

เทคนิคการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาในสภาวะโหลดเกินปกติ

A TEMPERATURE CALCULATION TECHNIQUE OF INDUCTION MOTOR
STATOR WINDING FOR PERIODICALLY OVERLOAD CONDITION

เปรมศักดิ์ ปรีชา

PREMSAK PREECHA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-753-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาในสภาวะโหลดเกินพิกัด

A TEMPERATURE CALCULATION TECHNIQUE OF INDUCTION MOTOR
STATOR WINDING FOR PERIODICALLY OVERLOAD CONDITION



เปรมศักดิ์ ปรีชา

PREMSAK PREECHA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-648-753-1

**A TEMPERATURE CALCULATION TECHNIQUE OF INDUCTION MOTOR
STATOR WINDING FOR PERIODICALLY OVERLOAD CONDITION**

PREMSAK PREECHA

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-648-753-1

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลาในสถานะโหลดเกินพิกัด
นักศึกษา	นายเปรมศักดิ์ ปรีชา
รหัสประจำตัว	41061013
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.พิชิต ถ้ายอง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาวิธีการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า เมื่อมอเตอร์มีลักษณะการทำงานเป็นคาบเวลาและภาระทางกลเกินพิกัดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60034-1:1996[1] โดยใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำคำนวณกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่มีผลต่ออุณหภูมิในมอเตอร์ ซึ่งประยุกต์ใช้ร่วมกับหลักการของการถ่ายเทความร้อน และใช้สมการโพลีโนเมียลทางคณิตศาสตร์ช่วยคำนวณให้เกิดความแม่นยำยิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้หลักการดังกล่าวเพื่อคำนวณและทำนายอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์เทียบกับการทดสอบจริง เพื่อดูว่ามอเตอร์สามารถทำงานในสถานะที่กำหนดได้หรือไม่ โดยการพิจารณาจากจนวนของมอเตอร์ที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด และยังศึกษาถึงองค์ประกอบต่างๆที่มีผลต่ออุณหภูมิและการทำงานของมอเตอร์ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกคาบเวลาและพิกัดมอเตอร์ไปใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะการทำงานได้อย่างปลอดภัยและเกิดประโยชน์สูงสุด

Thesis Title	A Temperature Calculation Technique of Induction Motor Stator Winding for Periodically Overload Condition
Student	Mr. Premsak Preecha
Student ID.	41061013
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Asst. Prof. Pichit Lamyong

ABSTRACT

This thesis is a study of temperature calculation on stator winding of three-phase 1 hp, 3 hp and 5 hp induction motors when it was periodically operated in overload condition base on IEC 60034-1:1996 [1] standard. This concept is a consideration of an induction motor equivalent circuit in order to calculate the power loss which related to the induction motor temperature. The calculation procedure is applied to the heat transfer principle along with mathematical polynomial equations in order to increase the calculation accuracy. In this thesis, the principle above is used to calculate and predict the stator winding temperature. Considering the insulator temperature and other factors which influence on the temperature and the motor operation, the calculation results are compared with the experimental results in order to investigate whether the motor can be operated under the given conditions or not. The period and rated of the motor can be selected using this calculation to operate safely in practical work for useful purpose.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับคำแนะนำและให้คำปรึกษาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิชิต ถ้ายอง ซึ่งเป็นผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวดี นัทรุททัย ที่ช่วยเหลือแก้ไขและให้คำปรึกษาบางจุดที่ผู้วิจัยติดปัญหา ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ นายรัชต มั่งมีชัย ที่ให้คำปรึกษาเรื่องการใช้เครื่องมือการทดสอบ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทดสอบ และให้ยืมอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณ คุณแม่สงวน ปรีชา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

เปรมศักดิ์ ปรีชา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	X
รายการสัญลักษณ์.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	4
2.1 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	4
2.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	6
2.3 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	7
2.4 การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	8
2.5 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	12
2.6 ฉนวนขงมอเตอร์.....	15
2.7 หลักการวัดอุณหภูมิ.....	16
2.8 การถ่ายเทความร้อน(Heat Transfer).....	17
2.8.1 การนำความร้อน (Conduction).....	17
2.8.2 การพาความร้อน (Convection).....	18
2.9 การนำความร้อนสภาวะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady-State Conduction).....	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.10 การประมาณค่าโพลิโนเมียล (Polynomial Approximation).....	22
2.10.1 การประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Approximation).....	23
2.10.2 การประมาณค่าโพลิโนเมียลกำลังสูง (Higher-Degree Polynomial Approximation).....	24
บทที่ 3 การคำนวณอุณหภูมิมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	26
3.1 ช่วงการขับภาระทางกล.....	27
3.2 ช่วงหยุดการทำงาน.....	30
3.3 พลังงานสะสมของมอเตอร์.....	31
3.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด (Total power loss).....	33
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	35
4.1 ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	36
4.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	37
4.3 ผลการทดสอบการระบายความร้อนและการสะสมความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้า.....	39
4.4 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลา.....	40
4.5 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับการคำนวณมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา.....	46
4.5.1 เมื่อเปลี่ยนภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	46
4.5.2 เมื่อเปลี่ยนช่วงคาบเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	53
4.5.3 เมื่อเปลี่ยนคircuit ไซเคิลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	59
บทที่ 5 บทสรุปและวิเคราะห์ผล.....	65
5.1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	65
5.2 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลา.....	65
5.3 การคำนวณอุณหภูมิเปรียบเทียบกับการทดสอบ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลา.....	66
5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	67

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.5 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	68
5.6 แนวทางในการพัฒนาต่อ.....	68
เอกสารอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบบมาตรฐาน.....	71
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณการระบายความร้อนและการสะสมความร้อนของมอเตอร์..	78
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบเมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นคาบเวลา.....	83
ภาคผนวก ง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	117
ประวัติผู้เขียน.....	125

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขีดจำกัดของอุณหภูมิ.....	16
4.1 Nameplate มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 1 แรงม้า.....	35
4.2 Nameplate มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 3 แรงม้า.....	35
4.3 Nameplate มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 5 แรงม้า.....	35
4.4 ผลการทดสอบการระบายความร้อนของมอเตอร์.....	39
ก.1 ผลการทดสอบ No-load ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า.....	72
ก.2 ผลการทดสอบ Blocked – rotor (ที่ 12.5 Hz) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า.....	72
ก.3 ผลการทดสอบ VI-method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า.....	72
ก.4 ผลการทดสอบหา Friction and Windage loss ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า.....	73
ก.5 ค่า X_1 และ X_m จากการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE Std.112-1996 ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า.....	75
ก.6 ผลการทดสอบ No-load ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า.....	76
ก.7 ผลการทดสอบ Blocked – rotor (ที่ 12.5 Hz) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า.....	76
ก.8 ผลการทดสอบ VI-method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า.....	77
ก.9 ผลการทดสอบหา Friction and Windage loss ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 แรงม้า.....	77
ก.10 ผลการทดสอบ No-load ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 5 แรงม้า.....	77
ก.11 ผลการทดสอบ Blocked – rotor (ที่ 12.5 Hz) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 5 แรงม้า.....	77
ก.12 ผลการทดสอบ VI-method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 5 แรงม้า.....	77
ก.13 ผลการทดสอบหา Friction and Windage loss ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 แรงม้า.....	77
ข.1 ผลการคำนวณอัตราการระบายความร้อนของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า.....	79
ค.1 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มภาระทางกล 10% ถึง 130% ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า.....	84
ค.2 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มภาระทางกล 10% ถึง 130% ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า.....	85
ค.3 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มภาระทางกล 10% ถึง 130% ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า.....	86
ค.4 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดีวีดีไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%.....	87
ค.5 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดีวีดีไซเคิล 50%, ภาระทางกล 130%.....	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.6 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%.....	90
ค.7 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%.....	92
ค.8 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 120%.....	93
ค.9 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 80%, ภาระทางกล 120%.....	95
ค.10 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%.....	97
ค.11 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 130%.....	98
ค.12 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%.....	99
ค.13 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%.....	102
ค.14 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 120%.....	103
ค.15 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 80%, ภาระทางกล 120%.....	105
ค.16 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%.....	106
ค.17 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 130%.....	108
ค.18 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%.....	109
ค.19 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, ควัตซ์ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%.....	112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.20 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวตี้ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 120%.....	113
ค.21 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวตี้ไซเคิล 80%, ภาระทางกล 120%.....	115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	4
2.2 ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	5
2.3 ตัวหมุนกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor).....	6
2.4 วงจรสมมูลตามมาตรฐาน IEEE Std 112-1996.....	7
2.5 ก) วงจรการทดสอบขณะไม่มีภาระทางกล (No-load test) ข) วงจรสมมูลขณะไม่มีภาระทางกล (No-load Equivalent Circuit) ค) วงจรสมมูลขณะยึดโรเตอร์ (Block-rotor test Equivalent Circuit).....	9
2.6 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	12
2.7 แผนผังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	12
2.8 ลักษณะรอยต่อแบบต่างๆของเทอร์โมคัปเปิล ก) Exposed junction, ข) Ungrounded junction, ค) Grounded junction.....	16
2.9 วัสดุแข็งร้อนถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศโดยรอบที่เย็นกว่า.....	20
2.10 การใช้ฟังก์ชันการประมาณค่า ก) การประมาณค่าในช่วง (interpolation), ข) การหาค่าอนุพันธ์ (differentiation) ค) การหาค่าปริพันธ์ (integration).....	22
2.11 การหาค่าโดยประมาณของสมการพหุนาม (Polynomial approximation) ก) การปรับค่าที่แน่นอน(Exact fit), ข) การปรับค่าโดยประมาณ(Approximate fit).....	23
2.12 การปรับค่าโดยประมาณ (Approximate fit).....	23
2.13 แสดงเส้นที่เหมาะสม: ก) $\sum e_i$ ต่ำสุด, ข) $\sum e_i $ ต่ำสุด, ค) ค่าสูงสุด, ง) กำลังสองน้อยสุด.....	24
3.1 แสดงขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	26
3.2 การทำงานเป็นคาบเวลา (Intermittent periodic duty).....	27
4.1 วงจรสมมูลต่อเฟสแบบมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า.....	36
4.2 วงจรสมมูลต่อเฟสแบบมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า.....	36
4.3 วงจรสมมูลต่อเฟสแบบมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 5 แรงม้า.....	36
4.4 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดจากการคำนวณ เปรียบเทียบกับทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า.....	37

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดจากการคำนวณ เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า.....	38
4.6 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดจากการคำนวณ เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า.....	38
4.7 อุณหภูมิทดสอบที่พิกัดภาระทางกล 100% ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เพื่อหาคุณสมบัติการสะสมความร้อนและการระบายความร้อน.....	39
4.8 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	40
4.9 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 110 %.....	41
4.10 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 120 %.....	42
4.11 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 130 %.....	42
4.12 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 110 %.....	43
4.13 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 120 %.....	43
4.14 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 130 %.....	44
4.15 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 110 %.....	44
4.16 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 120 %.....	45
4.17 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 130 %.....	45
4.18 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%.....	47

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.52 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 80%, พิกัดภาระทางกล 120%.....	64
4.53 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ เปรียบเทียบกับทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 80%, พิกัดภาระทางกล 120%.....	64
ก.1 แสดงการหาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า.....	72
ก.2 แสดงการหาค่า Friction and Windage losses ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า.....	73
ก.3 วงจรสมมูลต่อเฟสแบบมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า.....	76
ข.1 ความสัมพันธ์ของอัตราการระบายความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า.....	80
ข.2 ความสัมพันธ์ของอัตราการสะสมความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า.....	82

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
S	สลิป	-
N_s	ความเร็วเชิงโคจร	รอบต่อนาที
N_r	ความเร็วโรเตอร์	รอบต่อนาที
f	ความถี่ด้านสเตเตอร์มอเตอร์	เฮิรต์
f_r	ความถี่ด้านโรเตอร์มอเตอร์	เฮิรต์
V_1	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า	โวลท์
I_1	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า	แอมป์
I_2	กระแสไฟฟ้าโรเตอร์	แอมป์
R_1	ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์	โอห์มต่อเฟส
R_2	ความต้านทานขดลวดโรเตอร์	โอห์มต่อเฟส
R_c	ความต้านทานแกนเหล็ก	โอห์มต่อเฟส
X_m	รีแอกแตนซ์แม่เหล็ก	โอห์มต่อเฟส
X_1	รีแอกแตนซ์ขดลวดสเตเตอร์	โอห์มต่อเฟส
X_2	รีแอกแตนซ์ขดลวดโรเตอร์	โอห์มต่อเฟส
m	จำนวนเฟส	-
V_o	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าต่อเฟสขณะไม่มีภาระ	โวลท์
I_o	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าต่อเฟสขณะไม่มีภาระ	แอมป์
$V_{1,b}$	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าต่อเฟสขณะจับยึดโรเตอร์	โวลท์
$I_{1,b}$	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าต่อเฟสขณะจับยึดโรเตอร์	แอมป์
P_o	กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าต่อเฟสขณะไม่มีภาระ	วัตต์
$P_{1,b}$	กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าต่อเฟสขณะจับยึดโรเตอร์	วัตต์
VAR_o	ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟต่อเฟสขณะไม่มีภาระ	วาร์
VAR_b	ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟต่อเฟสขณะจับยึดโรเตอร์	วาร์
f_b	ความถี่ขณะจับยึดโรเตอร์	เฮิรต์
$X_{1,b}$	รีแอกแตนซ์ขดลวดสเตเตอร์ขณะจับยึดโรเตอร์	โอห์มต่อเฟส
P_{core}	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์	วัตต์
$P_{f\&w}$	กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลม	วัตต์
G_c	ความนำไฟฟ้าของแกน	โอห์ม ⁻¹

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
V_{dc}	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	โวลต์
I_{dc}	กระแสไฟฟ้าตรง	แอมป์
P_{in}	กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสามเฟส	วัตต์
$P_{cu,1}$	กำลังไฟฟ้าสูญเสียสามเฟสด้านขดลวดสเตเตอร์	วัตต์
P_g	กำลังไฟฟ้าช่องว่างอากาศ	วัตต์
$P_{cu,2}$	กำลังไฟฟ้าสูญเสียสามเฟสด้านขดลวดโรเตอร์	วัตต์
P_e	กำลังไฟฟ้าที่ออกจากโรเตอร์	วัตต์
P_{out}	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	วัตต์
T_e	แรงบิดที่ออกจากโรเตอร์	นิวตัน-เมตร
T_o	แรงบิดเอาต์พุต	นิวตัน-เมตร
V_{in}	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าต่อเฟส	โวลต์
I_{in}	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าสามเฟส	แอมป์
P_{in}	กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสามเฟส	วัตต์
V_r	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเฟส R	โวลต์
V_s	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเฟส S	โวลต์
V_t	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเฟส T	โวลต์
I_r	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าเฟส R	แอมป์
I_s	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าเฟส S	แอมป์
I_t	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าเฟส T	แอมป์
P_r	กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าเฟส R	วัตต์
P_s	กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าเฟส S	วัตต์
P_t	กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าเฟส T	วัตต์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(Induction Motor) ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมรวมทั้งภายในบ้านพักอาศัย หน่วยงานของรัฐบาลและเอกชน ผู้ประกอบการส่วนใหญ่นิยมใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่อง(Continuous) มาใช้กับลักษณะการทำงานเป็นคาบเวลา(Duty Cycle) กันเป็นจำนวนมาก เช่น คอมเพรสเซอร์และปั้มน้ำ เป็นต้น ซึ่งในลักษณะการทำงานเป็นคาบเวลาเช่นนี้ บางกรณีมอเตอร์ยังสามารถทำงานในลักษณะภาระทางกลเกินพิกัดและกระแสไฟฟ้าเกินพิกัดของมอเตอร์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องหยุดการทำงาน มอเตอร์ ทรานไคที่อุณหภูมิยังไม่ถึงจุดวิกฤตของฉนวน ปกติมอเตอร์จะเกิดความเสียหายได้นั้น ส่วนใหญ่แล้วเนื่องมาจากฉนวนและวานิชที่เคลือบขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิเกินพิกัดได้ แต่การที่มอเตอร์จะทำงานลักษณะภาระทางกลเกินพิกัดได้นั้นใช้ระยะเวลา นานเท่าใดจึงไม่ทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหายนั้นเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอเทคนิคการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อมีการทำงานแบบ คาบเวลาประเภทที่ 3 (Intermittent Periodic Duty) หรือ S3 ตามมาตรฐาน IEC 60034-1 :1996 [1]

ดังนั้นการเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสมาใช้งานจึงต้องมีความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้อง เพื่อสามารถนำไปใช้กับลักษณะงานต่างๆได้อย่างเหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งหากนำไปใช้อย่างผิดวิธี ผิดประเภทและไม่เหมาะสมกับการใช้งานแล้ว จะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับมอเตอร์ ซึ่งเป็นผลเสียกับระบบไฟฟ้าและกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมได้ [2]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายวิทยานิพนธ์นี้ คือเป็นการนำเสนอเทคนิคการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เมื่อมีการทำงานเป็นคาบเวลาในสภาวะโหลดเกินพิกัดต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1) สามารถใช้เทคนิคการคำนวณดังกล่าวเพื่อทำนายอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ได้
- 2) สามารถบอกได้ว่ามอเตอร์ใช้ระยะเวลานานเท่าไรจึงไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวน
- 3) สามารถเลือกขนาดและพิกัดมอเตอร์ที่ใช้ในลักษณะงานต่างๆได้อย่างเหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุด
- 4) เพื่อศึกษาถึงหลักการถ่ายเทความร้อนของมอเตอร์
- 5) เพื่อศึกษาถึงกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียภายในมอเตอร์ที่มีผลต่ออุณหภูมิอย่างไร
- 6) เพื่อศึกษาถึงองค์ประกอบต่างๆที่มีผลต่ออุณหภูมิของมอเตอร์

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าขั้วภาระทางกลจะมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในตัวมอเตอร์ (Power loss) กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียนี้จะแปรรูปเป็นพลังงานความร้อน และถ้ามีภาระทางกลมากขึ้น กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจะเพิ่มสูงขึ้น พลังงานความร้อนก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้ามอเตอร์มีการทำงานเป็นคาบเวลา ซึ่งประกอบด้วยช่วงขั้วภาระทางกล และช่วงหยุดขั้วภาระทางกลอุณหภูมิของมอเตอร์จะต่ำกว่าเมื่อมอเตอร์ทำงานแบบต่อเนื่อง(Continuous) เหตุเนื่องจากการทำงานที่เป็นแบบคาบเวลายังมีช่วงการหยุดพักการทำงานของมอเตอร์จึงทำให้มีการระบายความร้อนที่ดีกว่า ดังนั้นจึงสามารถนำมอเตอร์ไปใช้งานที่ภาระทางกลเกินพิกัดได้ แต่การเลือกใช้ที่ภาระทางกลเท่าไรและระยะเวลาานเท่าไรนั้น โดยที่ไม่ทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหายจึงเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ดังนั้นถ้าวิเคราะห์หาวิธีหรือเทคนิคการคำนวณอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ได้จะเป็นทางเลือกที่ดีมากสำหรับการคำนวณและทำนายอุณหภูมิของมอเตอร์ เพื่อเลือกขนาดมอเตอร์ไปใช้อย่างเหมาะสมก่อนนำมอเตอร์ไปใช้งาน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในปี ค.ศ.1995 Henneberger G, Ben Yahia K, Schmitz M. [3] ได้นำเสนอเทคนิคการคำนวณหาอุณหภูมิที่ส่วนต่างๆของมอเตอร์ โดยการใช้วงจรสมมูลความร้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำคำนวณอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง งานวิจัยนี้ได้นำเสนอถึงเทคนิคการคำนวณเปรียบเทียบให้เห็น 2 วิธีคือ เทคนิคของ The Least Square Method และเทคนิคของ Gauss – Newton Method with Line Search เพื่อช่วยให้การคำนวณอุณหภูมิใกล้เคียงกับการทดสอบยิ่งขึ้น โดยวิธีการของ The Least Square Method จะใช้ค่าที่ได้จากการวัดทางด้านอินพุตและจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ซึ่งวิธีการนี้ง่ายต่อการคำนวณโดยให้ผลออกมาเป็นที่น่าพอใจกว่าวิธีของ Gauss – Newton Method with Line Search ซึ่งต้องหาค่าพารามิเตอร์แบบเวกเตอร์เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของสมการ แต่ผลจากการคำนวณเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธีนี้ เป็นวิธีการที่ใช้คำนวณอุณหภูมิในสถานะที่ไม่คงที่ได้ดีเหมือนกัน

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อมอเตอร์มีลักษณะการทำงานเป็นคาบเวลาและภาระทางกลเกินพิกัดต่างๆ โดยใช้อุปกรณ์สมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มีผลต่ออุณหภูมิในมอเตอร์ ซึ่งประยุกต์ใช้ร่วมกับหลักการของการถ่ายเทความร้อนและใช้สมการ โพลิโนเมียล(Polynomial) ประยุกต์ร่วมกับวิธี The Least Square Method ทางคณิตศาสตร์ช่วยคำนวณให้เกิดความแม่นยำยิ่งขึ้น ซึ่งข้อดีของสมการที่นำเสนอนี้สามารถคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เมื่อเปลี่ยนคาบเวลาการทำงานของมอเตอร์ได้ เมื่อเปลี่ยนคิวตี้ไซเคิลได้ และเปลี่ยนพิกัดภาระทางกลก็ได้ หรือแม้กระทั่งเปลี่ยนขนาดมอเตอร์ก็ยังคำนวณได้เช่นเดียวกัน

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อมีการทำงานแบบคาบเวลาประเภทที่ 3 (Intermittent Periodic Duty) หรือ S3 ตามมาตรฐาน IEC 60034-1:1996[1] สำหรับมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบมีทั้งหมด 3 ตัวคือ ขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก, 380 โวลต์, 50 เฮิรท์ โดยมีการทดสอบมอเตอร์เมื่อมีการทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาที คิวตี้ไซเคิล 50% และ 80% ที่ภาระทางกลเกินพิกัด 110%, 120% และ 130% ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะชี้ให้เห็นเด่นชัดถึงการนำเสนอการคำนวณเปรียบเทียบกับ การทดสอบจริงโดยแบ่งการนำเสนอ 3 กรณีคือ เมื่อมีการเปลี่ยนภาระทางกล, เมื่อมีการเปลี่ยนคาบเวลา และเมื่อมีการเปลี่ยนคิวตี้ไซเคิล

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยโดยกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่างๆเป็นลำดับดังนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของมอเตอร์ ทฤษฎีหลักการถ่ายเทความร้อนซึ่งประกอบด้วยการนำความร้อนและการพาความร้อน[4] อีกส่วนหนึ่งที่กล่าวถึงคือ ทฤษฎีของสมการโพลิโนเมียล(Polynomial) ซึ่งเป็นสมการทางคณิตศาสตร์เหมาะสำหรับช่วยคำนวณข้อมูลที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear)

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงการคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์ เมื่อมีลักษณะการทำงานเป็นคาบเวลา ซึ่งประกอบด้วยช่วงการขับภาระทางกลและช่วงหยุดขับภาระทางกล ทั้งสองช่วงนี้จะมีการสะสมความร้อนและการระบายความร้อน ดังนั้นจะพิสูจน์สมการสำคัญที่ใช้คำนวณสำหรับงานวิจัยนี้คือ สมการการสะสมความร้อน และสมการการระบายความร้อนของมอเตอร์

บทที่ 4 เป็นผลการทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์และนำไปสู่การคำนวณหา กำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในมอเตอร์ และเป็นผลการทดสอบหาการสะสมความร้อนและการระบายความร้อนของมอเตอร์แต่ละตัว จากนั้นนำองค์ประกอบต่างๆที่มีผลต่ออุณหภูมิของมอเตอร์เพื่อคำนวณเปรียบเทียบกับ การทดสอบจริง เมื่อให้มอเตอร์มีลักษณะการทำงานเป็นคาบเวลาและสภาวะโหลดเกินพิกัดต่างๆ โดยมีเงื่อนไขในการนำเสนอ 3 กรณี เพื่อเป็นการพิสูจน์สมการที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ คือ เมื่อเปลี่ยนภาระทางกลของมอเตอร์, เมื่อเปลี่ยนช่วงคาบเวลาของมอเตอร์ และ เมื่อเปลี่ยนคิวตี้ไซเคิลของมอเตอร์

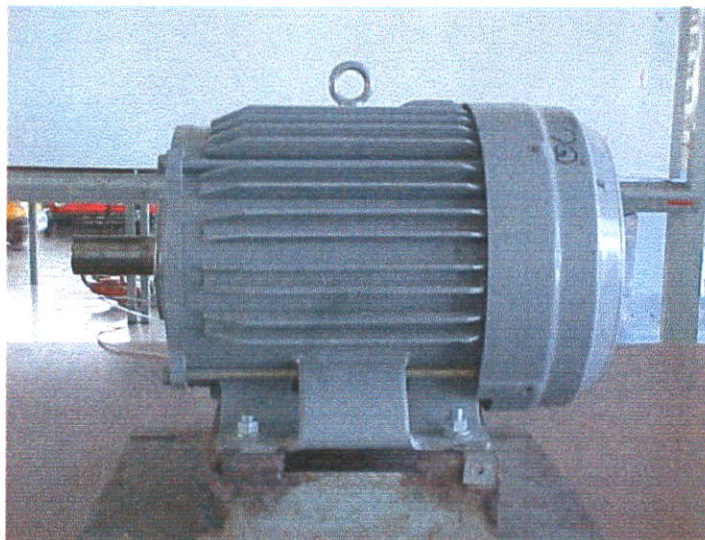
บทที่ 5 เป็นการสรุปและวิเคราะห์ผลงานวิจัย โดยเน้นถึงการนำเสนอไปใช้ในการคำนวณ และทำนายอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และเป็นการวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบต่างๆที่มีผลต่ออุณหภูมิของมอเตอร์

บทที่ 2

ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำและซิงโครนัสมอเตอร์ มีใช้งานอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และโรงงานขนาดเล็กแม้แต่ในบ้านพักอาศัยก็มีใช้กัน ซึ่งอาจจะอยู่ในลักษณะของเครื่องอำนวยความสะดวกทั้งที่จำเป็นและฟุ่มเฟือยในรูปแบบต่างๆ มากมาย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับคือ เครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนรูปกำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานกล กำลังไฟฟ้าไม่ได้นำเข้าสู่โรเตอร์ของมอเตอร์โดยตรงแต่ได้จากการเหนี่ยวนำ การหมุนของมอเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดสเตเตอร์ที่มีผลต่อตัวนำในโรเตอร์



รูปที่ 2.1 ลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

ปกติเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นไปได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อกล่าวถึงเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงมักหมายถึง มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือมอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ มอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นส่วนใหญ่ เพราะมอเตอร์ชนิดนี้มีราคาไม่แพงนัก ต้องการการบำรุงรักษาน้อยและมีความเร็วรอบเกือบคงที่ คือความเร็วลดลงจากสภาพที่ไม่มีภาระทางกล จนกระทั่งขั้วภาระทางกลเต็มที่เพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ แต่มีข้อเสียคือ

- ควบคุมความเร็วยาก
- ขณะมีภาระทางกลน้อยจะทำงานที่ Power Factor ต่ำและล้าหลัง

- กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนมักจะเป็น 5 เท่า หรือ 7 เท่าของกระแสไฟฟ้าขณะขับเคลื่อนทางกลเต็มที่ (กระแสไฟฟ้าที่พิกัด)

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสมีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วน คือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุนหรือเคลื่อนที่ (Rotor)

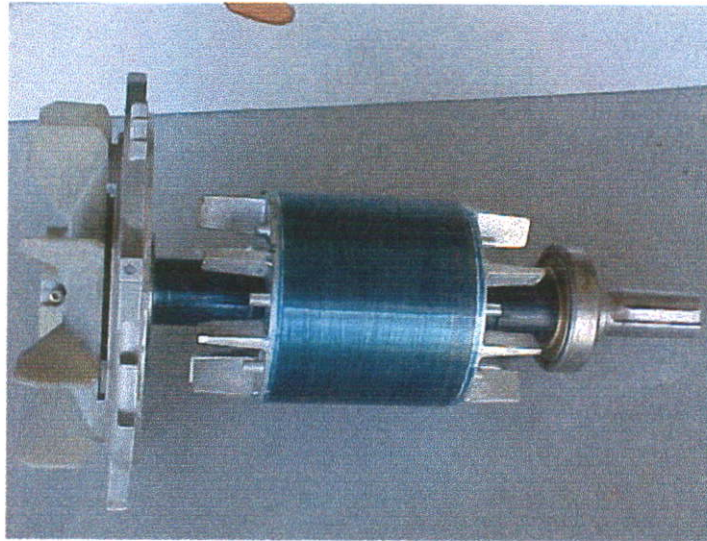
ส่วนที่อยู่กับที่มีขดลวดพันอยู่ในช่อง(Slot) ภายในของส่วนที่อยู่กับที่ ลักษณะการพันขดลวดอาจเป็นแบบเฟสเดียวหรือหลายเฟสก็ได้ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสามเฟส



รูปที่ 2.2 ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ส่วนที่หมุน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบที่มีตัวหมุนคล้ายกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) และแบบที่ตัวหมุนมีขดลวดพันอยู่รอบ ๆ (Wound Rotor) สำหรับวิทยานิพนธ์นี้กล่าวเฉพาะตัวหมุนแบบกรงกระรอก

ตัวหมุนแบบกรงกระรอก(Squirrel Cage Rotor) มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยส่วนมากเป็นโรเตอร์แบบนี้ซึ่งมีชื่อเรียกว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำโรเตอร์กรงกระรอก โรเตอร์ชนิดนี้สร้างง่ายที่สุด ประกอบด้วยแท่งอลูมิเนียมฝังอยู่ในท่อนโรเตอร์ ซึ่งเป็นเหล็กอ่อนแผ่นบางๆประกอบเป็นท่อนโรเตอร์ ปลายทั้งสองด้านของแท่งอลูมิเนียมจะเชื่อมเข้าด้วยกันกับวงแหวน ดังนั้นจึงมีรูปร่างคล้ายกับกรงกระรอก เนื่องจากแท่งอลูมิเนียมนี้ถูกต่อให้ครบวงจรด้วยวงแหวน จึงไม่สามารถที่จะต่อความต้านทานภายนอกเข้าไปได้ เพื่อทำให้ความต้านทานของวงจรโรเตอร์มากขึ้นในตอนหมุน ซึ่งเป็นการลดกระแสและทำให้แรงบิดเริ่มหมุนดีขึ้น แท่งอลูมิเนียมที่ฝังอยู่กับโรเตอร์นี้วางเรียงกับแนวแกนเพลาเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กข้ามช่องว่างอากาศ(Air Gap) จากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.3 ตัวหมุนกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor)

