช้แบตเตอรี่ 9 โวลต์ 1 ก้อน , มีระบบเตือนแบตเตอรี่ต่ำ
- ปิดเครื่องอัตโนมัติ
- ขนาด เครื่อง 16.9 x 13.8 x 5.3 เซนติเมตร