2.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อาศัยการเหนี่ยวนำจากสเตเตอร์ไปสู่โรเตอร์ โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่สเตเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนในช่องว่างอากาศจะถูกสร้างโดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดที่พันอยู่ในร่องสลิตของสเตเตอร์ ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์และความถี่ของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าดังสมการด้านล่าง

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

เมื่อ N_s คือ ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

f คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz)

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole)

การหมุนของโรเตอร์อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าด้านโรเตอร์ เมื่อตัวนำทางด้านโรเตอร์ถูกตัดวงจรด้านหัวและท้ายจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลบนโรเตอร์ และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่วางอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กจะเกิดแรงขึ้นที่ตัวนำ ทำให้โรเตอร์สามารถหมุนได้

เมื่อโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนคงที่ด้วยความเร็วรอบ N_r รอบต่อนาที มีทิศทางการหมุนเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนในช่องว่างอากาศหรือความเร็วซิงโครนัส N_s รอบต่อนาที โรเตอร์จะหมุนตามหลังความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน $N_s - N_r$ รอบต่อนาที หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สลิปของโรเตอร์

ให้ S เป็นอัตราส่วนของความเร็วสลลิป
$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.2)$$

$$\% Slip = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \quad (2.3)$$

ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์อยู่ในสภาวะอยู่กับที่ ความถี่ในวงจรโรเตอร์ (Rotor Frequency) จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว N_r อัตราการตัดสนามแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับรอบต่อนาที $N_s - N_r$ ความถี่ในวงจรโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับความเร็วสลลิป

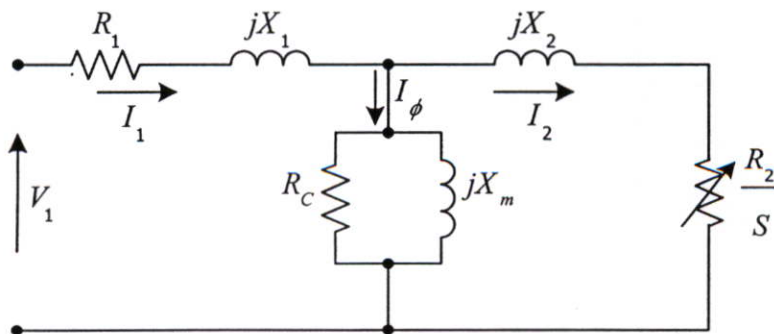
$$f_r = Sf \quad (2.4)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ที่สเตเตอร์ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์

f_r คือ ความถี่ที่โรเตอร์ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์

2.3 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีขดลวดสเตเตอร์สามเฟสต่ออยู่ในลักษณะสตาร์(Y-connection) ที่สมมาตรและต่ออยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสถานะเฟสสมดุล โดยกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและพารามิเตอร์ต่างๆพิจารณาเป็นปริมาณในหนึ่งเฟส ดังนั้นการหาพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้แก่ กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และประสิทธิภาพสามารถคำนวณได้จากวงจรสมมูลตามมาตรฐาน IEEE 112-1996 [5] ที่ถ่ายโอนมาทางค่านสเตเตอร์ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลตามมาตรฐาน IEEE Std 112-1996

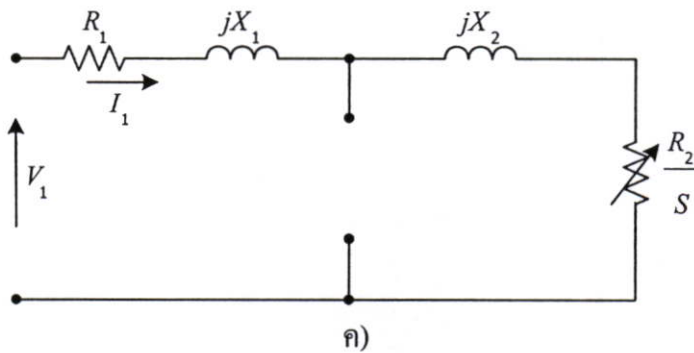
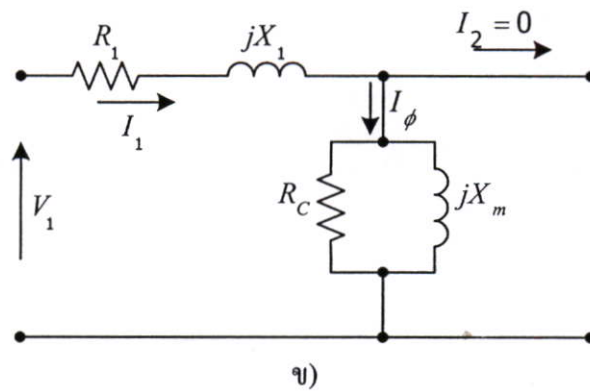
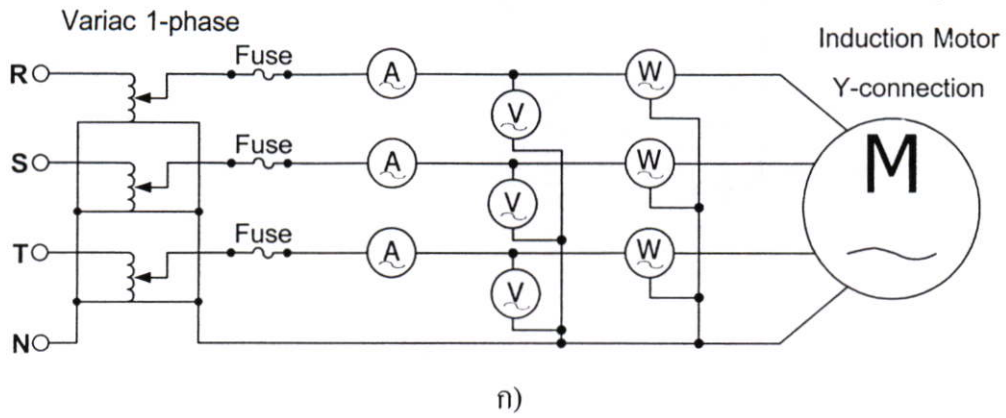
- เมื่อ V_1 คือ แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า (โวลท์)
 I_1 คือ กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า (แอมป์)
 I_2 คือ กระแสไฟฟ้าโรเตอร์ (แอมป์)
 S คือ สลิป
 R_1 คือ ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (โอห์มต่อเฟส)
 R_2 คือ ความต้านทานขดลวดโรเตอร์ (โอห์มต่อเฟส)
 R_c คือ ความต้านทานแกนเหล็ก (โอห์มต่อเฟส)
 X_m คือ รีแอกแตนซ์แม่เหล็ก (โอห์มต่อเฟส)
 X_1 คือ รีแอกแตนซ์ขดลวดสเตเตอร์ (โอห์มต่อเฟส)
 X_2 คือ รีแอกแตนซ์ขดลวดโรเตอร์ (โอห์มต่อเฟส)

2.4 การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.4 เป็นวงจรสมมูลแบบมาตรฐาน IEEE Std 112-1996 ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งถูกใช้อย่างมากในการคำนวณหาผลตอบสนองต่างๆของมอเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหาได้จากการทดสอบขณะไม่มีภาระทางกล (No-load test) และ การทดสอบชัตโรเตอร์ (Block-rotor test)

การทดสอบขณะไม่มีภาระทางกล (No-load test) โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสภาวะเฟสสมดุลและความถี่ที่พิกัดให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.5(ก) เป็นผลทำให้ความเร็วโรเตอร์ใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส สลิปจึงเข้าใกล้ศูนย์ เปรียบเสมือนเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นกระแสทางด้านโรเตอร์จึงมีค่าน้อยมากจึงสามารถตัดการสูญเสียทางด้านโรเตอร์ออกได้ ดังรูปที่ 2.5(ข) กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ส่วนใหญ่จะสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) การสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (Stator Copper Loss) และการสูญเสียเนื่องจากการหมุน (Rotational Loss) ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบคือ R_c และ X_m

การทดสอบชัตโรเตอร์(Block-rotor test) ตามมาตรฐาน IEEE Std 112-1996 ทำได้โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัดกระแสไฟฟ้า และที่ 25 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดความถี่ (สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความถี่ที่ 12.5 เฮิรตซ์ เพื่อทำการ Block-rotor test เนื่องจากมอเตอร์ที่ทดสอบใช้กับความถี่ที่ 50 เฮิรตซ์ ดังนั้นแหล่งจ่ายที่ใช้จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งสามารถควบคุมความถี่ได้) การต่อวงจรทดสอบเหมือนกับการทดสอบขณะไม่มีภาระทางกลดังรูปที่ 2.5(ก) ซึ่งการทดสอบชัตโรเตอร์นี้เปรียบเสมือนเป็นการลัดวงจร (Short Circuit Test) ทางด้านโรเตอร์ โดยปกติแล้วแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าขณะทดสอบชัตโรเตอร์มีค่าน้อยมากเมื่อจ่ายถึงกระแสพิกัด ดังนั้นจึงมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน R_c และ X_m น้อยมากจึงละทิ้งได้ ดังรูปที่ 2.5(ค)



รูปที่ 2.5 ก) วงจรการทดสอบขณะไม่มีภาระทางกล (No-load test)

ข) วงจรสมมูลขณะไม่มีภาระทางกล (No-load Equivalent Circuit)

ค) วงจรสมมูลขณะยึดโรเตอร์ (Block-rotor test Equivalent Circuit)

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากมาตรฐาน IEEE 112-1996 (Form F1-Method F-F1) [5]
สำหรับการคำนวณวิธีนี้สามารถแยกอิมพีแดนซ์ระหว่าง X_1 และ X_2 ได้โดยพิจารณาจาก

$$\left(\frac{X_1}{X_2} \right) = 1.0 \text{ for Design A, Design D, and wound-rotor motor.}$$

$$\left(\frac{X_1}{X_2} \right) = 0.67 \text{ for Design B motor.}$$

$$\left(\frac{X_1}{X_2} \right) = 0.43 \text{ for Design C motor.}$$

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้โรเตอร์มีลักษณะเป็น Design A ดังนั้น $\left(\frac{X_1}{X_2} \right) = 1$

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าของ X_m จากสมการที่ 2.5 โดยสมมติค่าของ $\frac{X_1}{X_m}$ และ X_1

$$X_m = \frac{mV_o^2}{VAR_o - mI_o^2 X_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{X_1}{X_m}} \right)^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ $VAR_o = \sqrt{(mV_o I_o)^2 - P_o^2} \quad (2.6)$

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าของ $X_{1,b}$ จากสมการที่ 2.7 โดยใช้ค่าของ $\frac{X_1}{X_m}$ จากขั้นตอนที่ 1

$$X_{1,b} = \frac{VAR_b}{mI_{1,b}^2 \left(1 + \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right)} \left(\frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อ
$$VAR_b = \sqrt{(mV_{1,b}I_{1,b})^2 - P_{1,b}^2} \quad (2.8)$$

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าของ X_1 จากสมการที่ 2.9

$$X_1 = \frac{f}{f_b} X_{1,b} \quad (2.9)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าของ X_m จากสมการที่ 2.5 โดยใช้ค่าของ X_1 จากขั้นตอนที่ 3 และใช้อัตราส่วนของ $\frac{X_1}{X_m}$ จากขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาไปจนกระทั่งค่าของ X_1 และ X_m ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือจนกว่าจะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.1%

เมื่อได้ค่าของ X_1 และ X_m ตามที่กำหนดแล้วก็สามารถนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ได้ตามลำดับต่อไป

$$X_2 = \frac{X_1}{\left(\frac{X_1}{X_2} \right)} \quad (2.10)$$

$$P_{core} = P_o - P_{f\&w} - mI_o^2 R_1 \quad (2.11)$$

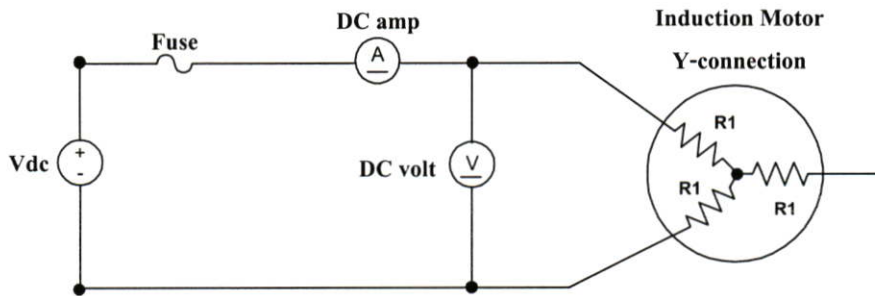
$$G_c = \frac{P_{core}}{mV_o^2} \left(1 + \frac{X_1}{X_m} \right)^2 \quad (2.12)$$

$$R_c = \frac{1}{G_c} \quad (2.13)$$

$$R_2 = \left(\frac{P_{1,b}}{mI_{1,b}^2} - R_1 \right) \left(1 + \frac{X_2}{X_m} \right)^2 - \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^2 (X_{1,b}^2 G_c) \quad (2.14)$$

ค่า R_1 ได้จากการทดสอบ VI – method test ซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 2.6 โดยนำค่า V_{dc} และ I_{dc} มาพล็อตกราฟแล้วเลือกช่วงกราฟที่มีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด ตัวอย่างการคำนวณดังภาคผนวก ก.

$$R_1 = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_{dc}}{\Delta I_{dc}} \quad (2.15)$$

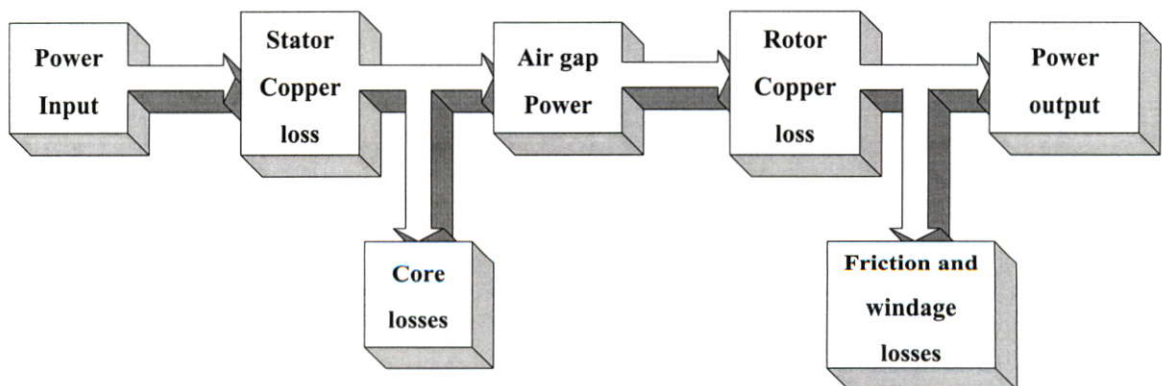


รูปที่ 2.6 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า

2.5 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังกลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ กำลังป้อนเข้าไม่ได้เกิดจากการป้อนไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่เป็นการถ่ายทอดผ่านช่องว่างอากาศด้วยการเหนี่ยวนำไฟสถับที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และความถี่ขึ้นที่โรเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าแบบสามเฟสและกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้าจ่ายแก่ภาระทางกลสามารถแสดงเป็นแผนผังดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนผังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากแผนผังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (Input power) เข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้นจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss) และการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) ในรูปความร้อน กำลังส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านช่องว่างอากาศให้กับโรเตอร์ เรียกว่ากำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศ (Power across air gap) เมื่อถ่ายเทกำลังไฟฟ้าให้กับโรเตอร์ส่วนหนึ่งจะเกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (Rotor copper loss) ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังไฟฟ้าที่ส่งออกจากโรเตอร์ (Electromagnetic power) และยังมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียอีกส่วนหนึ่งซึ่งเป็นกำลังสูญเสียที่น้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียจากส่วนต่างๆคือแรงเสียดทานและแรงต้านลมขณะมอเตอร์หมุน (Friction and windage loss) จากนั้นกำลังไฟฟ้าที่เหลือจะเป็นกำลังงานกลที่จะไปขับภาระทางกล (Output power)

การสูญเสียในแกนเหล็ก(core loss) เกิดขึ้นได้ที่สเตเตอร์และโรเตอร์แต่ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวของโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ ด้วยเหตุนี้การสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงรวมไว้ด้วยกันในส่วนของสเตเตอร์

ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมมากขึ้น แต่จะทำให้การสูญเสียในแกนลดลง จึงได้รวมการสูญเสียเหล่านี้เข้าด้วยกันเรียกว่า Rotational and core losses และจะพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่ด้วยความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง

กำลังไฟฟ้าอินพุตที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (Input power)

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (2.16)$$

กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss)

$$P_{cu,1} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.17)$$

กำลังในช่องว่างอากาศ (Power across air-gap)

$$P_g = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.18)$$

กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในโรเตอร์ (Rotor copper loss)

$$P_{cu,2} = 3I_2^2 R_2 = sP_g \quad (2.19)$$

กำลังที่ออกจากโรเตอร์ (Electromagnetic power)

$$P_e = P_g - P_{cu,2} = (1-s)P_g \quad (2.20)$$

แรงบิดที่ได้จากการเหนี่ยวนำในโรเตอร์ (Electromagnetic torque)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2.21)$$

กำลังที่ไปขับเคลื่อนทางกล (Output power)

$$P_{out} = P_e - P_r = T_0 \omega_r \quad (2.22)$$

แรงบิดทางกล (Output torque)

$$T_0 = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad (2.23)$$

เมื่อ

$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{4\pi f}{P} \quad (2.24)$$

$$\omega_r = \frac{2\pi N_r}{60} = (1-s)\omega_s \quad (2.25)$$

โดยที่

ω_s : ความเร็วซิงโครนัสเชิงมุม, rad/s

ω_r : ความเร็วโรเตอร์เชิงมุม, rad/s

กำลังส่วนที่สูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ในสมการที่ 2.17 กำลังส่วนที่สูญเสียจากความต้านทานขดลวดโรเตอร์ในสมการที่ 2.19 และกำลังสูญเสียในส่วนของ Rotational and core loss เมื่อนำกำลังสูญเสียทั้งสามส่วนมารวมกันจะเป็นกำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ (Power loss)

$$\text{Power loss} = \text{Power input} - \text{Power output} \quad (2.26)$$

ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ (η) นิยมคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.27)$$

หรือ

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100 \quad (2.28)$$

2.6 ฉนวนของมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าถูกออกแบบให้สามารถทำงานได้ตามพิกัดกำลังจากที่ระบุไว้บน Nameplate ได้โดยที่มอเตอร์ไม่เป็นอันตราย โดยฉนวนที่ใช้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ต้องทนอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้ ถ้าอุณหภูมิสูงเกินพิกัดทำให้ขดลวดสเตเตอร์ไหม้ วัสดุที่เป็นฉนวนสามารถแบ่งแยกได้หลายชนิด (Class) แต่ละชนิดอาจประกอบด้วยอัตราส่วนของวัสดุที่แตกต่างกันตามโครงสร้างหรือจุดประสงค์การใช้งาน ดังนั้นฉนวนแต่ละชนิดย่อมทนอุณหภูมิได้ไม่เท่ากัน สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดสอบมอเตอร์ฉนวนคลาส E ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูงสุด 120 °C และฉนวนคลาส F ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูงสุด 155 °C ดังตารางที่ 2.1 แต่สำหรับการทดสอบหรือการใช้งานจริงๆแล้ว ต้องเผื่ออุณหภูมิ (Safety margin) ประมาณ 5 °C สำหรับฉนวนคลาส E และ 10 °C สำหรับฉนวนคลาส F ดังนั้นจะต้องหยุดการทดสอบมอเตอร์ฉนวนคลาส E ที่อุณหภูมิ 115 °C และฉนวนคลาส F ที่อุณหภูมิ 145 °C ก่อนที่จะถึงอุณหภูมิสูงสุดของฉนวนที่สามารถทนได้ เพื่อความปลอดภัยต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า

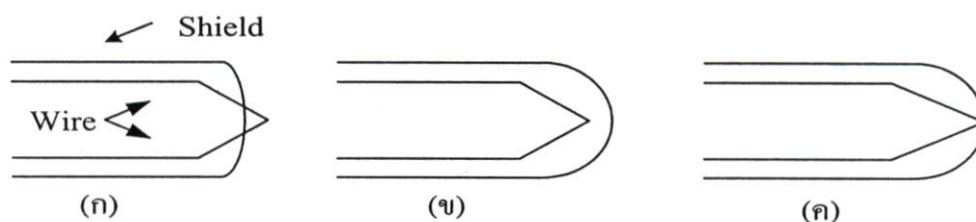
ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดของอุณหภูมิ

Limit of Temperature Rise in Drip proof, open of Totally Enclosed Fan-cooled Motors (JIS C 4004)			
Insulation class	E	B	F
Maximum Permissible Temperature	120	130	155
Measuring method	Resistance Method	Resistance Method	Resistance Method
Coil windings Temperature	75	80	100

Maximum ambient Temperature is 40 °C unit in °C

2.7 หลักการวัดอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิลเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทำจากโลหะสองเส้นที่ต่างชนิดกันนำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน เมื่อปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกันจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสอง ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานขึ้นหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะที่ต่าง ๆ กัน



รูปที่ 2.8 ลักษณะรอยต่อแบบต่างๆของเทอร์โมคัปเปิล

- (ก) Exposed junction
- (ข) Ungrounded junction
- (ค) Grounded junction

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K (Type K Chromel V.S. Alumel) ซึ่งมีคุณสมบัติคือ สายบวกรทำจากโลหะผสมระหว่าง นิกเกิล 10% + โครเมียม 90% และสายลบทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 95% +5% ของส่วนผสมระหว่างอลูมิเนียม, แมงกานีสและซิลิกอน ใช้กับงานที่เป็นสภาวะ Oxidizing ได้ดีกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งทนอุณหภูมิได้ถึง 1,260 °C และอุณหภูมิต่ำถึง -250°C ในสภาพงานที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อนก็สามารถใช้งานได้ดีเช่นกัน คุณสมบัติที่เด่นมากคือ ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่าแบบอื่น ๆ ไม่ควรใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K สัมผัสโดยตรงในสภาวะที่เป็น Reducing Oxidizing ในสภาวะงานที่มีไอของซัลเฟอร์และในสภาวะที่เป็น Vacuum ยกเว้นในช่วงสั้นๆ ถ้าจำเป็นต้องทำงานในสภาวะดังกล่าวต้องใช้ Protecting tube ป้องกัน

2.8 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ พลังงานไม่สามารถที่จะสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายได้ แต่พลังงานสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ ดังนั้นการถ่ายเทพลังงานในแง่ของความร้อนนั้นไม่สามารถที่จะวัดโดยตรงได้ แต่สามารถพิจารณาได้จากวิธีทางฟิสิกส์เพราะว่าความร้อนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่วัดได้ โดยการสังเกตพบว่าเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในระบบ ความร้อนก็จะมีการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

ในการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน ความร้อนสามารถเคลื่อนที่จากจุดๆหนึ่งไปยังจุดอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกันคือการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน สำหรับการถ่ายเทความร้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีทั้งสามวิธีดังกล่าว แต่การแผ่รังสีความร้อนน้อยมากจึงไม่นำมาคิดละเว้นได้ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำส่วนใหญ่ประกอบด้วย การนำความร้อนและการพาความร้อนเป็นหลัก

2.8.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อนคือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่มีอุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อนความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการนำเกิดขึ้นบ้างในของเหลวและก๊าซ ความร้อนโดยการนำเคลื่อนที่ได้โดยอิเล็กตรอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่จุดที่มีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ความร้อนยังเคลื่อนที่ได้โดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในของแข็งในลักษณะของพลังงานความสั่นสะเทือน (Vibrational Energy) อีกด้วย

หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกตั้งขึ้นโดย โจเซฟ โฟริเออร์ (Joseph Fourier) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยการนำ ในปี ค.ศ 1822 โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองไว้ดังนี้คือ

$$q_x = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.29)$$

เมื่อ q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x มีหน่วยเป็น (W)

k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) มีหน่วยเป็น (W/m°C)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน มีหน่วยเป็น m^2

$\frac{dT}{dx}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

สมการนี้เรียกว่า Fourier rate equation ซึ่งเป็นสมการที่ได้มาโดยอาศัยผลการทดลอง เครื่องหมายลบซึ่งก็คือ กฎของฟูเรียร์ (Fourier' Law) โดยพิจารณาจากกฎข้อสองของเทอร์โมไดนามิกส์ การถ่ายเทความร้อนในสถานะสม่ำเสมอ จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิทุกๆจุดภายในวัตถุและบริเวณผิวจะไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ถ้าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแล้ว ย่อมแสดงว่าปริมาณพลังงานจะเกิดการสะสม หรือถ่ายเทออกจากวัตถุนี้ ดังนั้นอัตราการสะสมความร้อนภายในวัตถุนี้คือ

$$q_{stored} = mC_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.30)$$

เมื่อ q_{stored} คือ อัตราการสะสมความร้อนภายในวัตถุ มีหน่วยเป็น (W)

m คือ มวลของวัตถุ มีหน่วยเป็น (kg)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของวัตถุ มีหน่วยเป็น (J/kg°C)

$\frac{\partial T}{\partial t}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา

2.8.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล การพายังแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การพาโดยบังคับ (Forced convection) และการพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection)

การพาโดยบังคับ (Forced convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอกเช่น พัดลม หรือเครื่องสูบน้ำ เป็นต้น สำหรับการพาความร้อนโดยบังคับของมอเตอร์เหนี่ยวนำ คือพัดลมที่ติดกับตัวมอเตอร์เป็นตัวระบายความร้อน

การพาตามธรรมชาติ (Natural or Free convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใดๆที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางในบรรยากาศให้เย็น

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้วมีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพานี้ เป็นต้นว่า คุณสมบัติของของไหลเช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็งและของไหล เป็นต้น นิวตัน(Newton) ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาดังนี้คือ

$$q = hA(T_h - T_c) \quad (2.31)$$

เมื่อ q คือ อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา มีหน่วยเป็น (W)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น ($W/m^2\text{ }^\circ C$)

A คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น (m^2)

T_h คือ อุณหภูมิที่ร้อน มีหน่วยเป็น ($^\circ C$)

T_c คือ อุณหภูมิที่เย็น มีหน่วยเป็น ($^\circ C$)

2.9 การนำความร้อนสถานะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady-State Conduction)

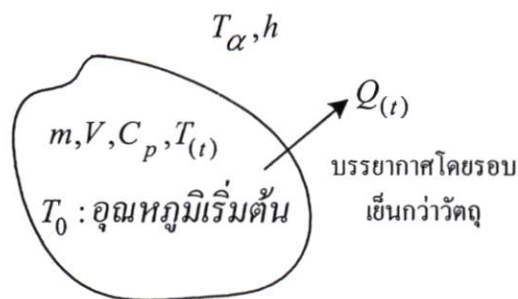
ถ้าอุณหภูมิล้อมรอบวัตถุแข็งเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดแล้ว อุณหภูมิในเนื้อวัตถุนั้นจะเริ่มเปลี่ยนแปลงเพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุลสม่ำเสมอ ในกรณีนี้จะใช้เวลาช่วงหนึ่งก่อนจะเข้าสู่สภาวะสม่ำเสมอ ซึ่งช่วงนี้จะเรียกว่า สภาวะไม่สม่ำเสมอ(Unsteady-State) หรือสภาวะชั่วขณะ (Transient) การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิภายในวัตถุระหว่างช่วงสภาวะไม่สม่ำเสมอค่อนข้างยุ่งยากมาก เนื่องจากอุณหภูมิแปรเปลี่ยนตามตำแหน่งและเวลาตลอด ในการวิเคราะห์ในทางปฏิบัติเป็นจำนวนมาก การแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิกับตำแหน่งถูกละเลยไม่นำมาคิดในช่วงสภาวะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาเท่านั้น ซึ่งการวิเคราะห์

ภายใต้เงื่อนไขนี้เรียกว่า การวิเคราะห์ระบบความร้อนที่เป็นกลุ่มก้อน (Lumped system analysis) เช่น ลูกกลมโลหะร้อนซึ่งถูกนำออกจากเตาเผาแล้ววางไว้ในกระแสดอากาศพลังงานจะถูกถ่ายเทออกไปโดยการพาและการแผ่รังสีจากผิวของมันสู่สิ่งแวดล้อม การถ่ายเทพลังงานโดยการนำความร้อนเกิดขึ้นจากภายในของลูกกลมโลหะสู่ผิว และแต่ละจุดในลูกกลมนี้ลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสม่ำเสมอ ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบ Lumped system analysis จึงนำมาใช้ได้โดยสมมุติฐานที่ว่า อุณหภูมิของลูกบอลสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อนระหว่างการเย็นตัว

- การวิเคราะห์ระบบกลุ่มก้อน (Lumped system analysis)

วิธีนี้การวิเคราะห์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ และมีสมมุติฐานที่สำคัญคือ อุณหภูมิภายในวัตถุทุกจุดมีค่าสม่ำเสมอหรือมีค่าเท่ากันหมดที่เวลาใดๆ (นั่นคือ $\frac{dT}{dx} = \frac{dT}{dy} = \frac{dT}{dz} = 0$)

พิจารณาวัตถุแข็งใตุมีปริมาตร V , พื้นที่ผิวทั้งหมด A , ความร้อนจำเพาะ C_p เริ่มต้นมีอุณหภูมิคือ T_i ที่เวลา $t = 0$ ความร้อนจะถูกถ่ายเทออกจากวัตถุที่ร้อน สู่บรรยากาศโดยรอบที่มีอุณหภูมิเย็นกว่า T_α แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 อุณหภูมิของวัตถุจะลดลงเรื่อยๆที่เวลา $t > 0$ จนกระทั่งเข้าสู่ T_α



รูปที่ 2.9 วัตถุแข็งร้อนถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศโดยรอบที่เย็นกว่า

ดังนั้นเขียนให้อยู่ในรูปสมการพลังงานสำหรับการถ่ายเทความร้อนในวัตถุ

$$-E_{out} = E_{st}$$

แทนค่า
$$-hA(T(t) - T_\alpha) = \rho C_p V \frac{dT}{dt} \quad (2.32)$$

จัดรูป
$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{hA}{\rho C_p V} (T(t) - T_\alpha) = 0 \quad (2.33)$$

$$T(t) = T_0 \quad \text{เมื่อ } t = 0$$

$$T(t) - T_\alpha \quad \text{เมื่อ } t > 0$$

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณกำหนดให้ $\theta(t) = T(t) - T_\alpha$

$$\theta_0 = T_0 - T_\alpha$$

จัดรูป
$$\frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{hA}{\rho C_p V} \theta(t) = 0 \quad (2.34)$$

จากสมการ (2.34) ใช้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง เพื่อแก้สมการและอยู่ในรูปค่าคงที่ C

$$\theta(t) = C e^{-\left(\frac{hA}{\rho C_p V}\right)t} \quad (2.35)$$

จากสมการ(2.35) เมื่อ $t=0$ ดังนั้น $\theta_0 = C$

แทนค่าคงที่ C ลงในสมการ(2.35) ดังสมการ (2.36)

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\left(\frac{hA}{\rho C_p V}\right)t} \quad (2.36)$$

ดังนั้นต้องการหาอุณหภูมิเมื่อเวลา t ใดๆ ดังสมการ (2.37)

$$T(t) = (T_0 - T_\alpha) e^{-\left(\frac{hA}{\rho C_p V}\right)t} + T_\alpha \quad (2.37)$$

สมการ(2.37) ใช้หาเวลาที่ต้องการสำหรับวัตถุมีอุณหภูมิจุด $T(t)$ หรือในทางกลับกันสมการนี้ ใช้หาว่าอุณหภูมิเป็นเท่าใด เมื่อเวลาผ่านไป t หลังจากวางวัตถุในบรรยากาศโดยรอบที่เย็นกว่า

2.10 การประมาณค่าโพลีโนเมียล (Polynomial Approximation) [6]

ในหลายปัญหาทางด้านวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ ข้อมูลจะเป็นแค่กลุ่มของจุดข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างจากฟังก์ชันต่อเนื่อง ตัวอย่างของฟังก์ชันก็คือ

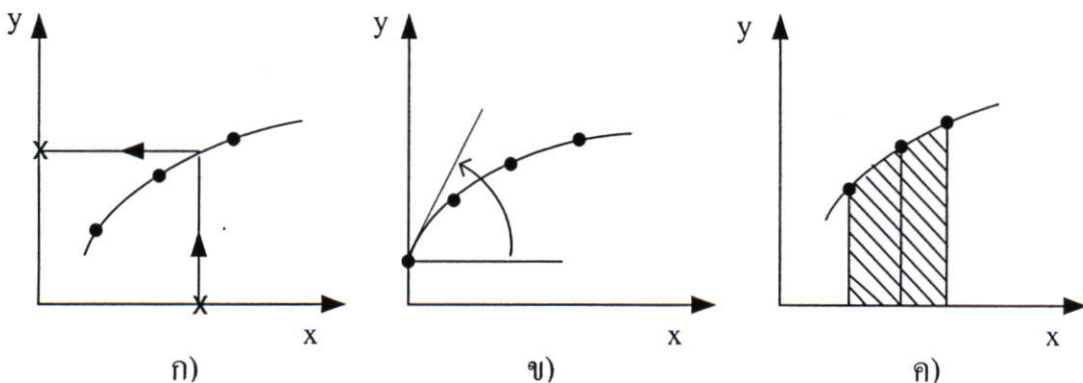
$$y = f(x) \quad (2.38)$$

$$n \text{ เป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่องของ } x : \quad y_i = y(x_i), (i=1,2,\dots,n) \quad (2.39)$$

ข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องหรือตารางข้อมูลอาจประกอบไปด้วย กลุ่มของข้อมูลเล็กๆที่ราบเรียบ กลุ่มข้อมูลจำนวนมากที่มีข้อมูลราบเรียบ กลุ่มเล็กๆของข้อมูลอย่างหยาบหรือกลุ่มข้อมูลจำนวนมากที่มีข้อมูลอย่างหยาบ ด้วยเหตุนี้วิธีการประมาณค่าในช่วง การหาอนุพันธ์ และการหาค่าปริมาตรหรือฟังก์ชัน ของกลุ่มข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องจึงเป็นที่สนใจ วิธีการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยสมมุติฟังก์ชัน โดยประมาณค่าที่เหมาะสมแทนกลุ่มของข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่อง

ฟังก์ชัน โดยประมาณค่ามีอยู่ 3 แบบเท่านั้น คือ

1. โพลีโนเมียล (Polynomials)
2. ฟังก์ชันตรีโกณ (Trigonometric functions)
3. ฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล (Exponential functions)



รูปที่ 2.10 การใช้ฟังก์ชันการประมาณค่า: ก) การประมาณค่าในช่วง (Interpolation) ข) การหาค่าอนุพันธ์ (Differentiation), ค) การหาค่าปริพันธ์ (Integration)

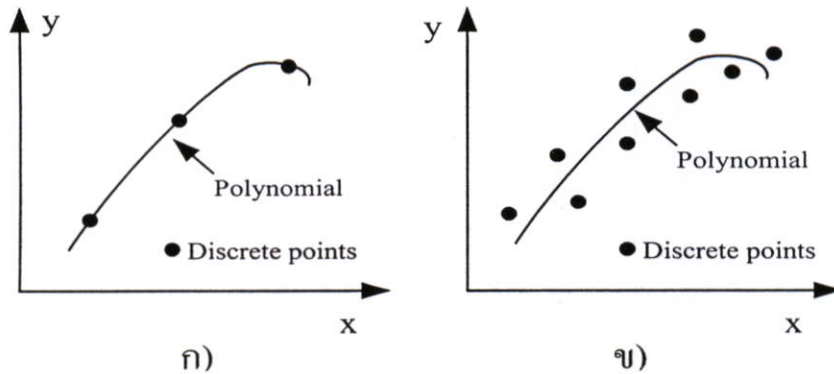
การใช้สมการโพลิโนเมียลปรับค่าของกลุ่มข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องมีวิธีที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือ

1. การปรับค่าที่ละเอียด (Exact fits)
2. การปรับค่าโดยประมาณ (Approximate fits)

การปรับค่าที่ละเอียด (Exact fits) จะให้โพลิโนเมียลผ่านจุดทั้งหมดที่ไม่ต่อเนื่องดังรูปที่

2.11 ก) วิธีนี้จะใช้กับกลุ่มข้อมูลเล็กๆราบเรียบ

การปรับค่าโดยการประมาณ (Approximate fits) จะให้โพลิโนเมียลผ่านเฉพาะจุดหลักๆ ไม่ต้องผ่านจุดทุกจุดดังแสดงในรูปที่ 2.11 ข) การปรับค่าแบบประมาณจะใช้กับกลุ่มข้อมูลที่มีจำนวนมากที่มีข้อมูลราบเรียบหรือกลุ่มข้อมูลแบบหยาบๆ ดังนั้นจึงใช้สมการกำลังสองน้อยที่สุดเป็นวิธีที่ใช้ในการปรับค่าโดยประมาณ

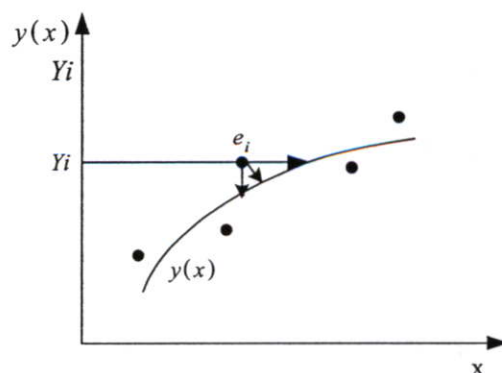


รูปที่ 2.11 การหาค่าโดยประมาณของสมการพหุนาม (Polynomial approximation)

ก) การปรับค่าที่ละเอียด(Exact fit), ข) การปรับค่าโดยประมาณ(Approximate fit)

2.10.1 การประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Approximation)

วิธีนี้เป็นการประมาณและปรับค่าจุดต่างๆโดยสมการโพลิโนเมียล ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่จะได้เส้นที่เหมาะสม โดยการพิจารณาจุดที่เหมาะสมคือ $[x_i, Y(x_i)] = (x_i, Y_i)$ และการประมาณโพลิโนเมียล $y(x)$ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเลือกจุดที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.12

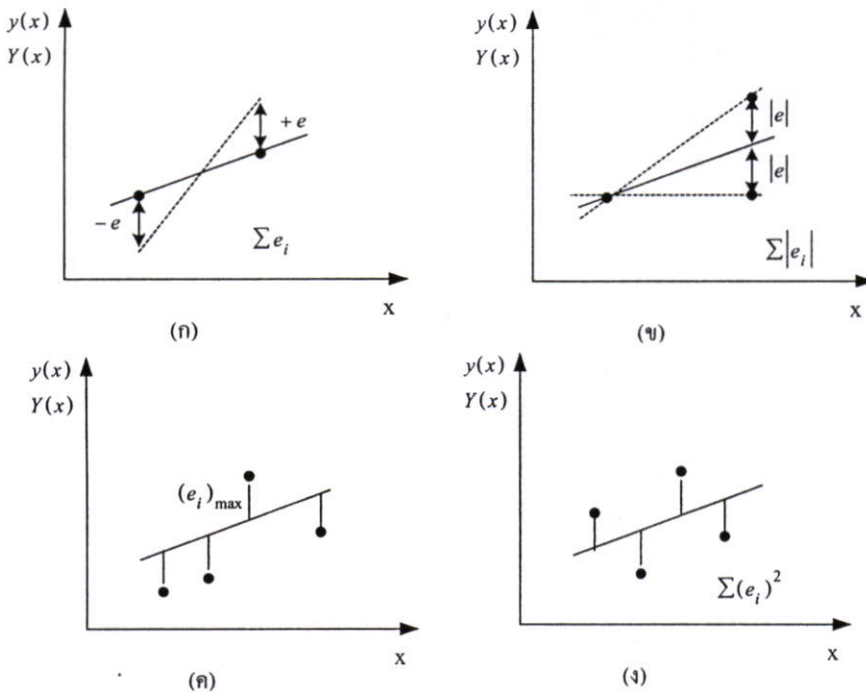


รูปที่ 2.12 การปรับค่าโดยประมาณ (Approximate fit)

$$e_i = Y_i - y_i \tag{2.40}$$

ค่า Y_i เป็นค่าจริง แต่ค่าของ X_i คือค่าความผิดพลาด จากรูปที่ 2.12 ถ้าค่า X_i และค่า Y_i ทั้งสองมีค่าไม่แน่นอนระหว่างจุดและฟังก์ชัน การประมาณค่าจะมีการเบี่ยงเบน ในการปรับค่าโดยประมาณของตารางข้อมูลที่สมมุติขึ้นมาจะมีการเบี่ยงเบนของแนวแกนตั้ง ระหว่างจุดและฟังก์ชัน ดังสมการ 2.40

รูปที่ 2.13(ก) แสดงให้เห็นผลรวมการเบี่ยงเบนที่จุด 2 จุดที่ต่ำสุด ด้านบนเป็นบวกและด้านล่างเป็นลบ โดยเส้นตรงลากผ่านจุดทั้งสอง ค่าที่ได้จะหักล้างกัน ผลรวมการเบี่ยงเบนมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นผลรวมต่ำสุดของ absolute ค่าการเบี่ยงเบน โดยเส้นตรงจะผ่านจุด 2 จุด ดังรูปที่ 2.13(ข) โดยที่จุด 2 จุดจะเป็นตัวแปรอิสระมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เส้นตรงที่ผ่านกลางระหว่างจุด 2 จุด อาจมีหลายๆเส้น สำหรับผลรวมของ absolute ของค่าการเบี่ยงเบนจะเป็นค่าสูงสุด ดังรูปที่ 2.13(ค) สำหรับรูปที่ 2.13(ง) เป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาผลรวมของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองน้อยที่สุด



รูปที่ 2.13 แสดงเส้นที่เหมาะสม: ก) $\sum e_i$ ต่ำสุด, ข) $\sum |e_i|$ ต่ำสุด, ค) ค่าสูงสุด, ง) กำลังสองน้อยสุด

2.10.2 การประมาณค่าโพลิโนเมียลกำลังสูง (Higher-Degree Polynomial Approximation)

ข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือเป็นเส้นโค้งอาจไม่เหมาะสมที่จะใช้สมการทั่วไปหรือสมการเส้นตรงได้ แต่ยังมีสมการที่เหมาะสมและประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นและเส้นโค้งได้คือสมการโพลิโนเมียลกำลังสูง รูปแบบพื้นฐานของสมการโพลิโนเมียลดังสมการ (2.41)

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (2.41)$$

เมื่อ n แสดงถึงอันดับของฟังก์ชัน โพลีโนเมียล a_0 ถึง a_n เป็นค่าสัมประสิทธิ์คงที่ และ $n+1$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของจุดข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นคุณสมบัติของโพลีโนเมียลจึงใช้ในการประมาณค่าฟังก์ชัน โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าของ *Weierstrass*

ผลรวมของกำลังสองของการเบี่ยงเบนกำหนดโดย

$$S(a_0, a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^N (e_i)^2 = \sum_{i=1}^N (Y_i - a_0 - a_1x_i - \dots - a_nx_i^n)^2 \quad (2.42)$$

ฟังก์ชัน $S(a_0, a_1, \dots, a_n)$ เป็นค่าน้อยสุด เมื่อ

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - a_0 - a_1x_i - \dots - a_nx_i^n)(-1) = 0 \quad (2.43)$$

⋮

$$\frac{\partial S}{\partial a_n} = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - a_0 - a_1x_i - \dots - a_nx_i^n)(-x_i^n) = 0 \quad (2.44)$$

แยก 2 สมการให้อยู่ในรูปสมการทั่วไป

$$\begin{aligned} a_0N + a_1 \sum_{i=1}^N x_i + \dots + a_n \sum_{i=1}^N x_i^n &= \sum_{i=1}^N Y_i \\ \vdots & \\ a_0 \sum_{i=1}^N x_i^n + a_1 \sum_{i=1}^N x_i^{n+1} + \dots + a_n \sum_{i=1}^N x_i^{2n} &= \sum_{i=1}^N x_i^n Y_i \end{aligned} \quad (2.45)$$

สมการ(2.45) สามารถหาค่า a_0 ถึง a_n โดยวิธีของ Gauss elimination

ปัญหาที่พบสำหรับสมการโพลีโนเมียลกำลังสูงคือ ค่าสัมประสิทธิ์ N ที่ $\sum x_i^{2n}$ จากสมการ(2.45) มีการเปลี่ยนแปลงเหนือช่วงของลำดับจึงทำให้ระบบการประมาณค่าไม่สมบูรณ์ ปกติแล้วการคำนวณที่ให้ความแม่นยำและให้ผลที่ดี ลำดับ n ประมาณ 5 ถึง 6 และค่า n อยู่ระหว่าง 6 ถึง 10 อาจทำให้ผลที่ได้ไม่เหมาะสม และถ้าหาก n มากกว่า 10 ทั่วไปแล้วผลที่ได้จะผิดพลาดมาก [6]

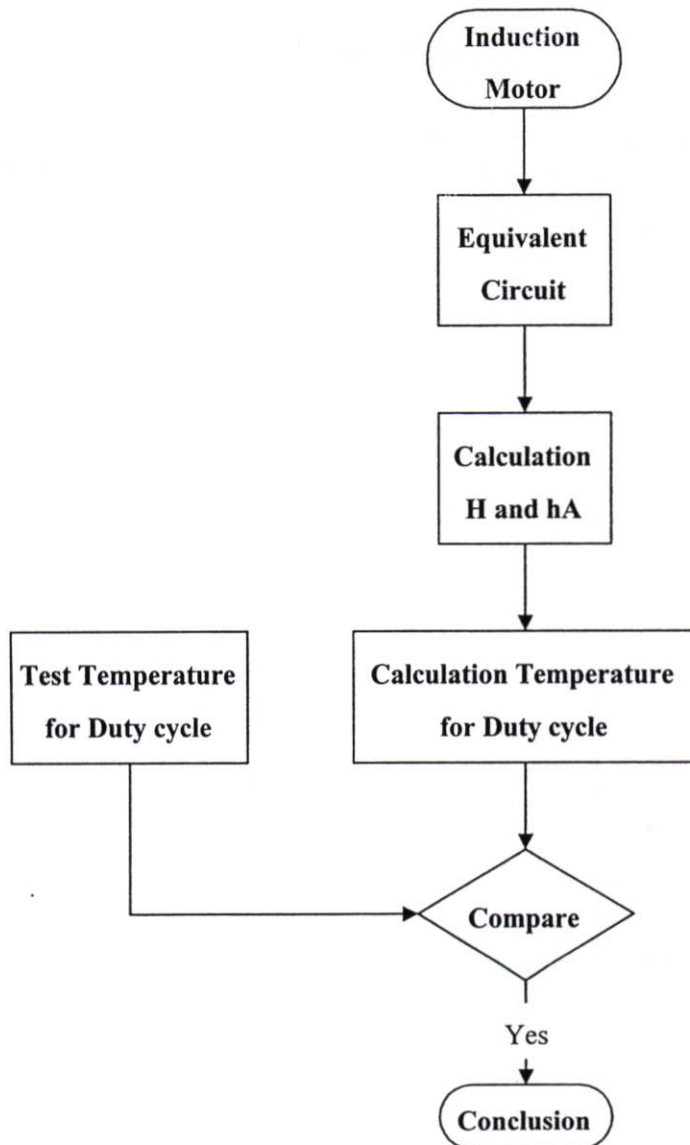
บทที่ 3

การคำนวณอุณหภูมิมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การคำนวณและทำนายอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์นั้น ต้องทดสอบพารามิเตอร์ดังนี้

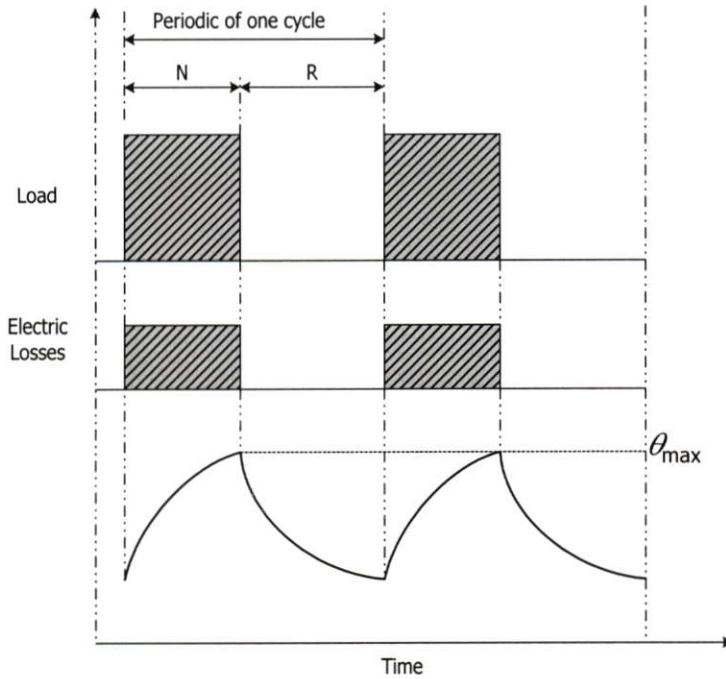
- ทดสอบหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์
- ทดสอบหาค่าคุณสมบัติของพลังงานที่สะสมภายในตัวมอเตอร์ H มีหน่วยเป็น Joule
- ทดสอบหาค่าคุณสมบัติของการระบายความร้อนของตัวมอเตอร์ hA มีหน่วยเป็น $W/^\circ C$

ดังนั้นขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ ดูได้จากรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อทำงานเป็นคาบเวลาประกอบด้วยช่วงของการขับภาระทางกล และช่วงหยุดการทำงาน ดังรูปที่ 3.2 แสดงการทำงานของมอเตอร์เป็นคาบเวลา ประเภทที่ 3 (Intermittent periodic duty) หรือ S3 ตามมาตรฐาน IEC 60034-1:1996 [1] ซึ่งเป็นลำดับการทำงานที่เหมือนกันทุกคาบโดยมีภาระทางกลคงที่ ดังนั้นในลักษณะการทำงานแบบนี้กระแสขั้วสตาร์ที่มีผลต่ออุณหภูมिन้อย เนื่องจากกระแสขั้วสตาร์ที่ใช้ระยะเวลาชั่วขณะซึ่งเป็นระยะเวลาที่สั้นมากเมื่อเทียบกับช่วงการทำงานของมอเตอร์



รูปที่ 3.2 การทำงานเป็นคาบเวลา (Intermittent periodic duty)

- กำหนดให้
- N คือ การทำงานในสภาวะที่กำหนด
 - R คือ ขณะหยุดและตัดกำลังไฟฟ้า
 - θ_{\max} คือ อุณหภูมิสูงสุดใน 1 คิวดีไซเคล
- $$\% \text{ ช่วงการทำงาน} = \frac{N}{(N + R)} \times 100\%$$

3.1 ช่วงการขับภาระทางกล

จากรูปที่ 3.2 เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ มอเตอร์ก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังงานเพื่อขับภาระทางกล แต่ยังมีกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งสูญเสียภายในมอเตอร์ ประกอบด้วยการสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss), การสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ (Rotor copper loss), การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และการสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรง

ต้านลม (Friction and Windage loss) ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียทั้งหมดนี้จะแปรรูปเป็นพลังงานความร้อน หรือเรียกว่าช่วงการสะสมความร้อน(Heating) [4-6] ดังนั้นความร้อนภายในตัวมอเตอร์ ประกอบด้วย ความร้อนที่สะสมภายในตัวมอเตอร์ และความร้อนส่วนหนึ่งที่ระบายออกสู่บรรยากาศ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ดังสมการ (3.1)

ความร้อนภายในตัวมอเตอร์ = ความร้อนที่เก็บสะสมภายในมอเตอร์ + ความร้อนที่ระบายออกจากมอเตอร์

$$Pdt = Hd\theta(t) + hA\theta(t)dt \quad (3.1)$$

จัดสมการที่(3.1)ให้อยู่ในรูปแบบของสมการอนุพันธ์แบบเชิงเส้นอันดับหนึ่ง (Linear differential equation order one) ดังสมการ (3.2)

$$\frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{hA}{H}\theta(t) = \frac{P}{H} \quad (3.2)$$

จัดอยู่ในรูปแบบมาตรฐานทั่วไปของสมการอนุพันธ์แบบเชิงเส้นอันดับหนึ่ง คือ

$$\frac{d\theta(t)}{dt} + P(t).\theta(t) = Q(t) \quad (3.3)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.3) จะได้ $P(t) = \frac{hA}{H}$ และ $Q(t) = \frac{P}{H}$

หาคำประกอบอินทิเกรต (Integrating Factor : I.F) $I.F = e^{\int P(t)dt} = e^{\int \frac{hA}{H} dt} = e^{\left[\frac{hA}{H}\right]t}$

แก้สมการโดยใช้สูตรสำเร็จรูปโดยการนำ

$$\text{ตัวแปรตาม } \theta(t) \times \text{ตัวประกอบอินทิเกรต} = \int Q(t) \times I.F \times dt + c$$

แทนค่า

$$\theta(t)e^{\left[\frac{hA}{H}\right]t} = \frac{P}{H} \int e^{\left[\frac{hA}{H}\right]t} .dt + c$$

$$\theta(t)e^{\left[\frac{hA}{H}\right]t} = \frac{P}{hA}e^{\left[\frac{hA}{H}\right]t} + c$$

ดังนั้น

$$\theta(t) = \frac{P}{hA} + c.e^{-\left[\frac{hA}{H}\right]t} \quad (3.4)$$

จากสมการ (3.4) เมื่อ $t = 0$

$$\theta(0) = \frac{P}{hA} + c.e^0$$

ดังนั้น

$$c = \theta_0 - \frac{P}{hA}$$

แทนค่า c ลงในสมการ (3.4) จะได้

$$\theta(t) = \frac{P}{hA} + \left[\theta_0 - \frac{P}{hA} \right] e^{-\left[\frac{hA}{H}\right]t}$$

ดังนั้น

$$\theta(t) = \frac{P}{hA} \left[1 - e^{-\left[\frac{hA}{H}\right]t} \right] + \theta_0 e^{-\left[\frac{hA}{H}\right]t} \quad (3.5)$$

เมื่อ $t > 0$ $\theta(t) = T(t) - T_\alpha$

$t = 0$ $\theta_0 = T_0 - T_\alpha$

แทนค่าในสมการที่ (3.5) จะได้สมการความร้อนที่สะสมภายในมอเตอร์ ดังสมการ (3.6) [2]

$$T(t) = \frac{P}{hA} \left[1 - e^{-\left[\frac{hA}{H}\right]t} \right] + (T_0 - T_\alpha) e^{-\left[\frac{hA}{H}\right]t} + T_\alpha \quad (3.6)$$

- เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2\text{ }^{\circ}C$)
 A คือ พื้นที่ผิวของมอเตอร์ (m^2)
 H คือ พลังงานที่เก็บสะสมเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Joule)
 $T(t)$ คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}C$)
 T_{α} คือ อุณหภูมิโดยรอบ ($^{\circ}C$)
 T_0 คือ อุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}C$)

3.2 ช่วงหยุดการทำงาน

จากรูปที่ 3.2 เมื่อหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นมอเตอร์จึงไม่มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้า อุณหภูมิของมอเตอร์จึงลดลง เนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของมอเตอร์และอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ดังสมการ(3.7) [2],[7]

ความร้อนที่สะสมภายในตัวมอเตอร์ + ความร้อนที่ระบายออก = 0

$$Hd\theta(t) + hA\theta(t)dt = 0 \quad (3.7)$$

จัดสมการที่(3.7)ให้อยู่ในรูปแบบของสมการอนุพันธ์แบบเชิงเส้นอันดับหนึ่ง (Linear differential equation order one) ดังสมการ (3.8)

$$\frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{hA}{H}\theta(t) = 0 \quad (3.8)$$

จัดอยู่ในรูปแบบมาตรฐานทั่วไปของสมการอนุพันธ์แบบเชิงเส้นอันดับหนึ่งคือ

$$\frac{d\theta(t)}{dt} + P(t).\theta(t) = Q(t) \quad (3.9)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.9) จะได้ $P(t) = \frac{hA}{H}$ และ $Q(t) = 0$

หาตัวประกอบอินทิเกรต (Integrating Factor : I.F) $I.F = e^{\int P(t)dt} = e^{\int \frac{hA}{H} dt} = e^{\left[\frac{hA}{H}\right]t}$

แก้สมการ โดยใช้สูตรสำเร็จรูปโดยการนำ

$$\text{ตัวแปรตาม } \theta(t) \times \text{ตัวประกอบอินทิเกรต} = \int Q(t) \times I.F \times dt + c$$

แทนค่า
$$\theta(t)e^{\left[\frac{hA}{H}\right]t} = \int 0 \times e^{\left[\frac{hA}{H}\right]t} dt + c$$

$$\theta(t)e^{\left[\frac{hA}{H}\right]t} = c$$

ดังนั้น
$$\theta(t) = ce^{-\left[\frac{hA}{H}\right]t} \quad (3.10)$$

จากสมการ (3.10) เมื่อ $t = 0$
$$\theta_0 = c$$

แทนค่า c ลงในสมการที่ (3.10) จะได้

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\left[\frac{hA}{H}\right]t} \quad (3.11)$$

เมื่อ $t > 0$
$$\theta(t) = T(t) - T_\alpha$$

$t = 0$
$$\theta_0 = T_0 - T_\alpha$$

แทนค่าในสมการ (3.11) จะได้สมการระบายความร้อนของมอเตอร์ (Cooling) ดังสมการ (3.12) [2]

$$T(t) = \left[(T_0 - T_\alpha) e^{-\left[\frac{hA}{H}\right]t} \right] + T_\alpha \quad (3.12)$$

3.3 พลังงานสะสมของมอเตอร์

(H) คือคุณสมบัติการสะสมความร้อนหรือพลังงานที่เก็บสะสมภายในตัวมอเตอร์ ประกอบด้วยพลังงานที่เก็บสะสมขณะขับภาระทางกล ($H_{(heating)}$) และพลังงานที่เก็บสะสมขณะหยุดขับภาระทางกล ($H_{(cooling)}$) ดังนั้นเพื่อความถูกต้องการหาพลังงานที่เก็บสะสมภายในตัวมอเตอร์จำเป็นต้องหาจากการทดสอบเท่านั้น

พลังงานที่เก็บสะสมขณะขับภาระทางกล($H_{(heating)}$) ในช่วงนี้มอเตอร์จะมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าภายในมอเตอร์เกิดขึ้น กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียนี้จะแปรรูปเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นจึงมีการสะสมความร้อนภายในตัวมอเตอร์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การสะสมความร้อนเนื่องจากการขับภาระทางกลนี้ สามารถหาได้จากสมการ(3.6)

จากสมการ(3.6) สามารถแก้สมการหาค่า $H_{(heating)}$ ดังสมการ (3.13)

$$H_{(heating)} = -\frac{hA \times t}{\ln \left[\frac{(T(t) \times hA) - (T_{\alpha} \times hA) - P}{P - (hA \times T_0) + (T_{\alpha} \times hA)} \right]} \quad (3.13)$$

พลังงานที่เก็บสะสมขณะหยุดขับภาระทางกล($H_{(cooling)}$) ในช่วงนี้จะไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าให้กับมอเตอร์ มอเตอร์จะหยุดหมุน ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ความร้อนที่เก็บสะสมอยู่จะค่อยๆระบายความร้อนออกสู่แวดล้อมโดยรอบซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ดังนั้นการสะสมความร้อนเนื่องจากการหยุดขับภาระทางกลนี้ สามารถหาได้จากสมการ(3.12)

จากสมการ(3.12) สามารถแก้สมการหาค่า $H_{(cooling)}$ ดังสมการ (3.14)

$$H_{(cooling)} = -\frac{hA \times t}{\ln \left(\frac{T(t) - T_{\alpha}}{-T_0 + T_{\alpha}} \right)} \quad (3.14)$$

ดังนั้นค่าของการสะสมความร้อนทั้งที่มีภาระทางกลและหยุดขับภาระทางกลจะแปรผันตามอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนไป ค่าที่คำนวณได้นั้นไม่เป็นเชิงเส้น(Non linear) จึงจำเป็นต้องใช้สมการ โพลีโนเมียล Polynomial Regression[6] ในการแก้ปัญหาดังสมการ (3.15)

$$H = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots a_n T^n \quad (3.15)$$

และสามารถหาสัมประสิทธิ์ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ จาก Normal Equations ดังสมการ (3.16)

$$\begin{aligned}
 a_0 N + a_1 \sum_{i=1}^N T_i + \dots + a_n \sum_{i=1}^N T_i^n &= \sum_{i=1}^N H_i \\
 \vdots & \\
 a_0 \sum_{i=1}^N T_i^n + a_1 \sum_{i=1}^N T_i^{n+1} + \dots + a_n \sum_{i=1}^N T_i^{2n} &= \sum_{i=1}^N T_i^n H_i
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

เมื่อ N คือ จำนวนจุดข้อมูล H_i และ T_i
 n คือ อันดับพหุนาม

hA เป็นอัตราการระบายความร้อนมีหน่วยคือ(W/°C) สามารถหาได้จากการทดสอบที่
 ภาระทางกลเต็มพิกัดเมื่อมอเตอร์ทำงานแบบต่อเนื่อง โดยพิจารณาอุณหภูมิขณะเข้าสู่ภาวะคงที่

จากสมการ (3.6) เมื่อ $t \rightarrow \infty$ $\theta(t) = \frac{P}{hA}$

ดังนั้นสามารถหาอัตราการระบายความร้อน $hA = \frac{P}{T(t) - T_\alpha}$ (3.17)

3.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด (Total power loss)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในมอเตอร์ ประกอบด้วย การสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss), การสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ (Rotor copper loss), การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และการสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลม (Friction and Windage loss) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากวงจรสมมูลตามมาตรฐาน IEEE Std 112-1996 [5]

$$P = P_{stator\ cu} + P_{rotor\ cu} + P_{core} + P_{friction\&\ windage} \tag{3.18}$$

- P คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์ไฟฟ้า (Watts)
- $P_{stator\ cu}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (Watts)
- $P_{rotor\ cu}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดโรเตอร์ (Watts)
- P_{core} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Watts)
- $P_{friction\&\ windage}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลม (Watts)

จากที่ผ่านมาเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและการคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งสมการหลักที่ใช้ในการคำนวณและทำนายอุณหภูมิของมอเตอร์ คือ สมการของการคำนวณสภาวะมอเตอร์ไฟฟ้าขณะขับภาระทางกล โดยใช้สมการที่ 3.6 และสมการของการคำนวณสภาวะมอเตอร์ไฟฟ้าขณะหยุดขับภาระทางกล โดยใช้สมการที่ 3.12 ทั้งสองสมการนี้ประกอบด้วยพารามิเตอร์หลายอย่างที่มีผลทำให้อุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง เช่น กำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในมอเตอร์ไฟฟ้า, อุณหภูมิโดยรอบ, คุณสมบัติของการสะสมความร้อนและการระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้า ในขั้นตอนของการคำนวณคุณสมบัติของการสะสมความร้อนและการระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้านี้ ได้ใช้สมการโพลีโนเมียลช่วยในการคำนวณ เนื่องจากค่าต่างๆเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น(Non Linear) ดังนั้นในการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆดังกล่าวนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณเบื้องต้นสำหรับนำไปสู่การคำนวณและทำนายอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด

ในบทต่อไปจะเป็นผลการทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เช่น กำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในมอเตอร์ไฟฟ้า คุณสมบัติของการสะสมความร้อนและการระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อที่จะนำพารามิเตอร์ต่างๆใช้ในการคำนวณและทำนายอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อมีการทำงานเป็นคาบเวลาและสภาวะโหลดเกินพิกัดต่างๆ

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 3 ตัว คือ ขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า, 4 ขั้วแม่เหล็ก, 380 โวลท์, 50 เฮิร์ต ต่อแบบสตาร์ โรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor) มีรายละเอียดตาม Nameplate ห้องที่ใช้ทดสอบมีการควบคุมอุณหภูมิแวดล้อม ให้คงที่ตลอด ในแต่ละครั้งของการทดสอบมอเตอร์มีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิห้องใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.1 Nameplate มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 1 แรงม้า

INDUCTION MOTOR 3 PHASE 1 Hp 4 POLE TYPE. SF-J				
50 Hz			FRAME	80
VOLT.	220	380	RATING	CONT
AMP	3.5	2.0	INS CLASS	E
RPM	1410		AMB. TEMP	40° C
JIS.C	4004		WEIGHT	15 kg.

ตารางที่ 4.2 Nameplate มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 3 แรงม้า

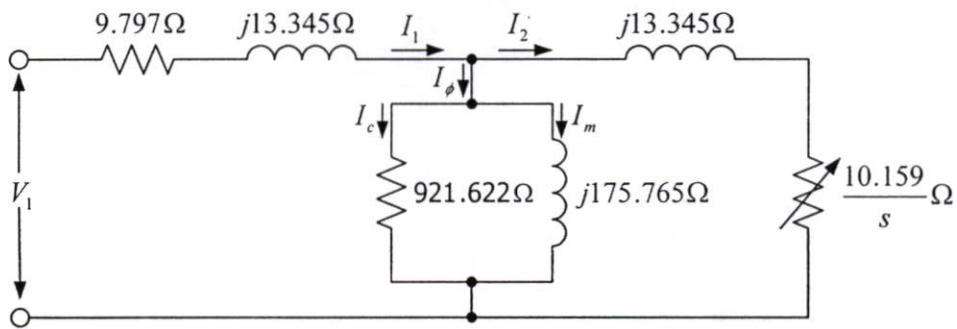
INDUCTION MOTOR 3 PHASE 3 Hp 4 POLE TYPE. SF-J				
50 Hz			FRAME	100L
VOLT.	220	380	RATING	CONT
AMP	9.0	5.2	INS CLASS	E
RPM	1420		AMB. TEMP	40° C
JIS.C	4004		WEIGHT	29 kg.

ตารางที่ 4.3 Nameplate มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 5 แรงม้า

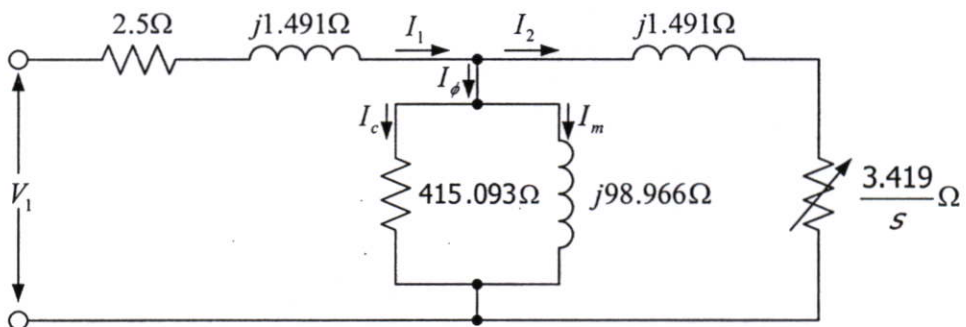
INDUCTION MOTOR 3 PHASE 5 Hp 4 POLE TYPE. SF-J				
50 Hz			FRAME	112M
VOLT.	220	380	RATING	CONT
AMP	13.68	7.9	INS CLASS	F
RPM	1420		AMB. TEMP	40° C
JIS.C	4004		WEIGHT	35 kg.

4.1 ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

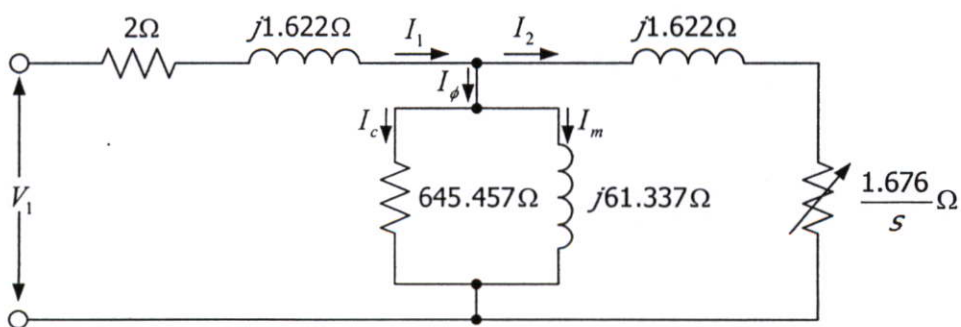
พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสามตัวหาตามมาตรฐาน IEEE Std. 112-1996 [5] ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4 ซึ่งขั้นตอนการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จะแสดงเป็นตัวอย่างในภาคผนวก ก. ดังนั้นสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสามตัวดังรูปที่ 4.1 ,4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลต่อเฟสแบบมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลต่อเฟสแบบมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า

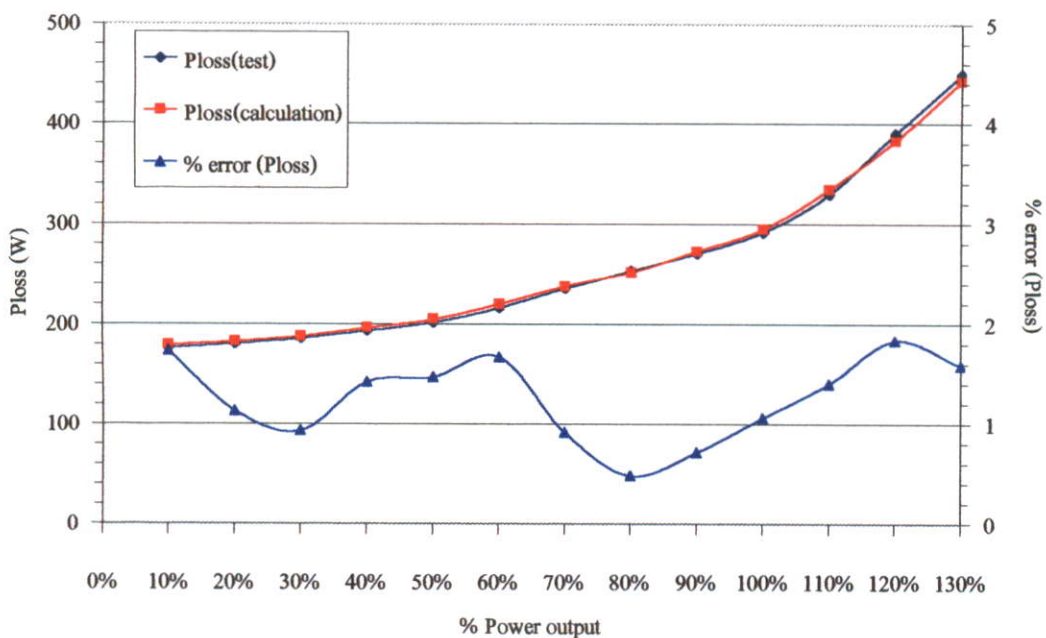


รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลต่อเฟสแบบมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 5 แรงม้า

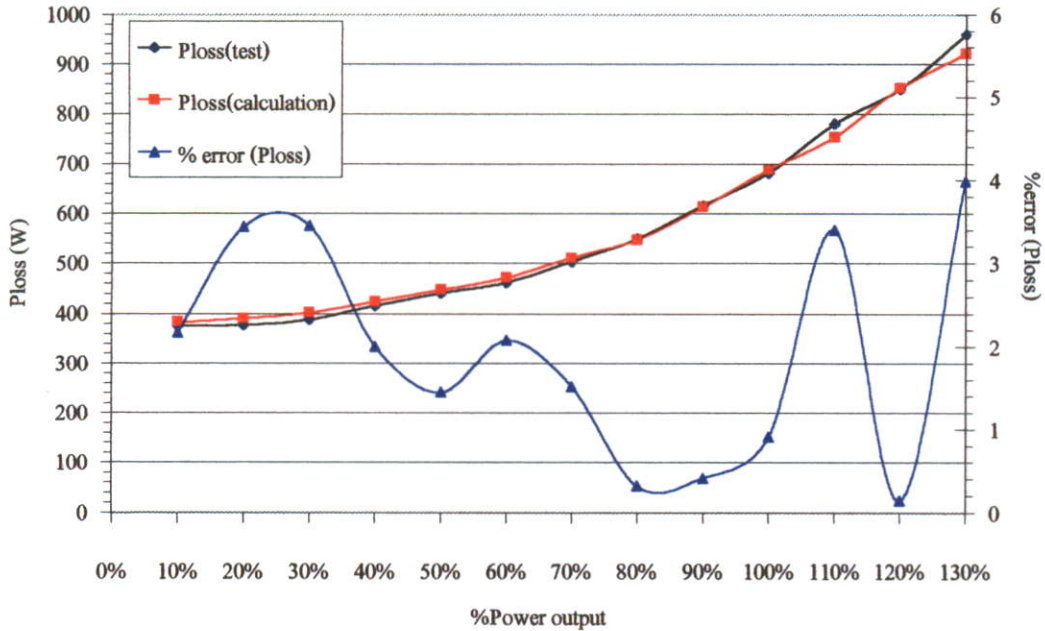
4.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อนำกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มอเตอร์ก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังงานเพื่อขับภาระทางกล แต่ยังมีกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งสูญเสียภายในมอเตอร์ไฟฟ้า ประกอบด้วย การสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss), การสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ (Rotor copper loss), การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และการสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลม (Friction and Windage loss) ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียทั้งหมดนี้จะแปรรูปเป็นความร้อน

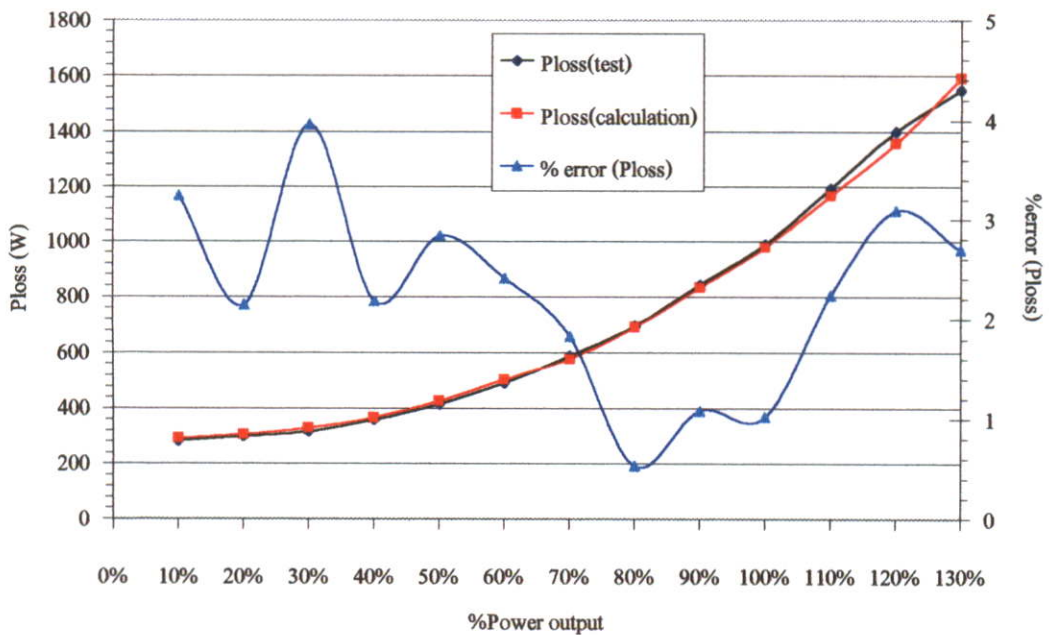
การนำวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำใช้คำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปคำนวณและทำนายอุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้า อันถัดต่อไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องก่อนนำวงจรสมมูลไปใช้ โดยการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียภายในมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งหมด จากวงจรสมมูลเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเมื่อเพิ่มภาระทางกลตามลำดับ ในการทดสอบนั้นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมให้คงที่และให้อุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เพื่อให้ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดจากการคำนวณเปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดจากการคำนวณเปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดจากการคำนวณเปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า

ผลจากการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดจากวงจรสมมูลของมอเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ปรากฏว่าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 4% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นสามารถนำค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จากการคำนวณนี้ เพื่อคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์ต่อไป

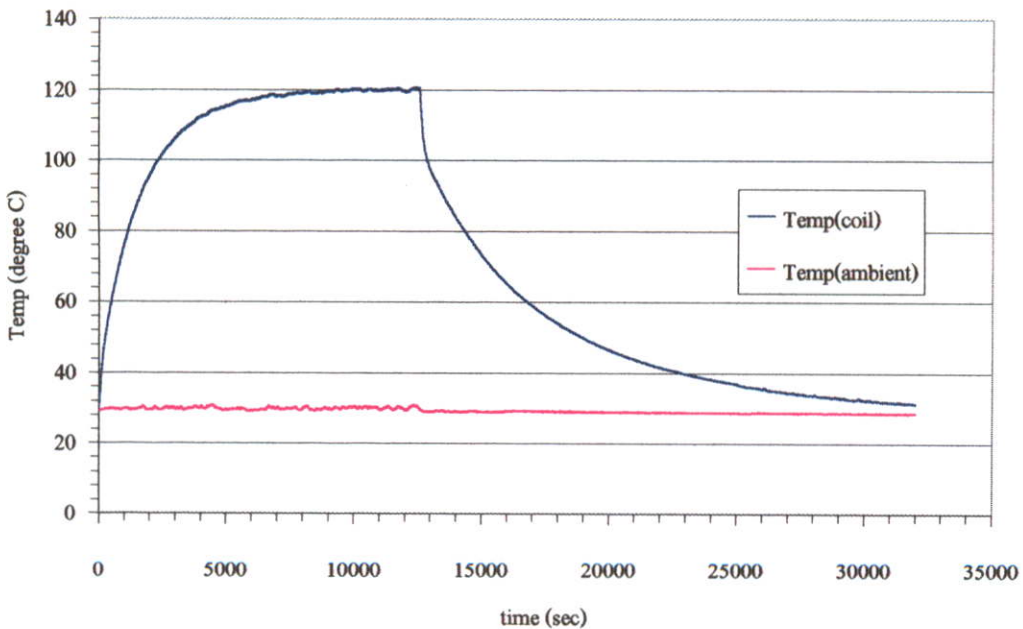
4.3 ผลการทดสอบการระบายความร้อนและการสะสมความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้า

การทดสอบหาการระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้า (hA) โดยทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อมีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่องที่พิกัดภาระทางกล 100% อุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ มอเตอร์จะมีการสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเข้าสู่สภาวะคงที่ จนอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังรูปที่ 4.7 และถ้าให้มอเตอร์ทำงานต่อไปเรื่อยๆจนเวลาเข้าสู่ $t \rightarrow \infty$ โดยให้ภาระทางกลคงที่ตลอด อุณหภูมิก็ยังไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นช่วงอุณหภูมิคงที่นี้สามารถคำนวณอัตราการระบายความร้อนของมอเตอร์แต่ละตัวได้จากสมการ(3.17) จากผลการทดสอบและคำนวณอัตราการระบายความร้อน ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว มีดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการระบายความร้อนของมอเตอร์

มอเตอร์	การระบายความร้อน ($W/^\circ C$)
1 แรงม้า	3.97
3 แรงม้า	8.48
5 แรงม้า	9.5

สำหรับตัวอย่างการคำนวณหาการระบายความร้อนของมอเตอร์ดูได้จากภาคผนวก ข.



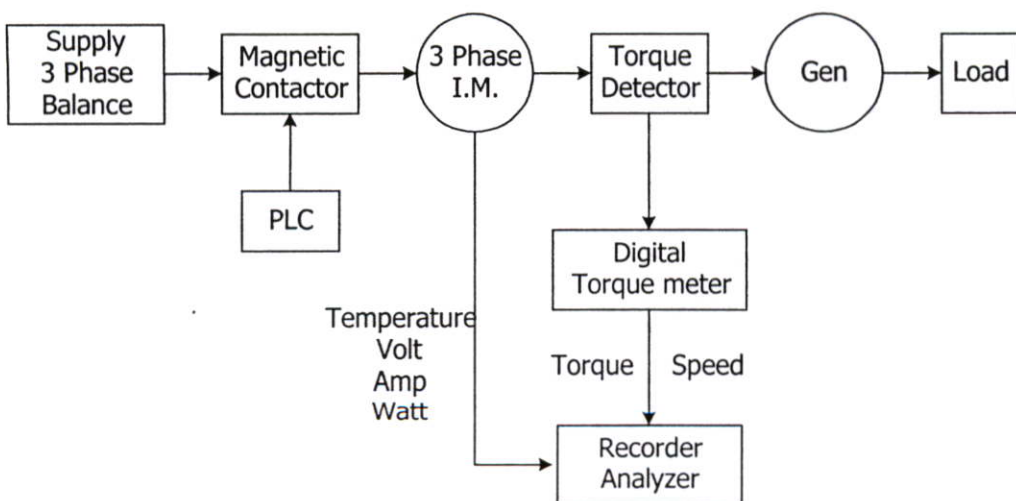
รูปที่ 4.7 อุณหภูมิทดสอบที่พิกัดภาระทางกล 100% ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เพื่อหาคุณสมบัติการสะสมความร้อนและการระบายความร้อน

คุณสมบัติการสะสมความร้อนหรือพลังงานที่เก็บสะสมภายในตัวมอเตอร์ (H) สามารถหาได้จากสมการ(3.13) และ(3.14) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ประกอบด้วยพลังงานที่เก็บสะสมขณะขับภาระทางกล ($H_{(heating)}$) และพลังงานที่เก็บสะสมขณะหยุดขับภาระทางกล ($H_{(cooling)}$) ผลจากการทดสอบพลังงานที่เก็บสะสมภายในมอเตอร์ของแต่ละตัวนั้นไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อความถูกต้องในการหาพลังงานที่เก็บสะสมของมอเตอร์ต้องหาจากการทดสอบมอเตอร์ตัวนั้นๆ เท่านั้น

จากรูปที่ 4.7 เป็นตัวอย่างการทดสอบอุณหภูมิช่วงขับภาระทางกล และช่วงหยุดขับภาระทางกลของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า สามารถนำผลการทดสอบนี้ไปหาพลังงานที่เก็บสะสมภายในตัวมอเตอร์ได้ ซึ่งค่าที่ได้จะแปรผันตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น(Non linear) จึงจำเป็นต้องใช้สมการโพลิโนเมียล Polynomial Regression[6] ในการแก้ปัญหา สำหรับตัวอย่างการคำนวณดูได้จากภาคผนวก ข. และการหาคุณสมบัติของพลังงานที่สะสมของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า และ 3 แรงม้า วิธีการหาเหมือนกับมอเตอร์ 5 แรงม้า

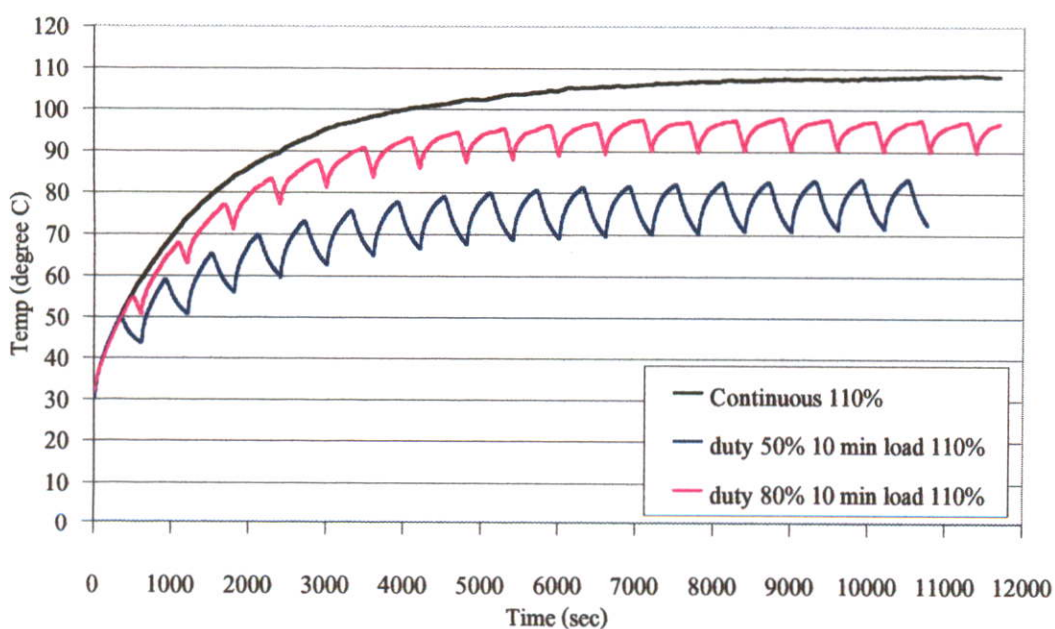
4.4 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลา

มอเตอร์ที่ทดสอบเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ให้มีการทำงานของมอเตอร์เป็นคาบเวลา (Intermittent periodic duty) หรือ S3 ตามมาตรฐาน IEC 60034-1:1996[1] ซึ่งเป็นลำดับการทำงานที่เหมือนกันทุกคาบโดยเขียนโปรแกรม PLC ควบคุมลักษณะการทำงานของมอเตอร์ที่เป็นคาบเวลา 5, 10 และ 15 นาที ที่ควัดไซเคิล 50 และ 80 เปอร์เซนต์ มอเตอร์รับภาระทางกลเกินพิกัด 110 ,120 และ 130 เปอร์เซนต์ โดยมีการควบคุมภาระทางกลให้คงที่ สำหรับการวัดใช้ Analyzing Recorder เป็นตัวบันทึกอุณหภูมิและความเร็วรอบของมอเตอร์ดังรูปที่ 4.8

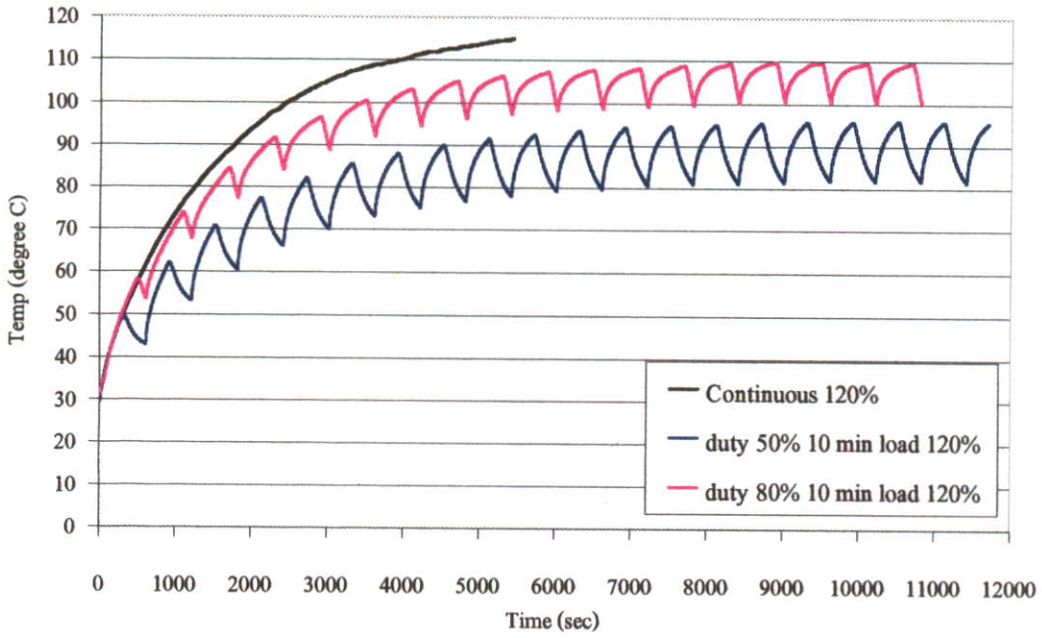


รูปที่ 4.8 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

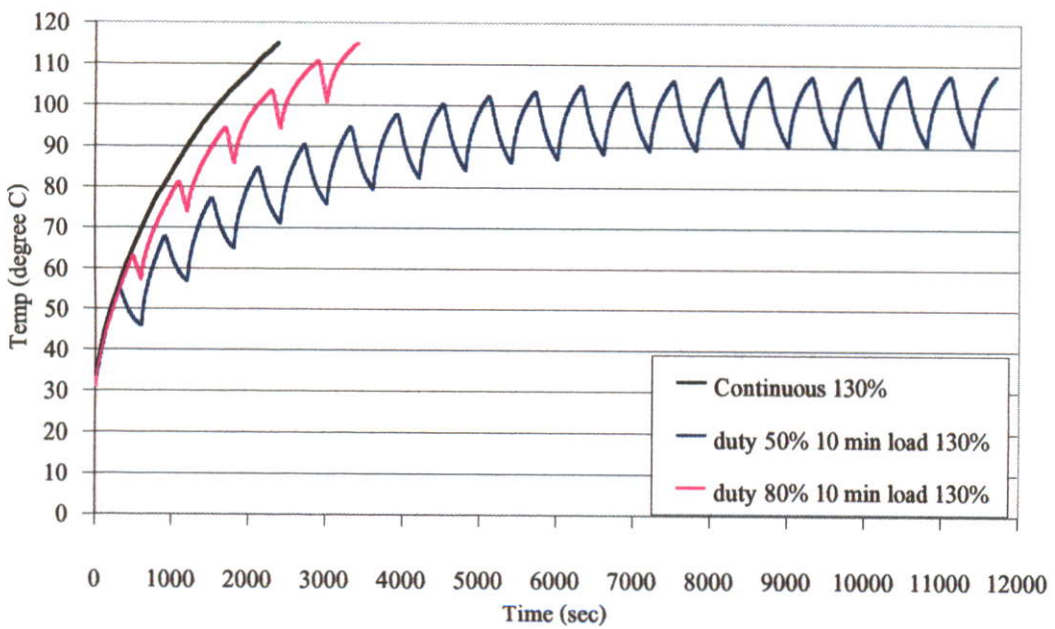
- Supply 3 Phase Balance เป็นแหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมีการควบคุมทั้งสามเฟสให้แรงดันสมดุล (Balance Voltage) ตลอดการทดสอบ
- PLC เป็นตัวควบคุมการทำงานของ Magnetic contactor เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลา
- 3 Phase I.M. เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบ
- Torque detector เป็นเครื่องมือวัดแรงบิดและความเร็วรอบที่แกนเพลลาของมอเตอร์แล้วส่งสัญญาณไปที่ Digital torque meter เพื่อแสดงผล สามารถวัดแรงบิดสูงสุดได้ (100 N-m) และวัดความเร็วรอบสูงสุด (3500 rpm)
- Digital torque meter ทำหน้าที่แสดงผลของแรงบิด, ความเร็วรอบและกำลังทางด้านออก (Power output) ของมอเตอร์ พร้อมทั้งส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็น Analog output ให้กับ Analyzing recorder เพื่อบันทึกข้อมูล
- Analyzing recorder ทำหน้าที่บันทึกข้อมูล อุณหภูมิ และความเร็วรอบของมอเตอร์
- Generator เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาดพิกัด 10 kW ทำหน้าที่จ่ายพลังงานทางกลของมอเตอร์
- Thermocouple type K เป็นตัววัดอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ และอุณหภูมิแวดล้อม สำหรับการวัดที่ขดลวดสเตเตอร์ มีการวัดที่ตำแหน่ง End winding ของขดลวดเฟส A, B และ C ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ทั้งหมด 6 เส้น และอุณหภูมิแวดล้อมอีก 1 เส้น ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะอุณหภูมิที่สูงสุดจากการวัดเป็นเกณฑ์สำหรับการนำเสนอ



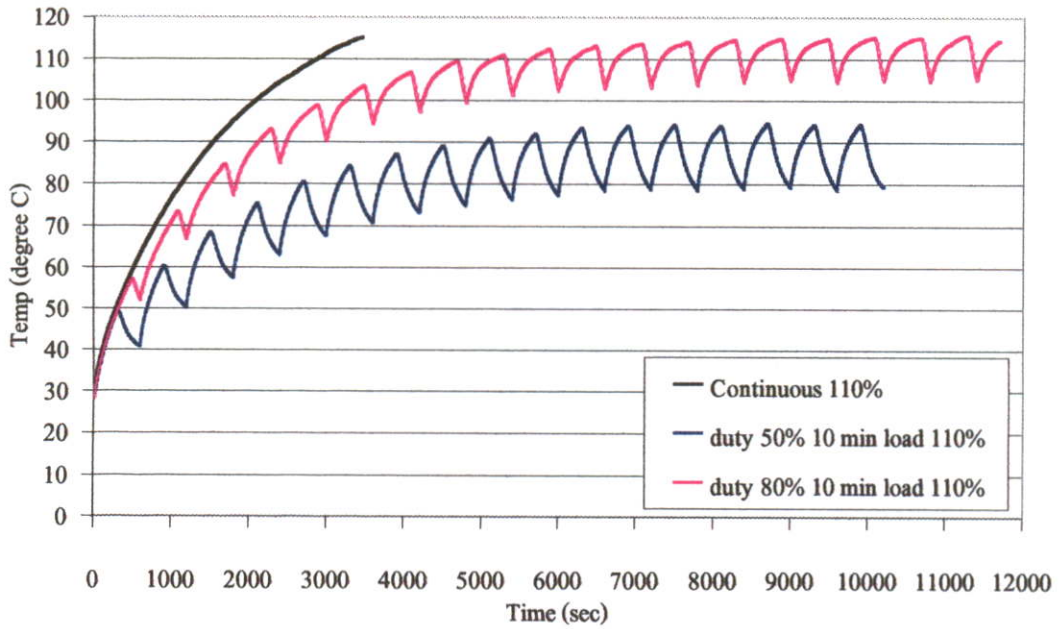
รูปที่ 4.9 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 110 %



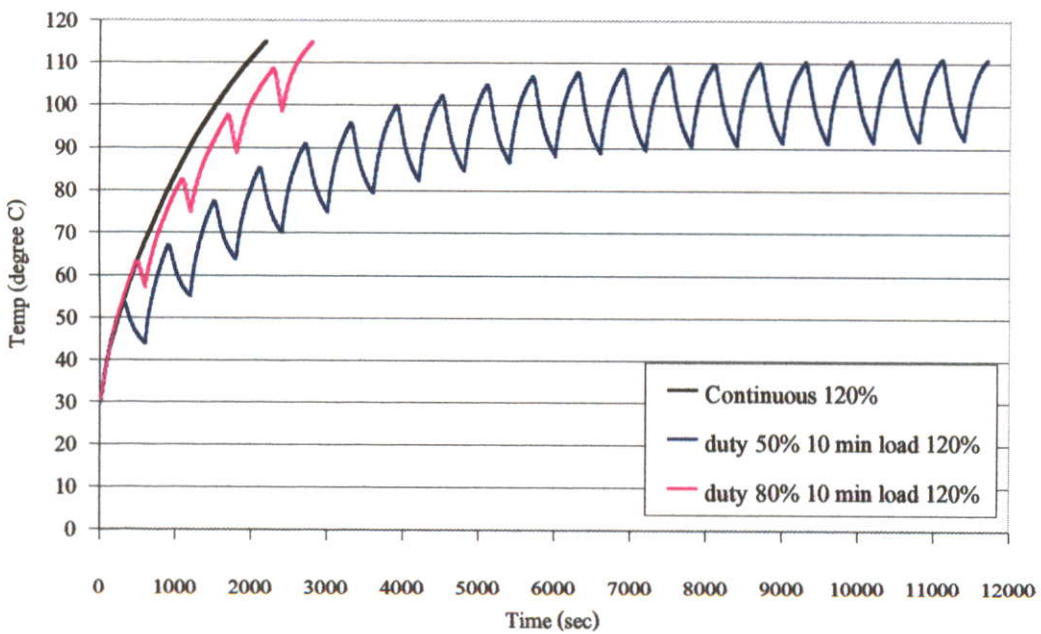
รูปที่ 4.10 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 120 %



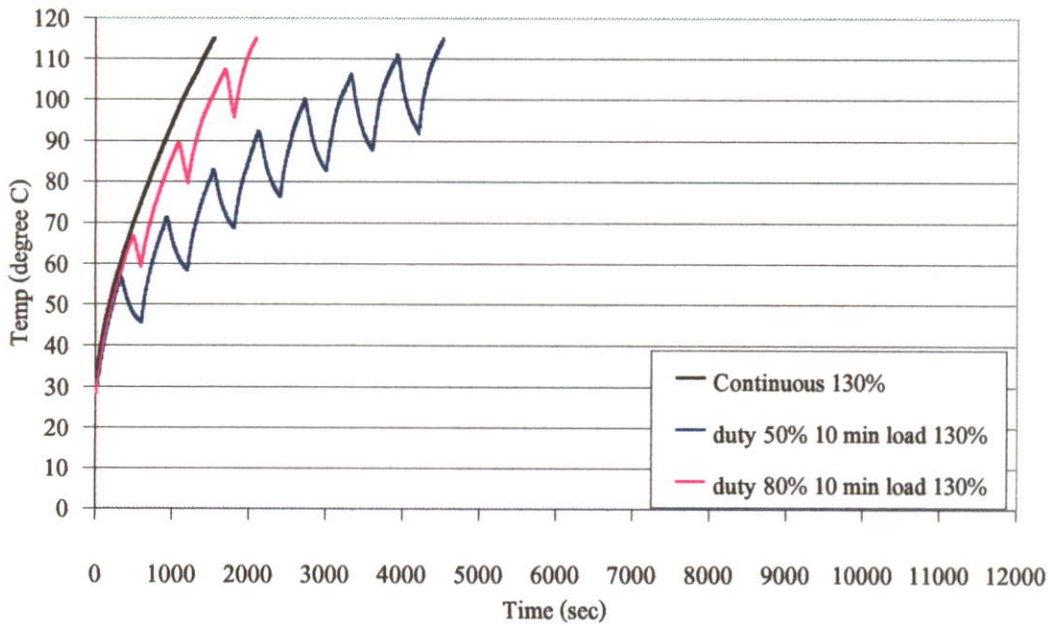
รูปที่ 4.11 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 130 %



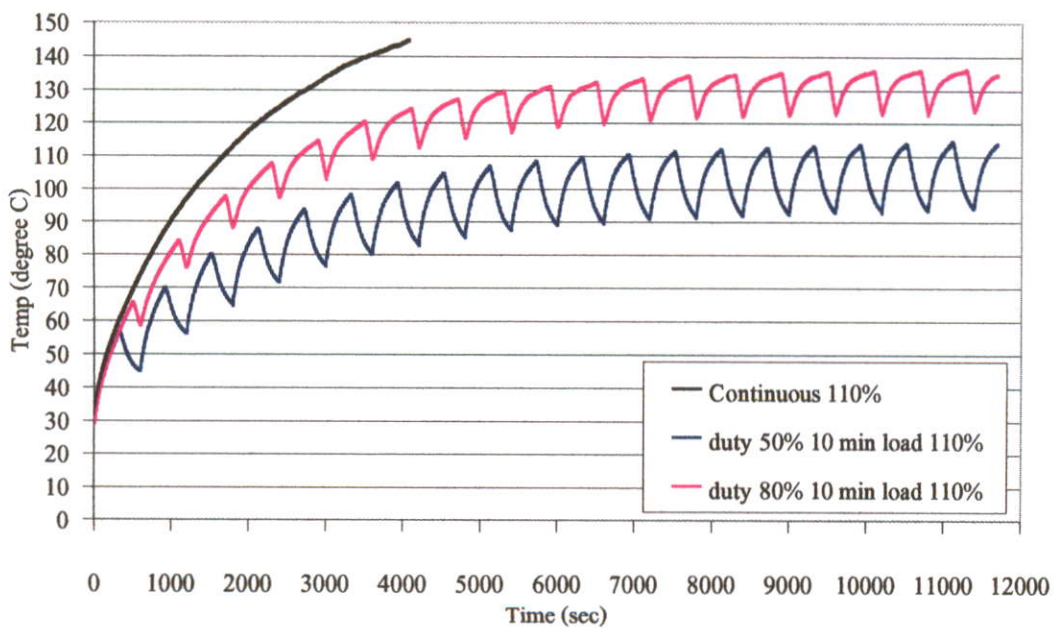
รูปที่ 4.12 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 110 %



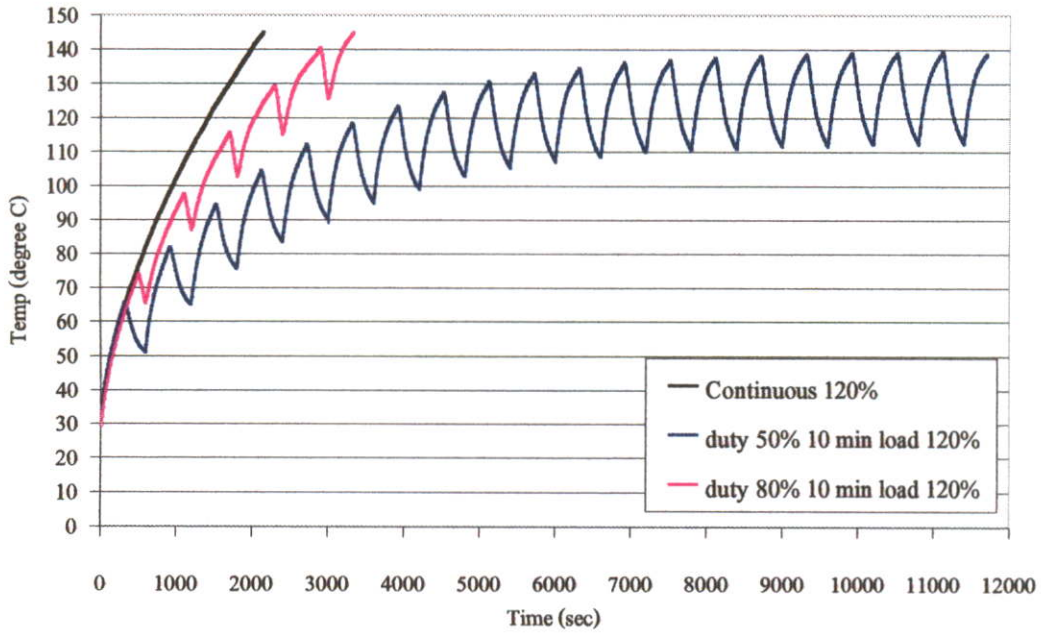
รูปที่ 4.13 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 120 %



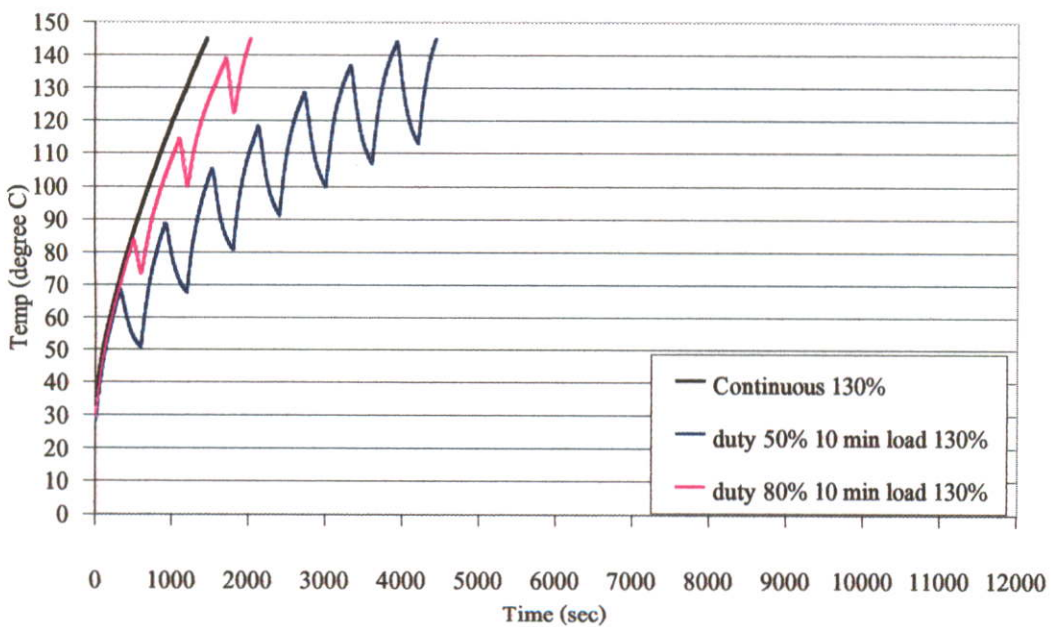
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 130 %



รูปที่ 4.15 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 110 %



รูปที่ 4.16 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 120 %



รูปที่ 4.17 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 130 %

4.5 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับการคำนวณมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา

สำหรับผลการทดสอบเปรียบเทียบกับการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแบ่งการนำเสนอทั้งหมดเป็น 3 กรณี ดังนี้

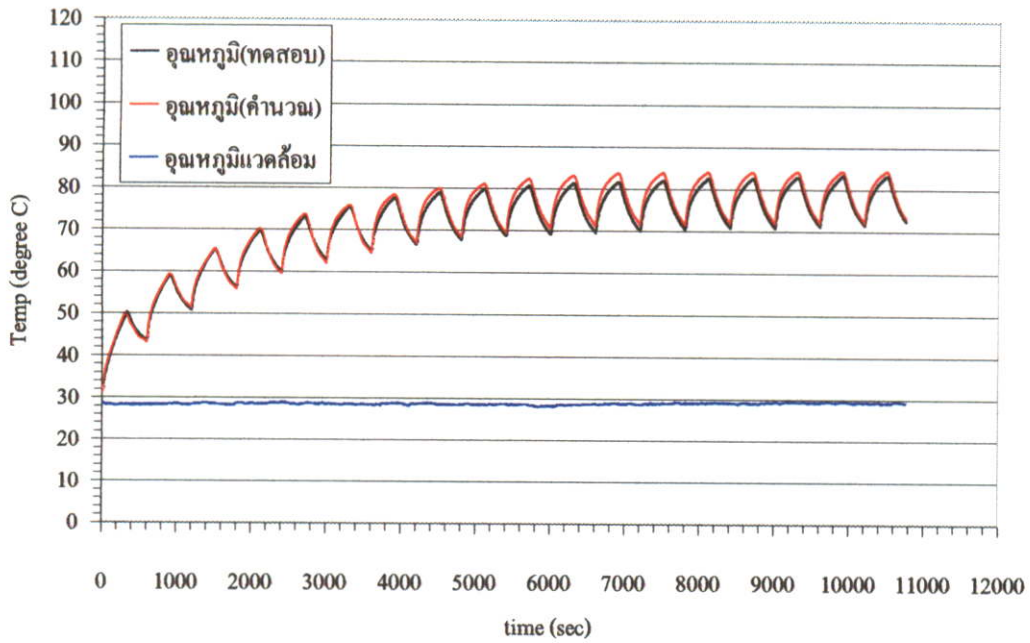
- 1) เมื่อเปลี่ยนภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า
 - เมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไอเซลล์ 50%, พิกัดภาระทางกล 110%
 - เมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไอเซลล์ 50%, พิกัดภาระทางกล 130%

- 2) เมื่อเปลี่ยนช่วงคาบเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า
 - เมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, คิวดีไอเซลล์ 50%, พิกัดภาระทางกล 110%
 - เมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, คิวดีไอเซลล์ 50%, พิกัดภาระทางกล 110%

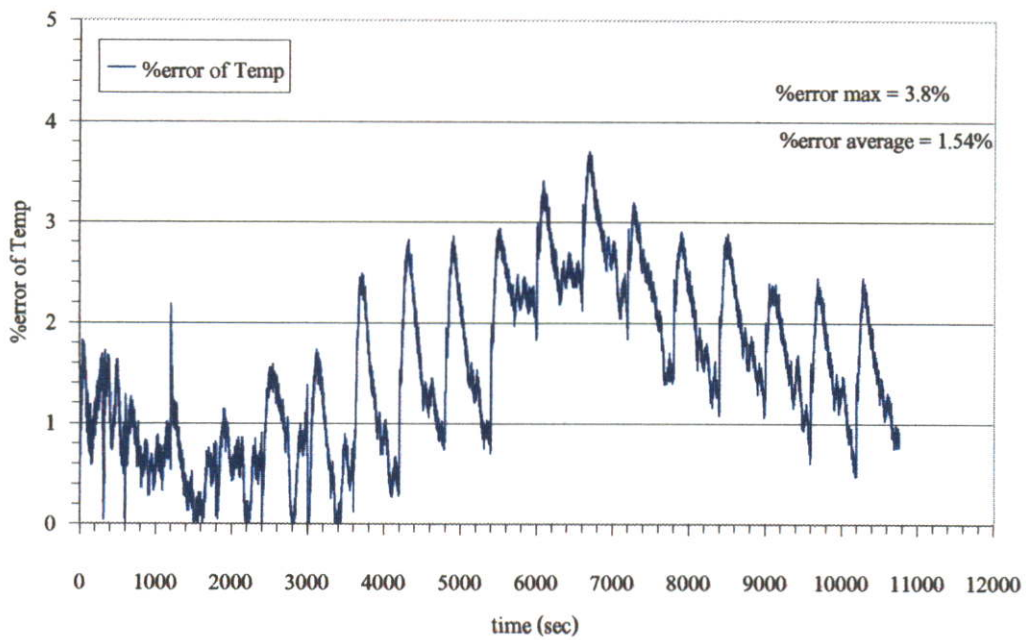
- 3) เมื่อเปลี่ยนคิวดีไอเซลล์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า
 - เมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไอเซลล์ 50%, พิกัดภาระทางกล 120%
 - เมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไอเซลล์ 80%, พิกัดภาระทางกล 120%

4.5.1 เมื่อเปลี่ยนภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

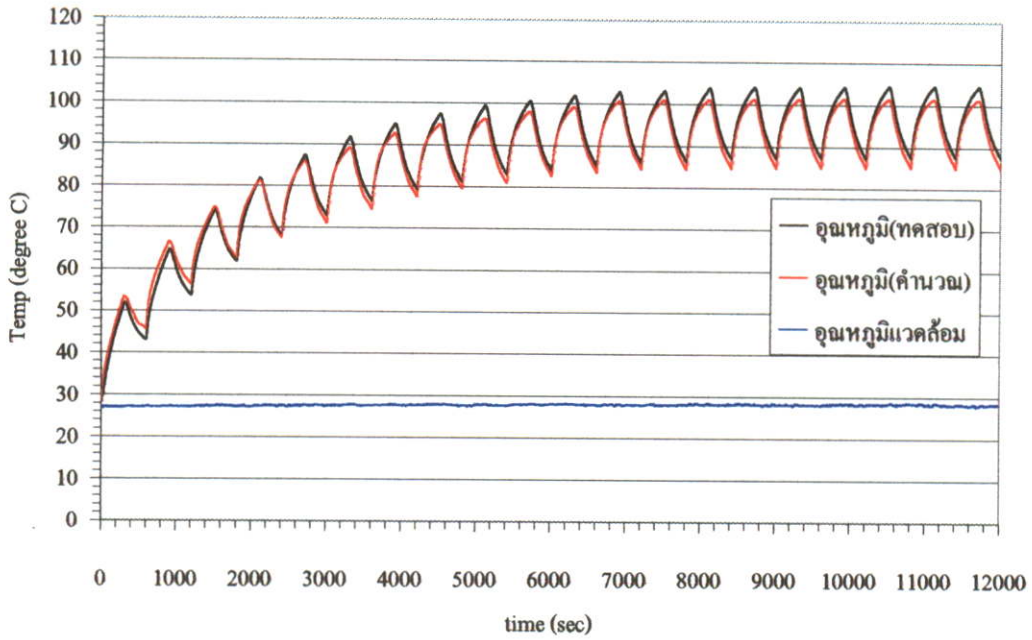
ในหัวข้อนี้เป็นการพิสูจน์เปรียบเทียบเมื่อใช้สมการเพื่อคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไอเซลล์ 50% โดยมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล 110% และ 130%



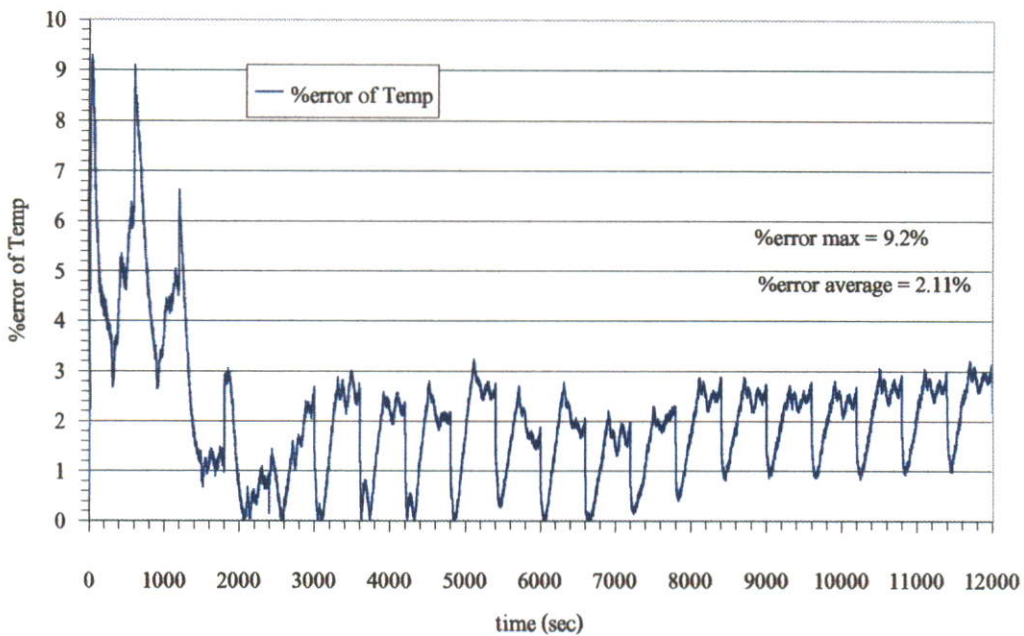
รูปที่ 4.18 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



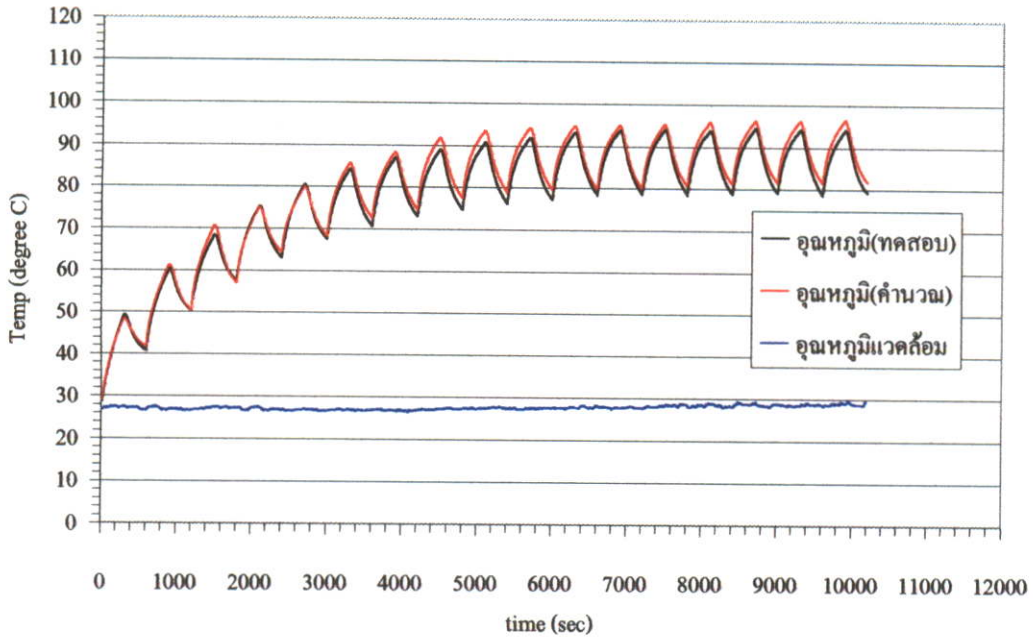
รูปที่ 4.19 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



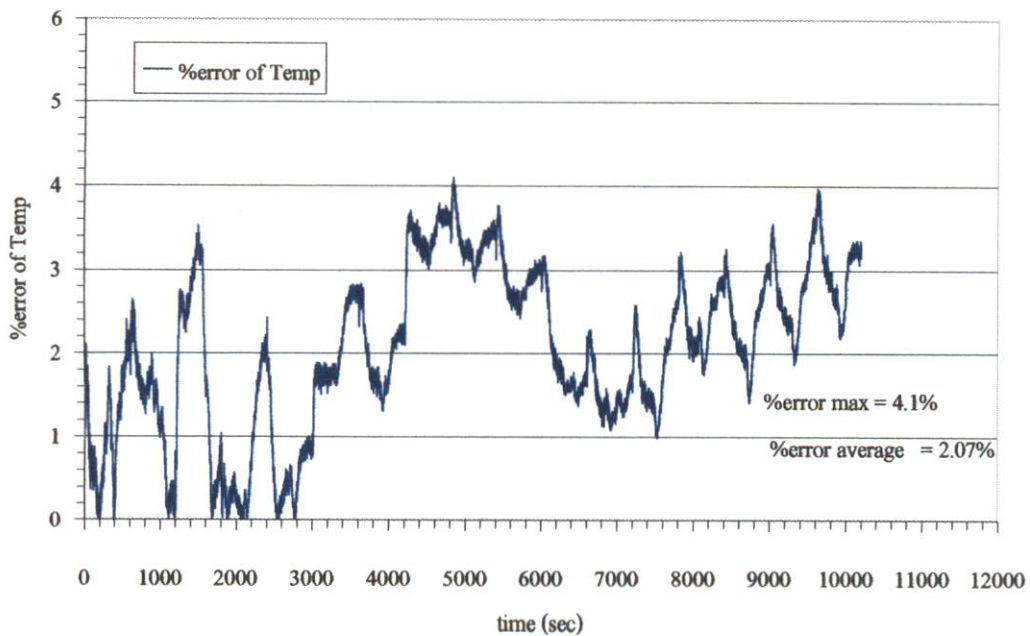
รูปที่ 4.20 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 130%



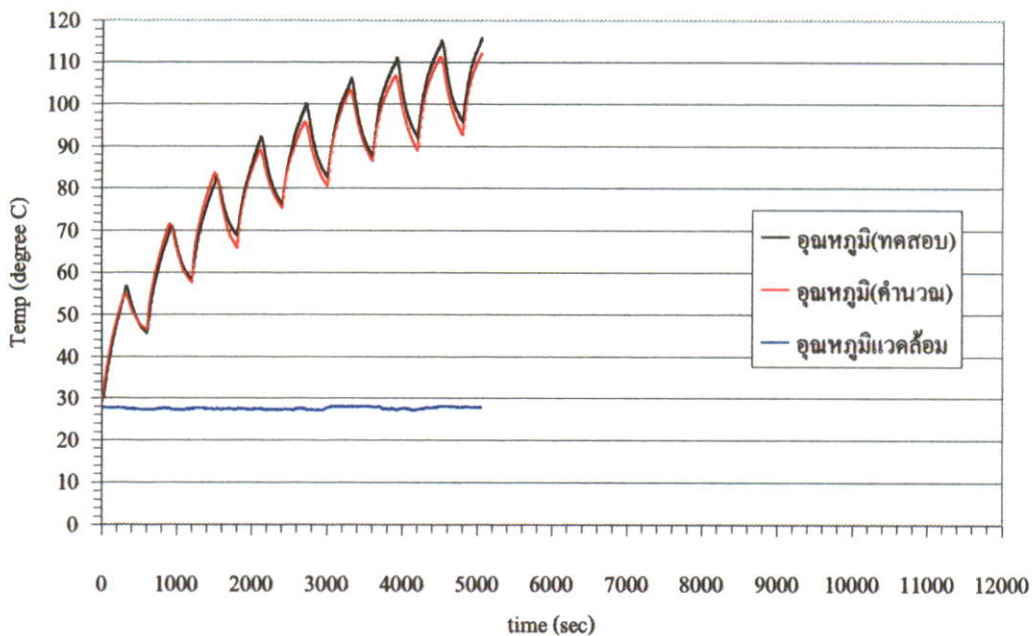
รูปที่ 4.21 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 130%



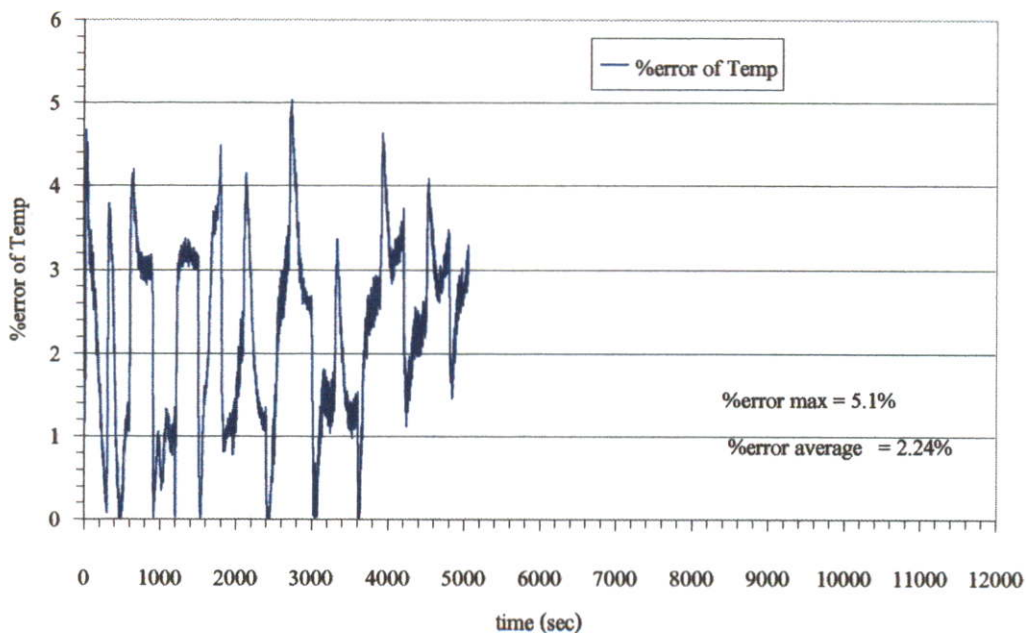
รูปที่ 4.22 การคำนวณอุณหภูมิจลลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



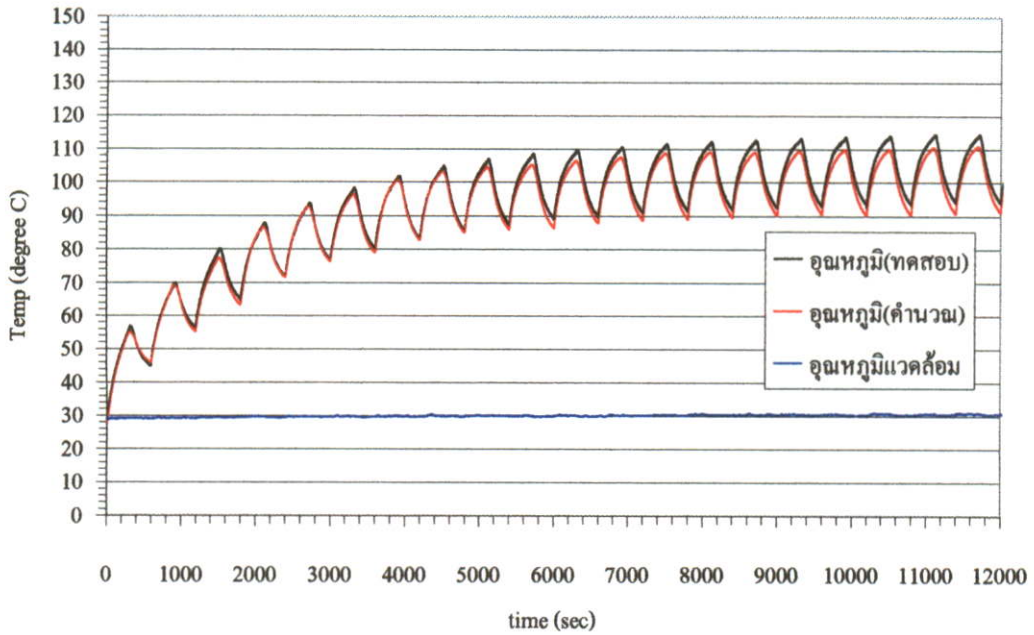
รูปที่ 4.23 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิจลลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



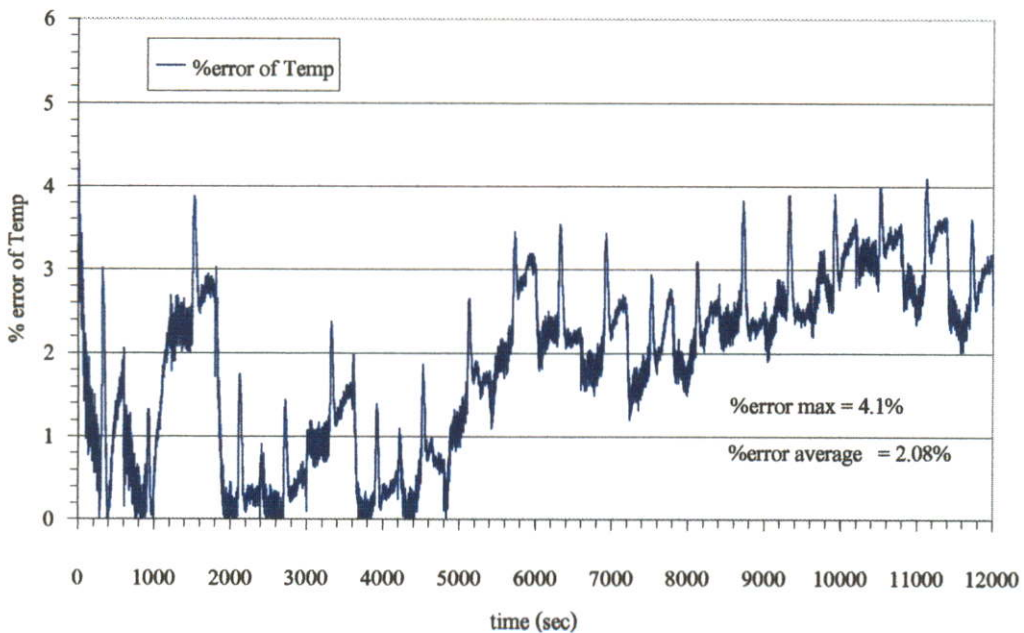
รูปที่ 4.24 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 130%



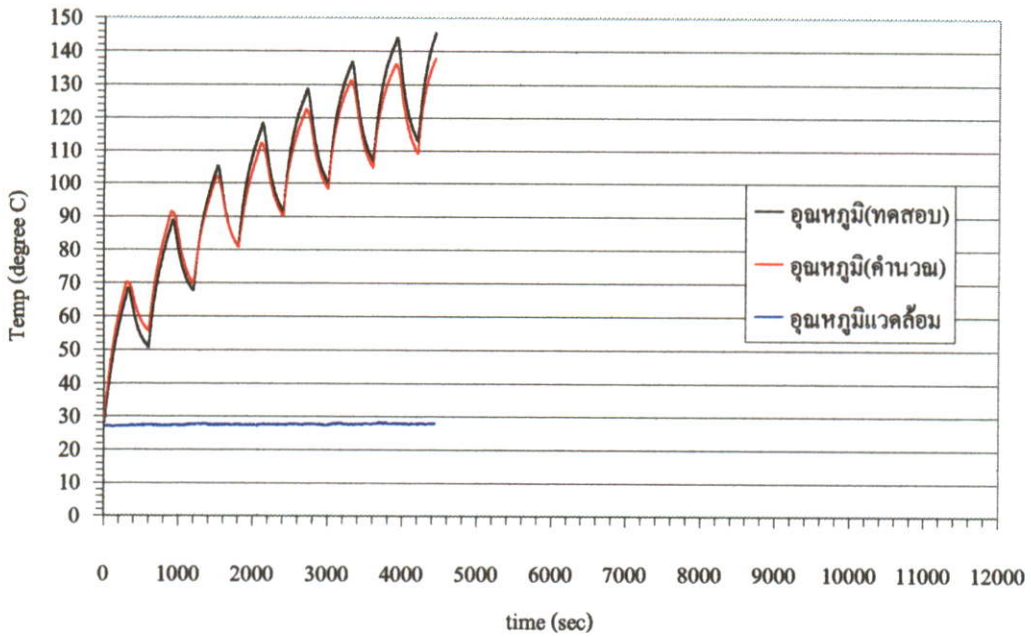
รูปที่ 4.25 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 130%



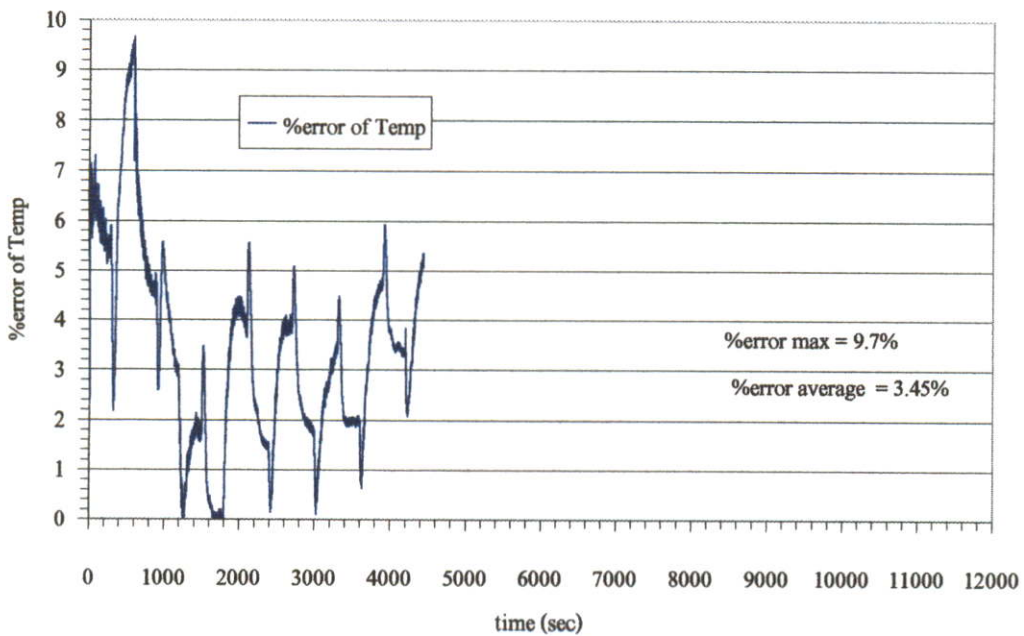
รูปที่ 4.26 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



รูปที่ 4.27 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



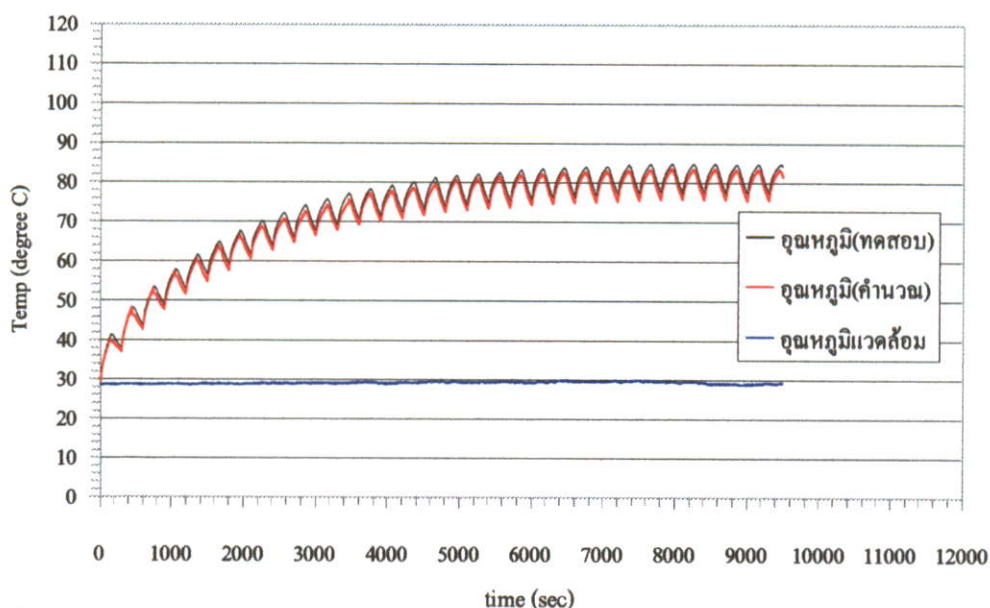
รูปที่ 4.28 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 130%



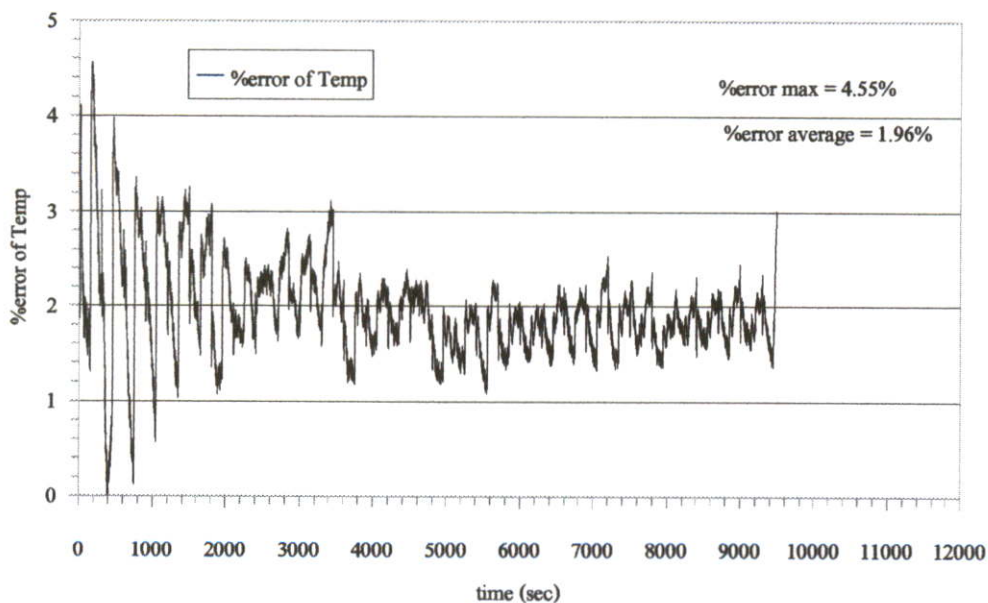
รูปที่ 4.29 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 130%

4.5.2 เมื่อเปลี่ยนช่วงคาบเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

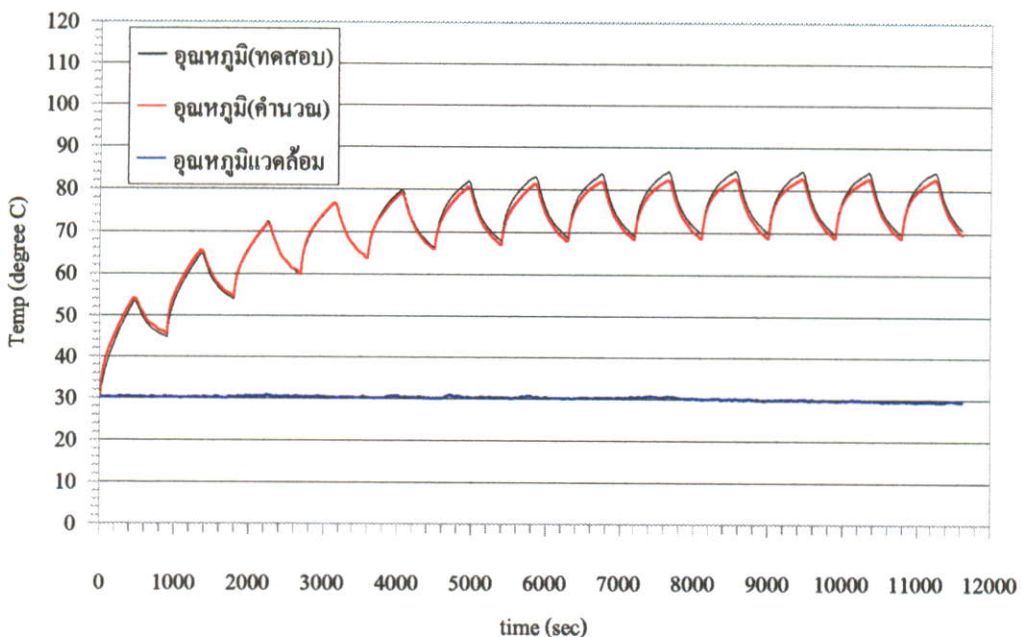
ในหัวข้อนี้เป็นการพิสูจน์เปรียบเทียบเมื่อใช้สมการเพื่อคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า โดยมีการเปลี่ยนแปลงคาบเวลา 5 นาที และ 15 นาที ที่คัตไจเซิล 50%, ที่พิกัดภาระทางกล 110%



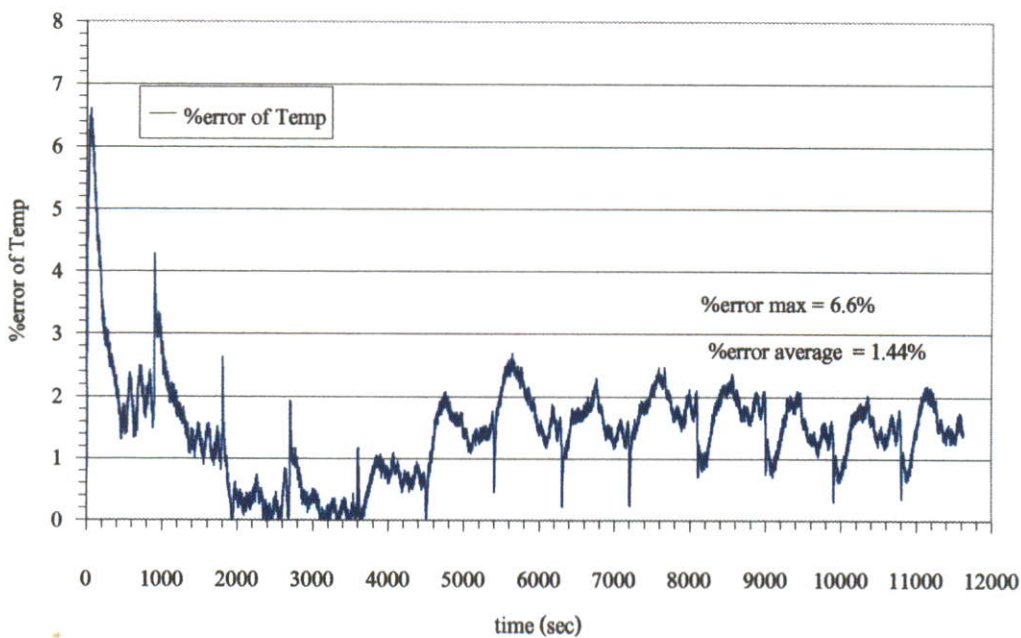
รูปที่ 4.30 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, คัตไจเซิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



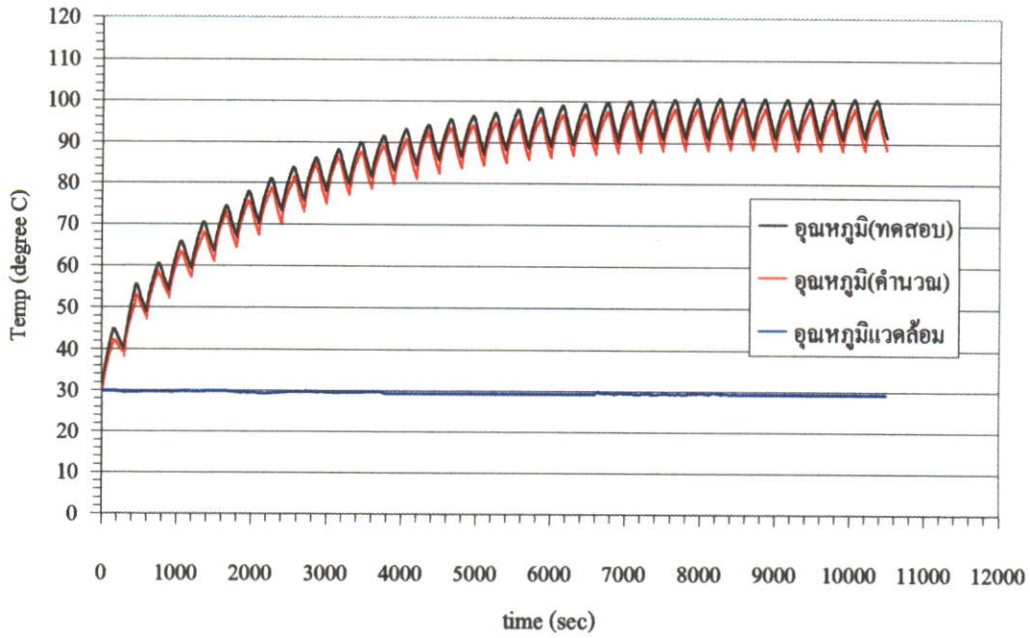
รูปที่ 4.31 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, คัตไจเซิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



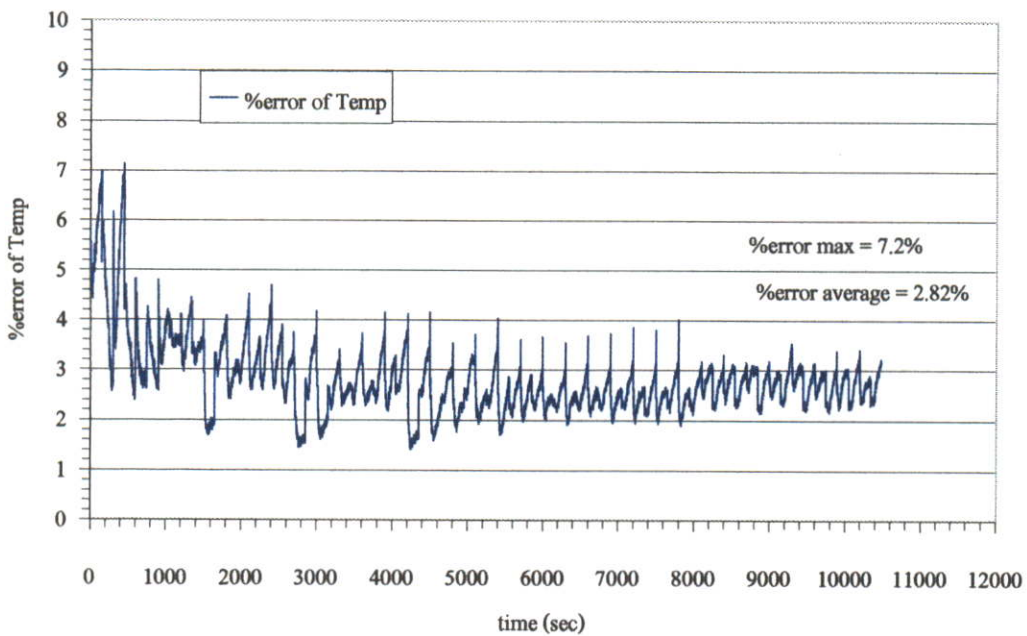
รูปที่ 4.32 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



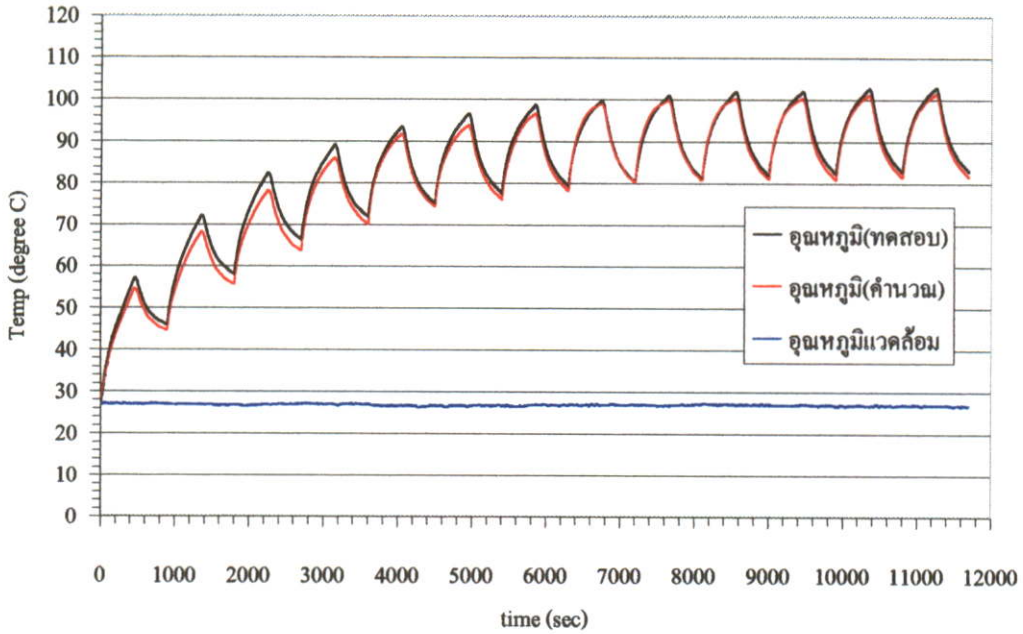
รูปที่ 4.33 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



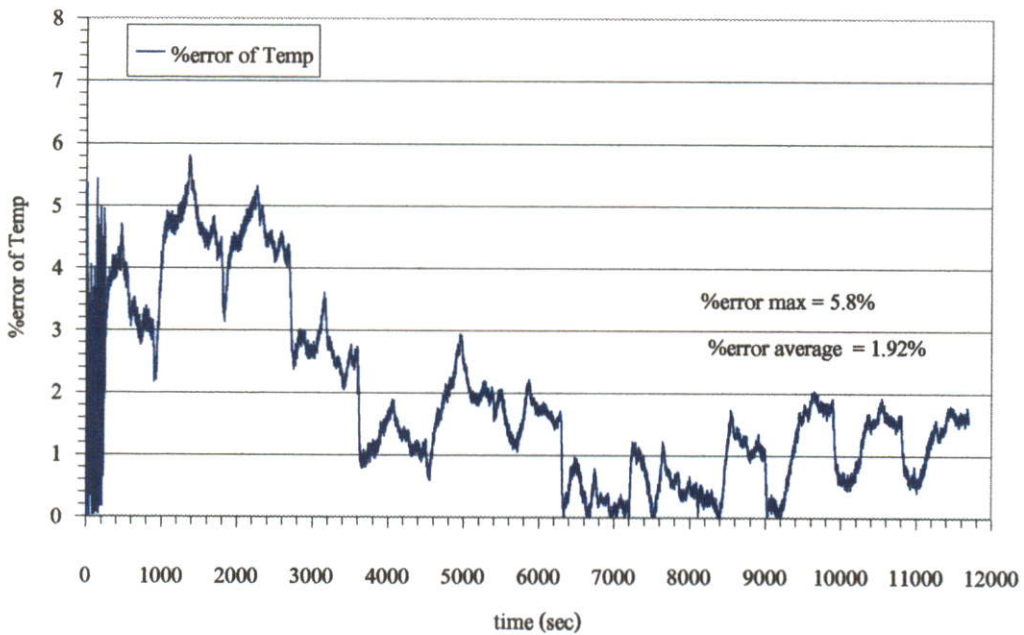
รูปที่ 4.34 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



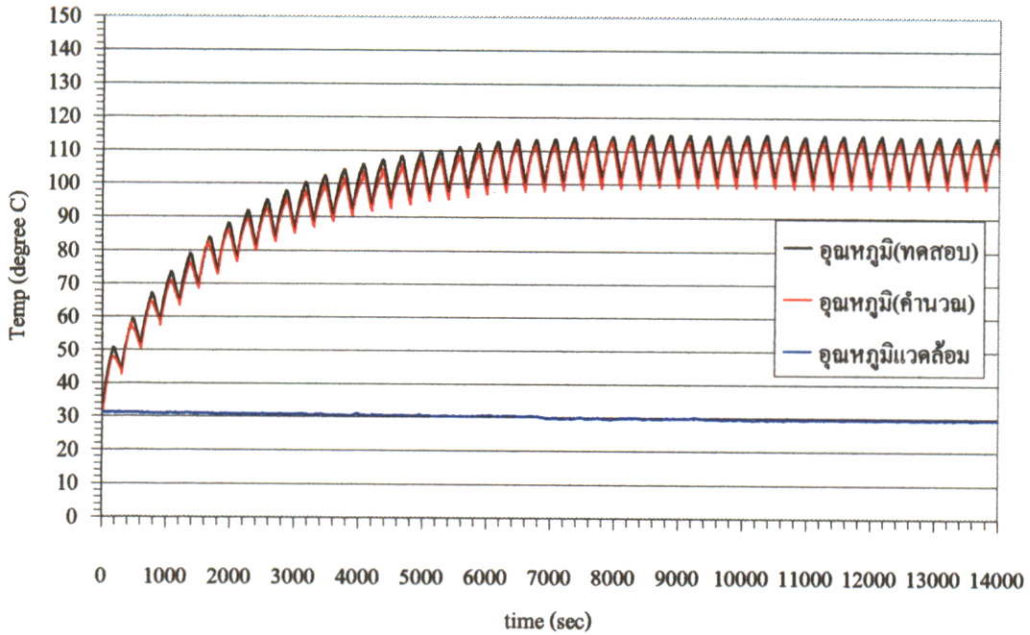
รูปที่ 4.35 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



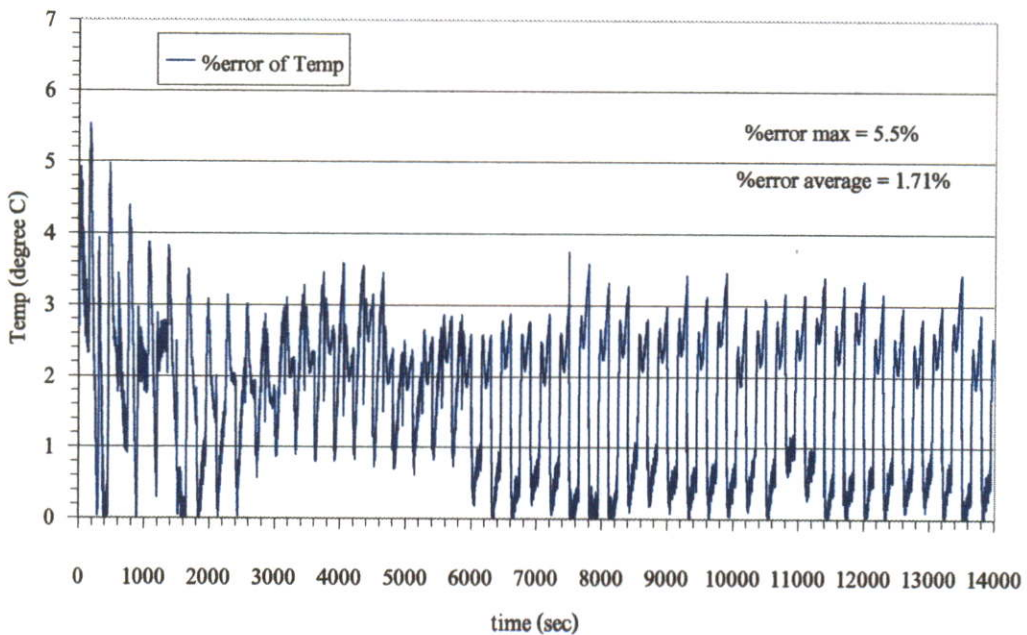
รูปที่ 4.36 การคำนวณอุณหภูมิจลลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



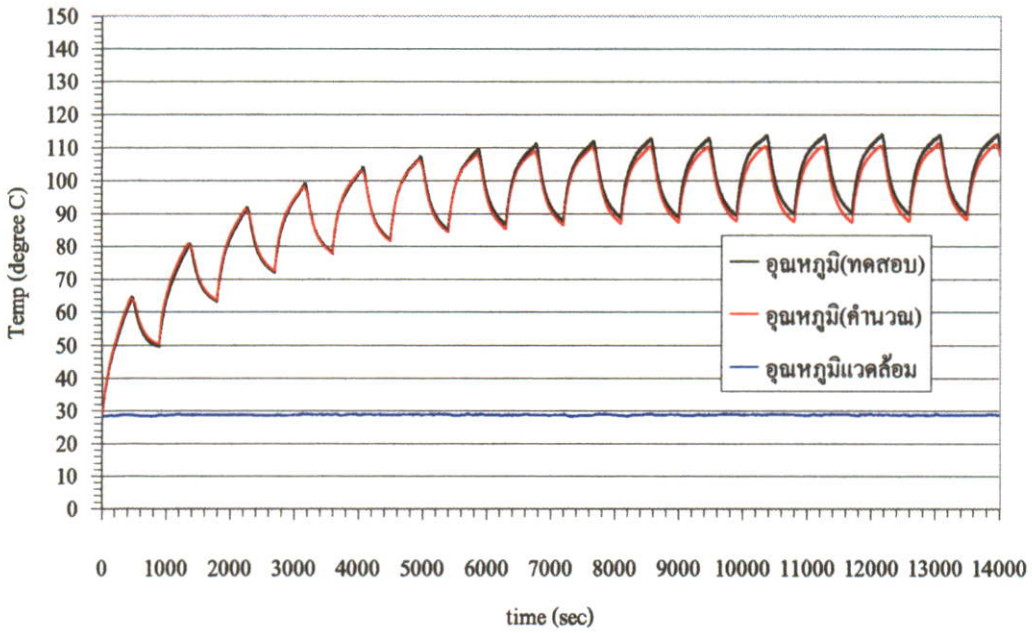
รูปที่ 4.37 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิจลลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



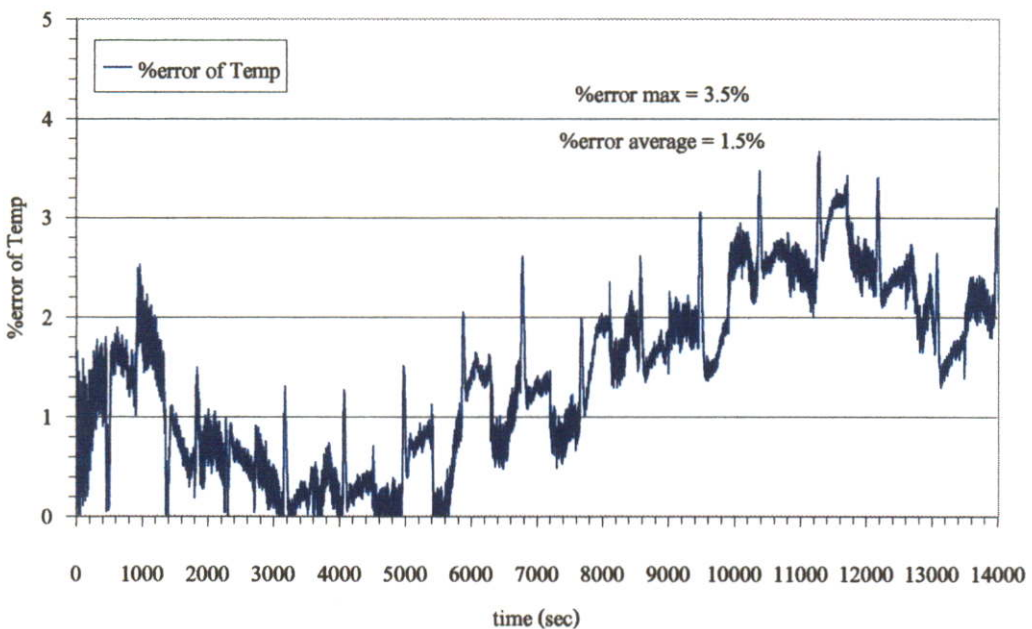
รูปที่ 4.38 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



รูปที่ 4.39 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, คิวดีไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



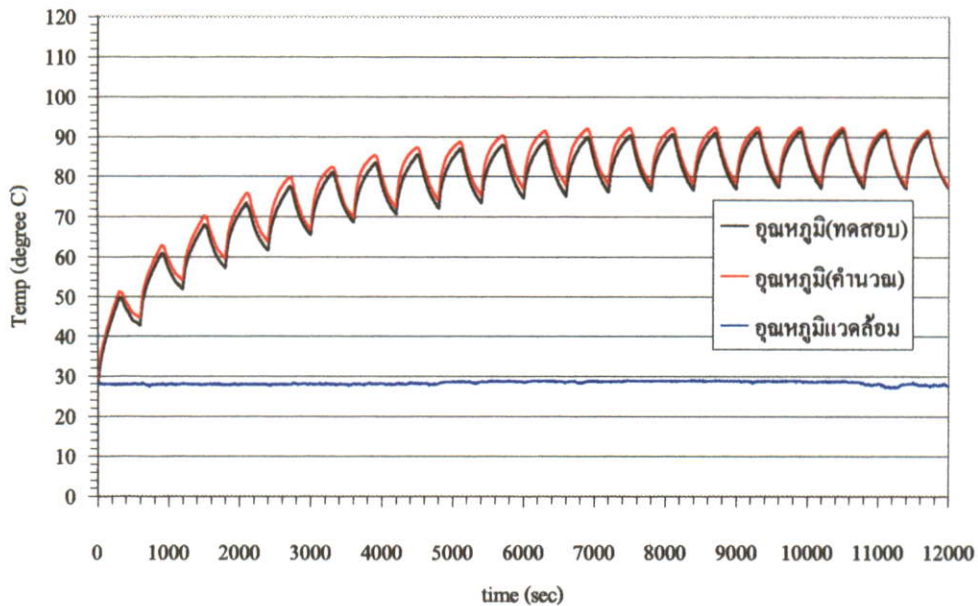
รูปที่ 4.40 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%



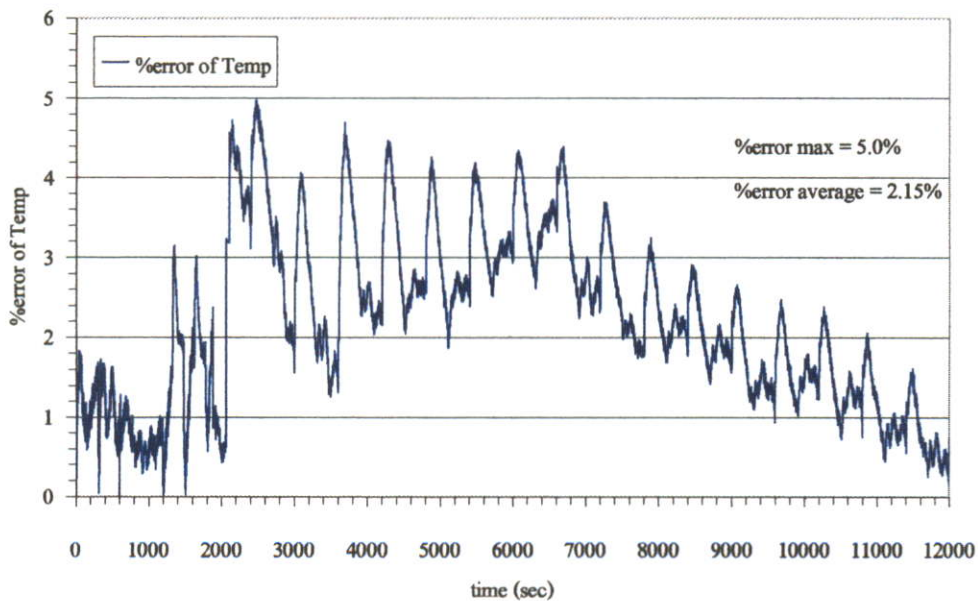
รูปที่ 4.41 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 110%

4.5.3 เมื่อเปลี่ยนควิตซ์ไซเคิลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

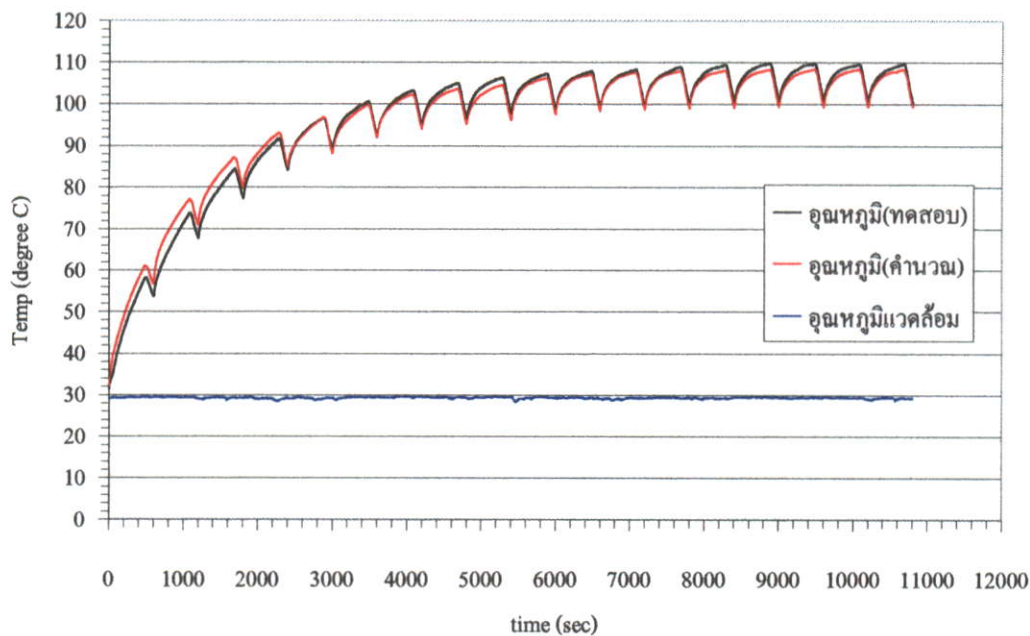
ในหัวข้อนี้เป็นการพิสูจน์เปรียบเทียบเมื่อใช้สมการเพื่อคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที โดยมีการเปลี่ยนควิตซ์ไซเคิล 50% และ 80%, ที่พิกัดภาระทางกล 120%



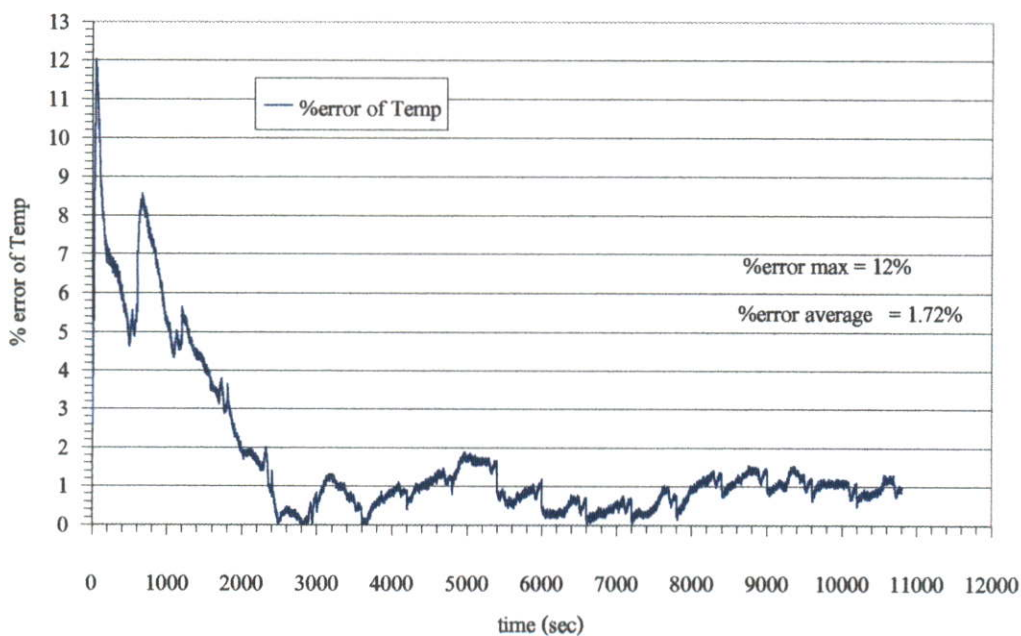
รูปที่ 4.42 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ควิตซ์ไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 120%



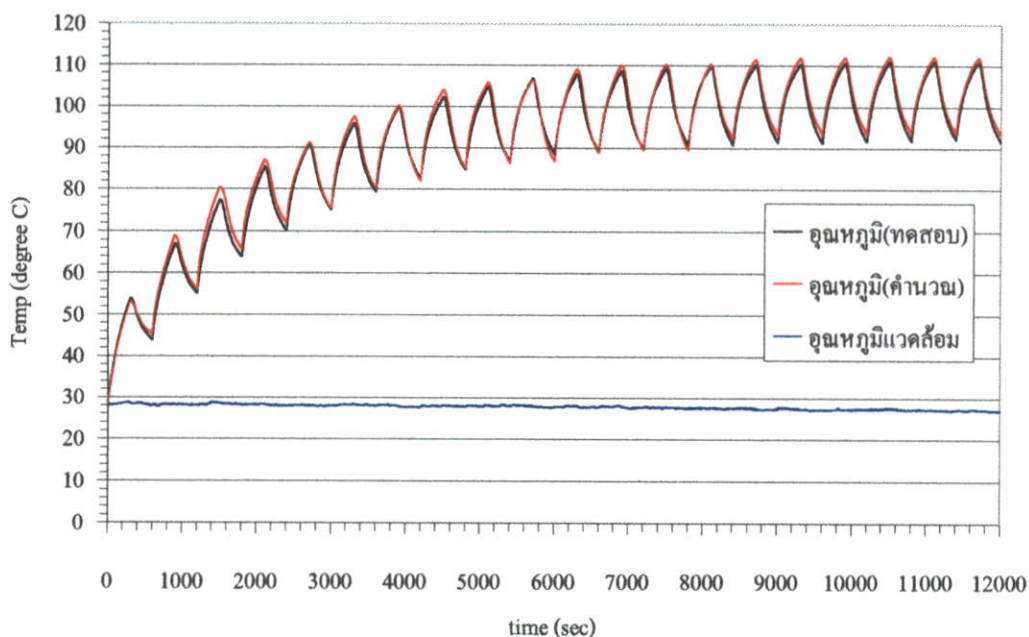
รูปที่ 4.43 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ควิตซ์ไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 120%



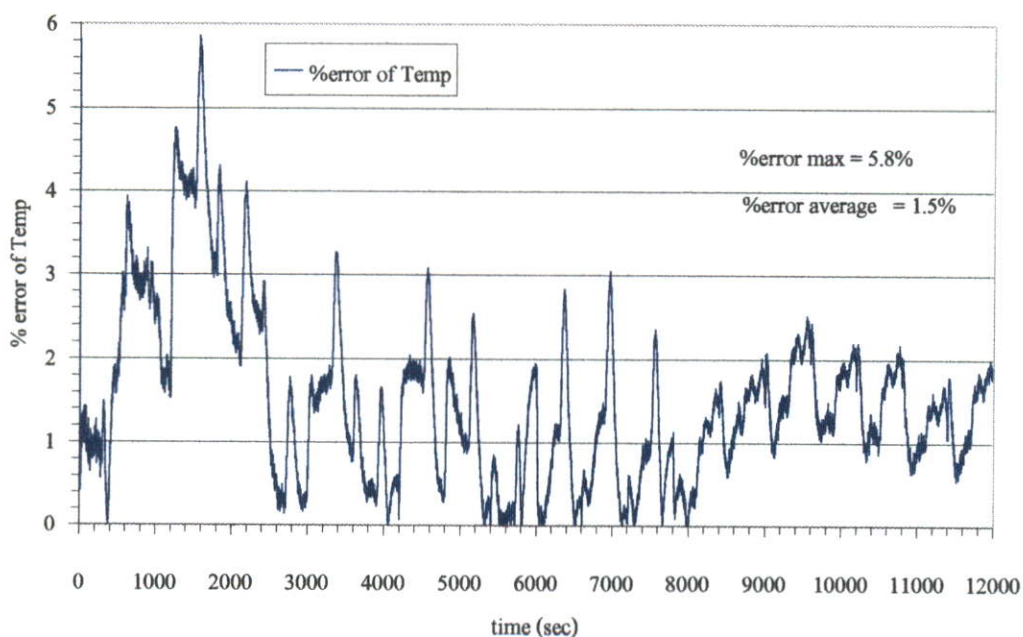
รูปที่ 4.44 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 80%, พิกัดภาระทางกล 120%



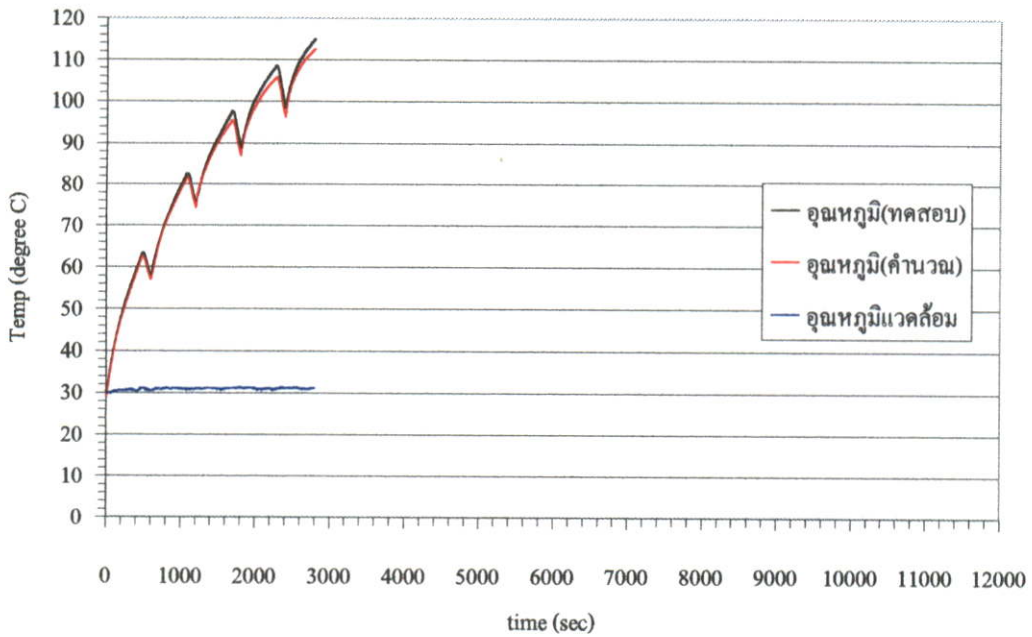
รูปที่ 4.45 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 80%, พิกัดภาระทางกล 120%



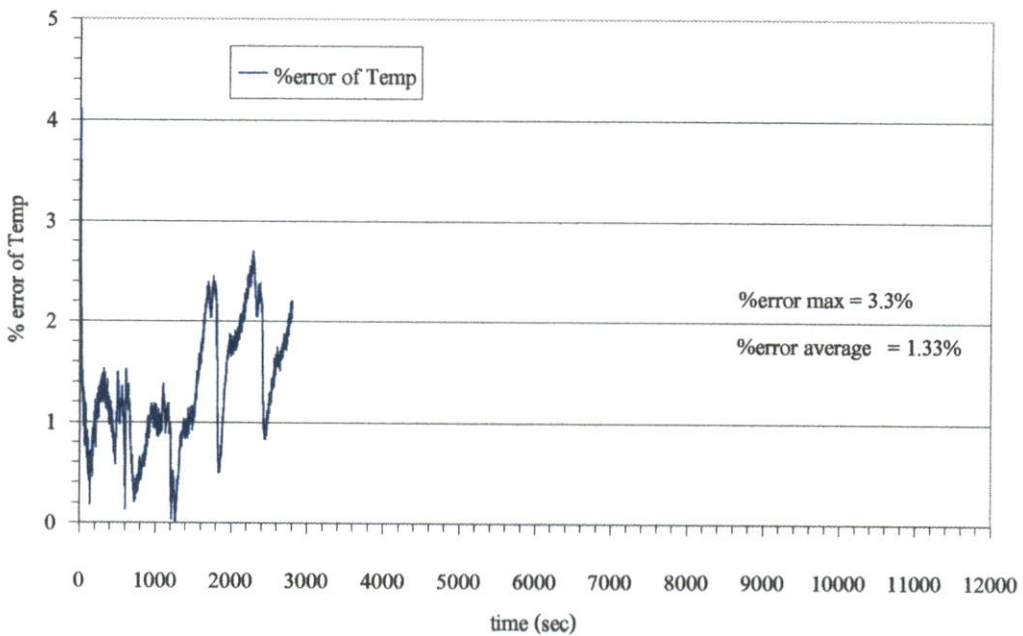
รูปที่ 4.46 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 120%



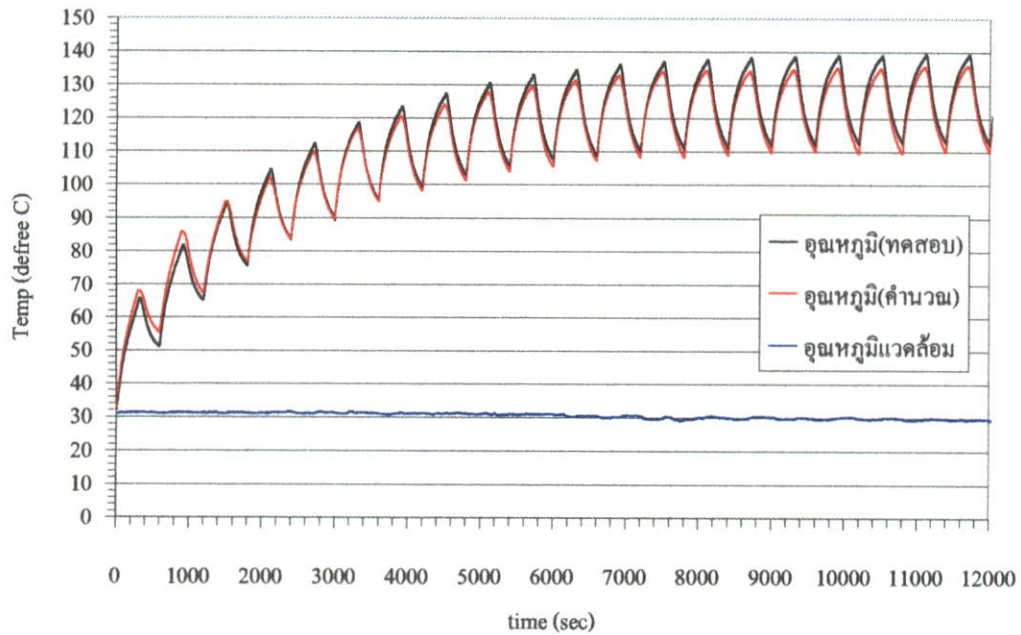
รูปที่ 4.47 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 120%



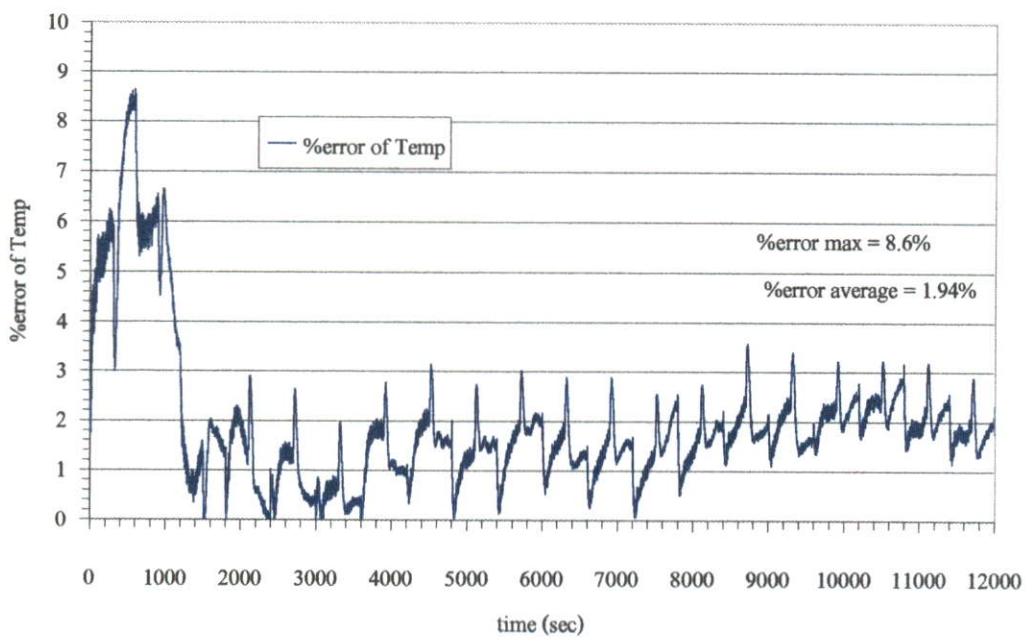
รูปที่ 4.48 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 80%, พิกัดภาระทางกล 120%



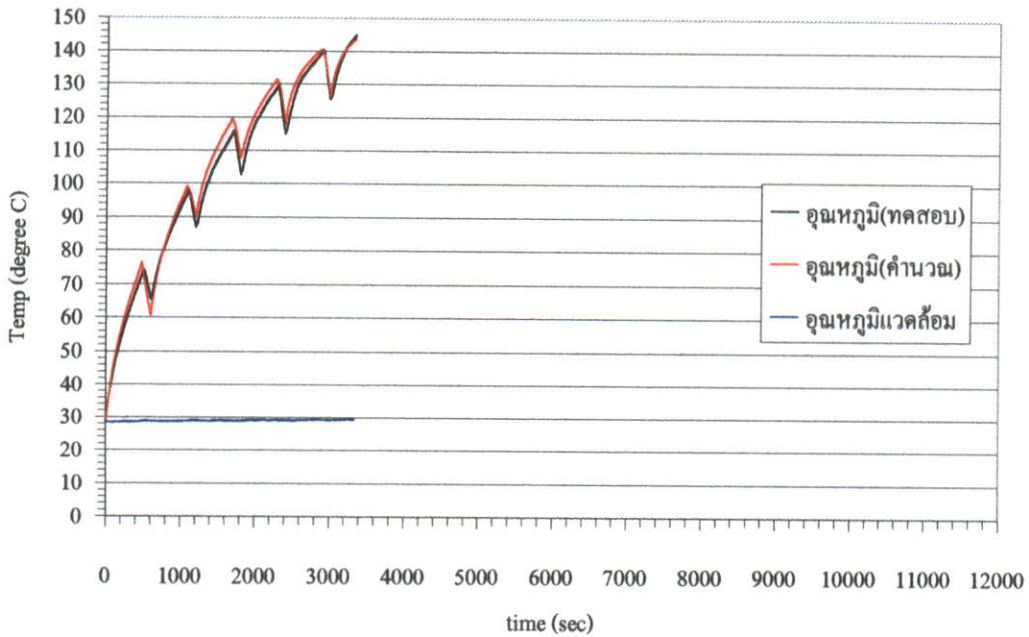
รูปที่ 4.49 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 80%, พิกัดภาระทางกล 120%



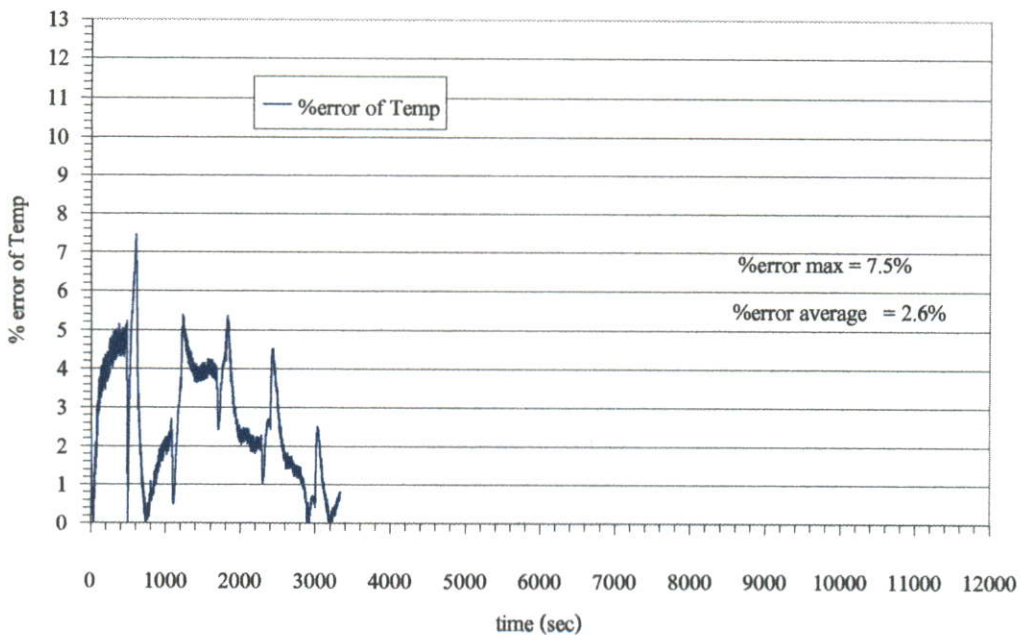
รูปที่ 4.50 การคำนวณอุณหภูมิจลลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวตี้ไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 120%



รูปที่ 4.51 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิจลลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบ มอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวตี้ไซเคิล 50%, พิกัดภาระทางกล 120%



รูปที่ 4.52 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 80%, พิกัดภาระทางกล 120%



รูปที่ 4.53 ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวดีไซเคิล 80%, พิกัดภาระทางกล 120%

บทที่ 5

บทสรุปและวิเคราะห์ผล

5.1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

วิทยานิพนธ์นี้เน้นถึงการคำนวณและทำนายอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เมื่อมีการทำงานเป็นคาบเวลาและสภาวะโหลดเกินพิกัด เหตุที่สนใจอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ก็เพราะว่าปกติมอเตอร์จะเกิดความเสียหายได้นั้นส่วนใหญ่แล้วเนื่องมาจากจนวนและวานิชที่เคลือบขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิเกินพิกัดได้ แต่การที่มอเตอร์จะทำงานลักษณะภาระทางกลเกินพิกัดได้นั้นใช้ระยะเวลาานานเท่าใด จึงไม่ทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหายนั้นเป็นเรื่องที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์หาสมการเพื่อใช้ในการคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างเช่น กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียภายในมอเตอร์ คุณสมบัติของการสะสมความร้อนและการระบายความร้อนของมอเตอร์ อุณหภูมิโดยรอบและความเร็วลมที่ระบายความร้อนให้กับครีบของมอเตอร์ เป็นต้น

ในการคำนวณหา กำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว คือขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า ซึ่งคำนวณจากวงจรสมมูลตามมาตรฐาน IEEE Std. 112-1996[5] ดังแสดงในรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์จากการคำนวณเปรียบเทียบกับ การทดสอบ ปรากฏว่าค่าผิดพลาดที่ได้น้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลที่น่าพอใจเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งในการคำนวณอุณหภูมิมอเตอร์

องค์ประกอบอีกส่วนหนึ่งที่มีผลต่ออุณหภูมิมอเตอร์คือ การหาคุณสมบัติของการสะสมความร้อนและการระบายความร้อน สามารถหาได้จากการทดสอบมอเตอร์ตัวนั้นๆ ดังนั้นค่าที่ได้ของมอเตอร์แต่ละตัวจะไม่เท่ากัน จากผลของการคำนวณหาการสะสมความร้อนขณะมอเตอร์ขับภาระทางกลและขณะมอเตอร์หยุดขับภาระทางกลนั้น ค่าที่ได้จะแปรผันตามอุณหภูมิมอเตอร์ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น(Non linear) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สมการโพลิโนเมียลเพื่อช่วยแก้ปัญหา สำหรับการหาอัตราการระบายความร้อน ถ้ามอเตอร์มีขนาดพิกัดแรงม้ามากขึ้น อัตราการระบายของความร้อนก็จะมากขึ้น เนื่องจากมอเตอร์ที่พิกัดแรงม้ามากกว่าซึ่งมีขนาดโตกว่าจะมีพื้นที่ผิวการระบายความร้อนมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.4

5.2 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลา

จากรูปที่ 4.9 ถึง รูปที่ 4.17 เป็นผลการทดสอบอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ ขนาด 1 แรงม้า , 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า โดยมีการเปรียบเทียบเมื่อมอเตอร์มีการทำงานเป็นแบบต่อเนื่อง

และเมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที ดิวตี้ไซเคิล 50% และ 80% จากผลการทดสอบนั้นเป็นการแสดงให้เห็นถึงเมื่อมอเตอร์มีลักษณะการทำงานเป็นคาบเวลา อุณหภูมิจะต่ำกว่าเมื่อมอเตอร์ทำงานแบบต่อเนื่อง เนื่องจากการทำงานที่เป็นแบบคาบเวลายังมีช่วงการหยุดพักการทำงานของมอเตอร์จึงทำให้มีการระบายความร้อนที่ดีกว่า และเมื่อเดิวตี้ไซเคิลมากขึ้นก็จะทำให้อุณหภูมิสูงกว่าที่เดิวตี้ไซเคิลน้อยๆ และเมื่อภาระทางกลเพิ่มสูงขึ้นอุณหภูมิก็สูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์สูงขึ้น ดังนั้นถ้าสามารถคำนวณและทำนายอุณหภูมิและระยะเวลาการทำงานของมอเตอร์ก่อนที่จะถึงจุดวิกฤตของฉนวนได้นั้น จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการเลือกขนาดมอเตอร์ให้เหมาะสมเพื่อใช้กับลักษณะงานต่างๆตามต้องการ

5.3 การคำนวณอุณหภูมิเปรียบเทียบกับ การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลา

ในการคำนวณอุณหภูมิจลลวดสเตเตอร์มอเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวคือ ขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า เมื่อให้มอเตอร์มีการทำงานเป็นคาบเวลาประเภทที่ 3 (Intermittent Periodic Duty) หรือ S3 ตามมาตรฐาน IEC 60034-1 :1996 [1] โดยใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำคำนวณกำลังไฟฟ้สูญเสียที่มีผลต่ออุณหภูมิในมอเตอร์ ซึ่งประยุกต์ใช้ร่วมกับหลักการของการถ่ายเทความร้อน และใช้สมการ โพลีโนเมียลทางคณิตศาสตร์ช่วยคำนวณให้เกิดความแม่นยำยิ่งขึ้น ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นการคำนวณที่น่าพอใจ ดังแสดงให้เห็นตั้งแต่ รูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.53 ดังนั้นหลักการและวิธีการคำนวณอุณหภูมินี้จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำนายอุณหภูมิของขลลวดสเตเตอร์ เพื่อป้องกันมอเตอร์ก่อนที่อุณหภูมิของฉนวนถึงจุดวิกฤตซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ขลลวดสเตเตอร์ลัดวงจรและเป็นอันตรายต่อมอเตอร์ได้ รวมถึงระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับมอเตอร์ด้วย

สำหรับการคำนวณและทำนายอุณหภูมิจลลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ นอกจากจะสามารถคำนวณอุณหภูมิได้แล้ว ก็ยังทำให้รู้ถึงระยะเวลาว่ามอเตอร์สามารถทำงานได้นานเท่าใดที่ไม่ทำให้มอเตอร์ได้รับความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิเกินพิกัดได้อีกด้วย

จุดเด่นของสมการที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอคือ สามารถคำนวณอุณหภูมิจลลวดสเตเตอร์เมื่อเปลี่ยนคาบเวลาการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าได้ เมื่อเปลี่ยนเดิวตี้ไซเคิลได้ และเปลี่ยนพิกัดภาระทางกลก็ได้ หรือแม้กระทั่งเปลี่ยนขนาดของมอเตอร์ก็ยังคำนวณได้ดีเช่นเดียวกัน

5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์มีองค์ประกอบหลายอย่างที่มีผลต่ออุณหภูมิ เช่น

- 1) เมื่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในมอเตอร์มากขึ้นก็ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในมอเตอร์ ได้คำนวณจากวงจรสมมูลของมอเตอร์ตามมาตรฐาน IEEE Std. 112-1996 ดังนั้นการคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์ จำเป็นต้องคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ให้ถูกต้องด้วย เพราะระดับอุณหภูมิของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณนั้นขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในมอเตอร์เป็นหลัก
- 2) คุณสมบัติการสะสมความร้อนของมอเตอร์ ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาผลิตมอเตอร์ เช่น ขดลวดสเตเตอร์ โรเตอร์ แกนเหล็ก และโครง เป็นต้น วัสดุทั้งหมดนี้จะแปรผันตามอุณหภูมิของมอเตอร์จึงทำให้การสะสมความร้อนของมอเตอร์แปรผันตามอุณหภูมิด้วย ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงจำเป็นต้องทดสอบเพื่อคำนวณหาคุณสมบัติของการสะสมความร้อนจากมอเตอร์ตัวนั้นๆ โดยใช้ทฤษฎีของ Lump capacitance โดยมีหลักการคือ การคิดเป็นกลุ่มก้อนโดยประมาณ ซึ่งถ้าสนใจอุณหภูมิที่ส่วนใดของมอเตอร์ ต้องวัดอุณหภูมิที่ส่วนนั้นเพื่อนำมาคำนวณหาการสะสมความร้อนของมอเตอร์ และใช้สมการ โพลีโนเมียลช่วยในการคำนวณเนื่องจากค่าที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear) สำหรับวิทยานิพนธ์นี้สนใจอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ เนื่องจากการที่มอเตอร์จะเกิดความเสียหายนั้น ส่วนใหญ่เนื่องมาจากฉนวนและวานิชที่เคลือบขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิเกินพิกัดได้
- 3) อุณหภูมิโดยรอบหรืออุณหภูมิแวดล้อม ถ้าอุณหภูมิแวดล้อมสูงขึ้นก็จะทำให้อุณหภูมิของมอเตอร์สูงขึ้นด้วย
- 4) การระบายความร้อนเนื่องจากพัลลภระบายความร้อนของมอเตอร์ เมื่อมีการเพิ่มภาระทางกลของมอเตอร์ก็จะทำให้ความเร็วรอบของโรเตอร์ลดลง ทำให้ความเร็วรอบของพัลลภมอเตอร์ลดลงด้วย เนื่องจากพัลลภติดร่วมกับโรเตอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ให้ความเร็วรอบของพัลลภมีผลน้อยจึงไม่นำมาคิด เนื่องจากการทดสอบที่พิกัดภาระทางกล 100% ถึง 130% ปรากฏว่าความเร็วของพัลลภลดลงไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับที่พิกัดภาระทางกล 100% ถือว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อย

ความผิดพลาดจากการคำนวณอุณหภูมิเปรียบเทียบกับทดสอบอาจเป็นผลเนื่องมาจาก

- 1) การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียภายในมอเตอร์จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ เนื่องจากพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลจะแปรผันตามอุณหภูมิ

- 2) การคำนวณคุณสมบัติการสะสมความร้อนของมอเตอร์ โดยขั้นตอนนี้เป็นต้องใช้สมการโพลีโนเมียลมาช่วยในการคำนวณ เนื่องจากค่าการสะสมความร้อนที่ได้จะแปรผันตามอุณหภูมิซึ่งมีค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้น(Non linear) ในการคำนวณโดยใช้โพลีโนเมียลนั้นต้องมี order ที่เหมาะสมถึงจะคำนวณผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่ง order เหมาะสมที่ใช้นี้ประมาณ order ที่ 5 เนื่องจากข้อมูลอุณหภูมิของมอเตอร์จากการทดสอบนั้นมีโดยเฉลี่ยประมาณ 12,000 ค่า แต่ละค่ามีการ Sampling จาก Recorder ทุกๆ 1 วินาทีที่มีการบันทึก 1 ค่า ดังนั้นจำนวนข้อมูลเยอะบางครั้งค่าที่ได้จากการวัดและการคำนวณจากสมการโพลีโนเมียลอาจเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดบ้าง
- 3) องค์ประกอบจากการสตาร์ทบ่อยครั้งของมอเตอร์เมื่อมีการทำงานเป็นคาบเวลาซึ่งมอเตอร์จะทำงานและหยุดทำงานเป็นวัฏจักรอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ขณะสตาร์ทมอเตอร์นั้น กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์จะสูงประมาณ 5 ถึง 7 เท่าของกระแสปกติของมอเตอร์ แต่เป็นช่วงเวลาสั้นๆประมาณ 2 วินาที จึงมีผลต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในมอเตอร์น้อย เนื่องจากช่วงระยะเวลาการทำงานของมอเตอร์ยาวนานกว่าช่วงช่วงสตาร์ทมากสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ไม่คิดกระแสขณะสตาร์ทที่มีผลต่อมอเตอร์ เนื่องจากจะทำให้การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในมอเตอร์เกิดความยุ่งยาก เพราะในช่วงนี้เป็นสภาวะช่วงทรานเซียน ดังนั้นประเด็นนี้อาจจะเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณอุณหภูมิมอเตอร์ที่ทำให้เกิดความผิดพลาด

องค์ประกอบดังกล่าวที่ทำให้การคำนวณอุณหภูมิจลลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบของวิทยานิพนธ์นี้อาจจะเกิดความผิดพลาดบ้าง ซึ่งค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าน้อยจึงยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ *Henneberger G, Ben Yahia K, Schmitz M.*[3] ที่ผ่านมาได้นำเสนอเทคนิคการคำนวณอุณหภูมิที่ส่วนต่างๆของมอเตอร์ โดยการใช้วงจรสมมูลความร้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำคำนวณอุณหภูมิของส่วนต่างๆของมอเตอร์ เช่น ขดลวดสเตเตอร์ โรเตอร์ แกนเหล็ก โครง เป็นต้น ปรากฏว่าผลที่ได้จากการคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์เปรียบเทียบกับ การทดสอบมีค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์เช่นกัน แต่การนำเสนอของเขานั้นเน้นการคำนวณอุณหภูมิทุกส่วนต่างๆของมอเตอร์และคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะภาระทางกลเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งแตกต่างกับวิทยานิพนธ์นี้สามารถใช้สมการที่ได้แนะนำคำนวณและทำนายอุณหภูมิจลลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการทำงานของมอเตอร์ 3 กรณี คือ มีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล เปลี่ยนแปลงคาบเวลา และเปลี่ยนแปลงควัตซ์ไซเคิล

5.5 ประโยชน์ของงานวิจัย

สำหรับประโยชน์จากการวิจัยเรื่องนี้ คือ

1. สามารถคำนวณและทำนายอุณหภูมิของมอเตอร์ได้
2. สามารถป้องกันมอเตอร์ก่อนที่จะเกิดความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิเกินพิกัดได้
3. สามารถเลือกคาบเวลา, พิกัดภาระทางกลและขนาดมอเตอร์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุด
4. สามารถลดขนาดมอเตอร์ลงได้ เมื่อให้มอเตอร์ทำงานเป็นคาบเวลาทราบใดที่อุณหภูมิยังไม่เกินพิกัดของฉนวน ซึ่งเมื่อลดขนาดมอเตอร์ลงแล้วจะทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในมอเตอร์ และยังประหยัดต้นทุนการซื้อมอเตอร์อีกด้วย

5.6 แนวทางในการพัฒนาต่อ

สามารถนำเทคนิคการคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์ที่นำเสนอนี้ ใช้ในการคำนวณและทำนายอุณหภูมิมอเตอร์ในสภาวะการทำงานเป็นคาบเวลาประเภทอื่นได้ หรือเมื่อสภาวะแหล่งจ่ายต่างๆ เช่น แหล่งจ่ายที่เป็นอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีฮาร์โมนิก และแหล่งจ่ายที่มีสภาวะแรงดันไม่สมดุล เป็นต้น ซึ่งสภาวะเหล่านี้มีผลกระทบต่ออุณหภูมิของมอเตอร์ทั้งสิ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] CEI/IEC 60034-1 1996 International Standard. **Rotating electrical machines Part 1: Rating and performance.** International Standard, 1996.
- [2] เปรมศักดิ์ ปรีชา, พิชิต ลำยอง และรัชต์ มั่งมีชัย, “เทคนิคการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลาในสภาวะโหลดเกินพิกัด.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 22-23 พฤศจิกายน 2545, หน้า 263-268.
- [3] Henneberger G., Ben Yahia K. and Schmitz M. “Calculation and Identification of A Thermal Equivalent Circuit of A Water Cooled Induction Motor for Electric Vehicle Applications.” *Electrical Machines and Drives*, Conference Publication No.412, IEE, Sep. 1995. pp.6-10.
- [4] Bayazitoglu Y. and Necati Ozisik M. **Elements of Heat Transfer.** McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [5] IEEE Standards 112-1996. **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.** American National Standard (ANSI), 1996.
- [6] Hoffman JoeD. **Numerical Methods for Engineers and Scientists.** McGraw-Hill, 1993.
- [7] Griffiths D. **Principles and Problems of Electrical Machines.** Prentice Hall International (UK) Limited, 1995.
- [8] O’Kely D. **Performance and Control of Electrical Machines.** McGraw-Hill Book Company, 1992.

ภาคผนวก ก

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบบมาตรฐาน

ก.1 วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบบมาตรฐาน

วงจรสมมูลแบบนี้เป็นวงจรสมมูลแบบมาตรฐาน โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะมีวิธีการคิดที่ละเอียดซึ่งในที่นี้จะคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน IEEE Std. 112-1996 [5] โดยค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจะหาได้จากผลการทดสอบต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบ No-load ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า

$V_{in} (V)$			$I_{in} (A)$			$P_{in} (W)$		
V_r	V_s	V_t	I_r	I_s	I_t	P_r	P_s	P_t
220	220	220	1.17	1.2	1.23	75	62	43

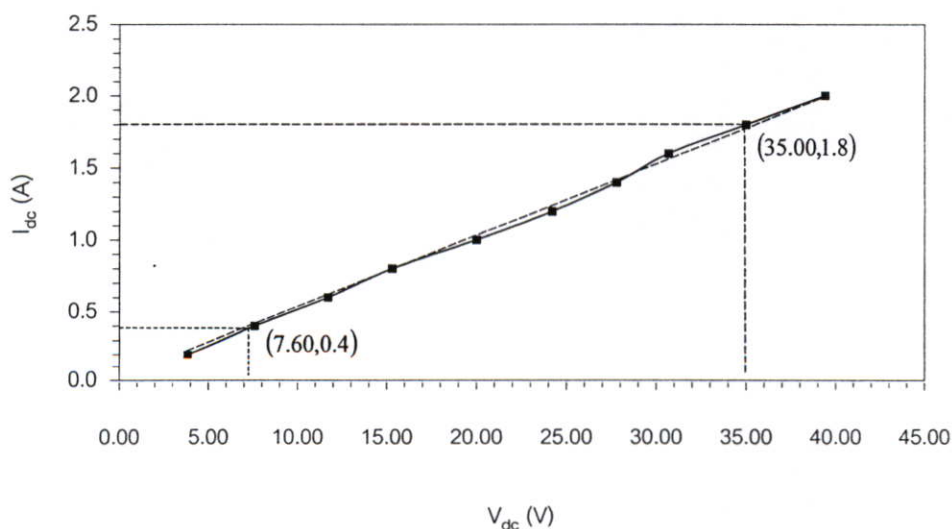
ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบ Blocked – rotor (ที่ 12.5 Hz) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า

$V_{in} (V)$			$I_{in} (A)$			$P_{in} (W)$		
V_r	V_s	V_t	I_r	I_s	I_t	P_r	P_s	P_t
39.2	39.4	39.4	2.0	2.0	2.0	74	74	75

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบ VI-method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า

$V_{dc} (V)$	7.6	11.7	15.3	20.0	24.2	27.8	30.7	35.0	39.4
$I_{dc} (A)$	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0

จากตารางที่ ก.3 หาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (R_1) โดยใช้ความชันของกราฟดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 แสดงการหาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า

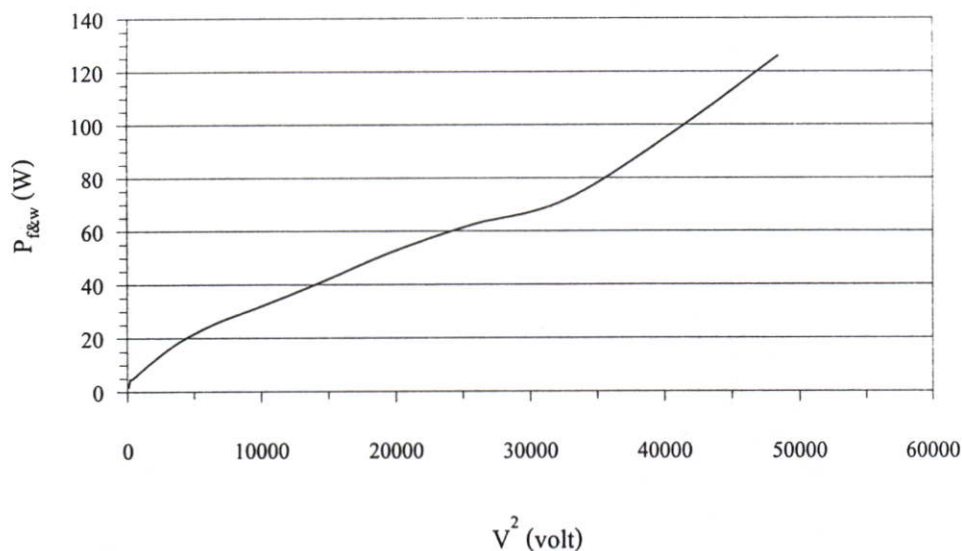
จากสมการที่ 2.15

$$R_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{35.0 - 7.6}{1.8 - 0.4} \right) = 9.797 \text{ } \Omega / ph$$

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบหา Friction and Windage loss ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า

$V_{in} (V)$	10	15	20	40	60	80	100	120	160	200	220
$I_{in} (A)$	0.22	0.21	0.20	0.26	0.34	0.41	0.49	0.59	0.80	1.08	1.32
$P_{in} (W)$	3	6	6	12	21	30	39	51	81	129	177

จากผลการทดสอบ สามารถหาค่าของ Friction and Windage loss โดยการนำค่ากำลังอินพุต (P_{in}) ลบกับกำลังสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ ($I_1^2 R_1$) จากกราฟดังรูปที่ ก.2 ให้แกน x เป็นแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง (V^2) และแกน y คือ $P_{f\&w} = P_{in} - 3I_1^2 R_1$ ซึ่งจากกราฟจะพิจารณาที่แกน x=0 ซึ่งตัดกับแกน y ดังนั้นจะได้ค่า Friction and Windage loss ประมาณ 1.58 Watt



รูปที่ ก.2 แสดงการหาค่า Friction and Windage losses ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบบมาตรฐาน IEEE Std. 112-1996 จากสูตรการคำนวณดังที่กล่าวไว้ในบททฤษฎีข้างต้นของหัวข้อที่ 2.4 เป็นดังนี้

$$\text{จากตารางที่ ก.2 } V_{1,b} = 39.33 \text{ V } \quad I_{1,b} = 2.00 \text{ A } \quad P_{1,b} = 74.33 \text{ W}$$

กำหนดให้ $V_{1,b}$, $I_{1,b}$ และ $P_{1,b}$ เป็นค่าเฉลี่ยของสามเฟส

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์

จากสมการที่ 2.6 และ 2.8 สามารถหาค่า VAR_o และ VAR_b ได้ดังนี้

$$VAR_o = \sqrt{(3 \times 220 \times 1.2)^2 - (3 \times 60)^2} = 771.274 \text{ Var}$$

$$VAR_b = \sqrt{(3 \times 39.33 \times 2)^2 - (3 \times 74.33)^2} = 77.246 \text{ Var}$$

จากสมการที่ 2.5, 2.7 และ 2.9 ตามลำดับ สามารถหาค่า X_1 และ X_m ได้ดังนี้

รอบที่ 1 หา X_1 และ X_m โดยสมมติค่า $\frac{X_1}{X_m}$ และ X_1 ให้เท่ากับ 1

$$X_m = \frac{3(220)^2}{771.274 - 3(1.2)^2(1)} \left(\frac{1}{1+1} \right)^2 = 47.330 \text{ } \Omega/ph$$

$$X_{1,b} = \frac{77.246}{3(2)^2(1+1+1)}(1+1) = 4.291 \text{ } \Omega/ph$$

$$X_1 = \frac{50}{12.5}(4.291) = 17.166 \text{ } \Omega/ph$$

รอบที่ 2 หา X_1 และ X_m โดยแทนค่า X_m และ X_1 จากรอบที่ 1

$$X_m = \frac{3(220)^2}{771.274 - 3(1.2)^2(17.166)} \left(\frac{1}{1 + \frac{17.166}{47.330}} \right)^2 = 112.168 \text{ } \Omega/ph$$

$$X_{1,b} = \frac{77.246}{3(2)^2 \left(1 + 1 + \frac{17.166}{47.33} \right)} \left(1 + \frac{17.166}{47.330} \right) = 3.713 \text{ } \Omega/ph$$

$$X_1 = \frac{50}{12.5}(3.713) = 14.851 \text{ } \Omega/ph$$

$$\%Error \text{ ของ } X_m = \left| \frac{112.168 - 47.330}{112.168} \right| \times 100 = 57.804\%$$

$$\%Error \text{ ของ } X_1 = \left| \frac{14.851 - 17.166}{14.851} \right| \times 100 = 15.590\%$$

ค่าของ X_1 และ X_m ดังตัวอย่างการคำนวณยังไม่สามารถนำมาใช้ได้ จะต้องคำนวณหาไปจนกว่าจะมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 0.1% หรือจนกระทั่งให้ค่ามีเสถียรภาพ ดังแสดงไว้ในตารางที่ ก.5 ซึ่งจากตารางจะได้ค่าของ X_1 เท่ากับ 13.345 โอห์ม, X_m เท่ากับ 175.765 โอห์ม และ $X_{1,b}$ เท่ากับ 3.336 โอห์ม

ตารางที่ ก.5 ค่า X_1 และ X_m จากการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE Std.112-1996 ของมอเตอร์
เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า

รอบที่	X_m	$X_{1,b}$	X_1	%Error	
				X_m	X_1
1	47.330	4.291	17.166	-	-
2	112.168	3.713	14.851	57.804	15.590
3	160.132	3.418	13.674	29.952	8.607
4	173.057	3.350	13.402	7.469	2.031
5	175.331	3.339	13.354	1.297	0.354
6	175.697	3.337	13.347	0.208	0.057
7	175.754	3.336	13.345	0.033	0.009
8	175.763	3.336	13.345	0.005	0.001
9	175.765	3.336	13.345	0.001	0.000
10	175.765	3.336	13.345	0.000	0.000

จากสมการที่ 2.11 $P_{core} = 3(60) - 1.58 - 3(1.2)^2(9.797) = 136.098 \text{ W}$

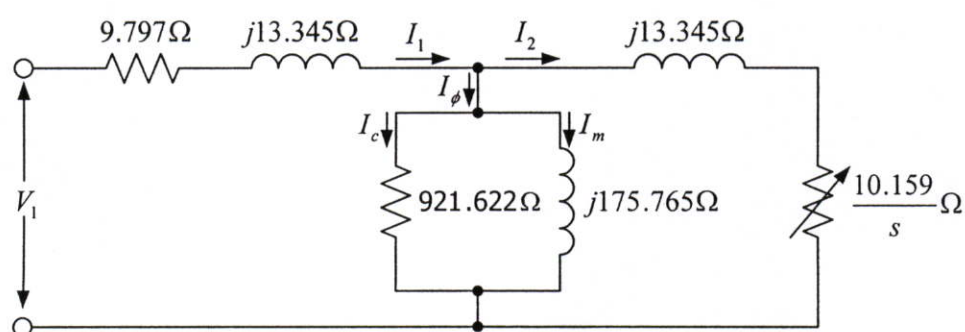
จากสมการที่ 2.12 $G_c = \frac{136.098}{3(220)^2} \left(1 + \frac{13.345}{175.765} \right)^2 = 0.0010851$

จากสมการที่ 2.13
$$R_c = \frac{1}{0.0010851} = 921.622 \Omega/ph$$

จากสมการที่ 2.14

$$R_2 = \left(\frac{3 \times 74.33}{3(2)^2} - 9.797 \right) \left(1 + \frac{13.345}{175.765} \right)^2 - (1)^2 \left((3.336)^2 (0.0010851) \right) = 10.159 \Omega/ph$$

จากการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE Std.112-1996[5] ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบมาตรฐาน ได้ดังนี้



รูปที่ ก.3 วงจรสมมูลต่อเฟสแบบมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า

สำหรับการหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า จำนวนเหมือนกับขนาด 1 แรงม้า ดังนั้นจะไม่แสดงวิธีการคำนวณแต่จะแสดงเฉพาะข้อมูลการทดสอบสำหรับการคำนวณหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์

ข้อมูลหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบ No-load ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า

$V_{in} (V)$			$I_{in} (A)$			$P_{in} (W)$		
V_r	V_s	V_t	I_r	I_s	I_t	P_r	P_s	P_t
220	220	220	2.29	2.32	2.19	120	160	100

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบ Blocked – rotor (ที่ 12.5 Hz) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า

$V_{in} (V)$			$I_{in} (A)$			$P_{in} (W)$		
V_r	V_s	V_t	I_r	I_s	I_t	P_r	P_s	P_t
30.3	30.5	30.7	5.2	5.2	5.2	154	157	161

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบ VI-method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า

$V_{dc} (V)$	2.42	7.52	10.12	12.64	14.61	17.00	22.84	26.3
$I_{dc} (A)$	0.5	1.5	2	2.5	3	3.5	4.5	5.2

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบหา Friction and Windage loss ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 แรงม้า

$V_{in} (V)$	8.2	10	20	60	100	120	140	160	180	200	220
$I_{in} (A)$	0.37	0.52	0.38	0.60	0.91	1.08	1.26	1.46	1.68	1.97	2.42
$P_{in} (W)$	3	6	12	39	75	99	129	159	192	231	309

ข้อมูลหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบ No-load ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 5 แรงม้า

$V_{in} (V)$			$I_{in} (A)$			$P_{in} (W)$		
V_r	V_s	V_t	I_r	I_s	I_t	P_r	P_s	P_t
220	220	220	3.37	3.25	3.60	130	120	150

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบ Blocked – rotor (ที่ 12.5 Hz) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 5 แรงม้า

$V_{in} (V)$			$I_{in} (A)$			$P_{in} (W)$		
V_r	V_s	V_t	I_r	I_s	I_t	P_r	P_s	P_t
29	29.1	29.2	7.9	7.91	7.92	224	225	225

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบ VI-method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 5 แรงม้า

$V_{dc} (V)$	3.23	4.83	6.35	9.55	12.76	16.07	19.44	29.8
$I_{dc} (A)$	1.0	1.5	2.0	3.0	4	5.0	6.0	7.9

ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบหา Friction and Windage loss ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 แรงม้า

$V_{in} (V)$	6	10	20	40	60	80	120	160	200	220
$I_{in} (A)$	0.52	1.07	0.49	0.59	0.79	1.02	1.53	2.11	2.86	3.44
$P_{in} (W)$	3	13	21	28	41	59	102	167	250	310

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณการระบายความร้อนและการสะสมความร้อนของมอเตอร์

ข.1 การคำนวณหาการระบายความร้อนของมอเตอร์

การทดสอบหาการระบายความร้อนของมอเตอร์ (hA) โดยทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่องที่พิกัดภาระทางกล 100% จนอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงที่และถ้าให้มอเตอร์ทำงานจนเวลา $(t) \rightarrow \infty$ สำหรับหัวข้อนี้ต้องการพิสูจน์ให้รู้ถึงการระบายความร้อนของมอเตอร์มีผลไปในแนวทางใดเมื่ออุณหภูมิของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง โดยมีการทดสอบเพิ่มภาระทางกลขึ้นลำดับละ 10 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 100 เปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างการคำนวณ เป็นการยกตัวอย่างการคำนวณการระบายความร้อนของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

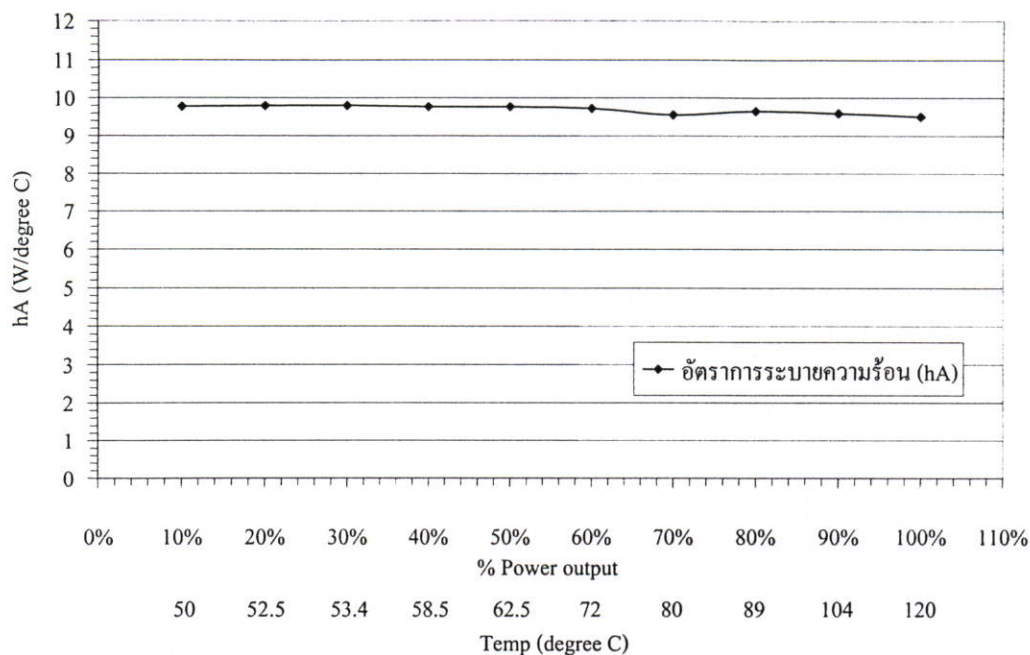
จากสมการที่ (3.6) เมื่อ $(t) \rightarrow \infty$ ดังนั้น
$$hA = \frac{P}{T(t) - T_{\alpha}}$$

ที่พิกัดภาระทางกล 100% กำลังไฟฟ้าสูญเสียสามเฟส $P = 860 \text{ W}$
 อุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ $T(t) = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 อุณหภูมิโดยรอบ $T_{\alpha} = 29.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

แทนค่าเพื่อหาอัตราการระบายความร้อน
$$hA = \frac{860}{120 - 29.5} = 9.5 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

ตารางที่ ข.1 ผลการคำนวณอัตราการระบายความร้อนของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

พิกัดภาระทางกล (%)	อุณหภูมิขดลวด $T(t)$	อุณหภูมิแวดล้อม T_{α}	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (W)	อัตราการระบายความร้อน (hA)
10	50	28.5	210	9.767442
20	52.5	29	230	9.787234
30	53.4	28.9	240	9.795918
40	58.5	28.8	290	9.76431
50	62.5	28.7	330	9.763314
60	72	28.8	420	9.722222
70	80	28.7	490	9.551657
80	89	28.9	580	9.650582
90	104	28.9	720	9.587217
100	120	29.5	860	9.502762



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ของอัตราการระบายความร้อนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

จากตารางที่ ข.1 และรูปที่ ข.1 เป็นผลการทดสอบเพื่อคำนวณหาอัตราการระบายความร้อนของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า โดยการเพิ่มภาระทางกลขึ้นเรื่อยๆตั้งแต่ 10% ถึง 100% ซึ่งเมื่อเพิ่มภาระทางกล อุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าภายในมอเตอร์เพิ่มสูงขึ้น จากการทดสอบและการคำนวณเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการระบายความร้อนของมอเตอร์จะลดลง แต่ลดลงไม่มากนัก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการระบายความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณและลดขั้นตอนของการทดสอบจึงเลือกหาอัตราการระบายความร้อนที่พิกัดภาระทางกล 100% เป็นเกณฑ์

สำหรับการทดสอบหาอัตราการระบายความร้อนของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า และ 3 แรงม้า ปรากฏว่าผลที่ได้นั้นเป็นไปในแนวทางเดียวกับมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ดังนั้นจึงเลือกการทดสอบเพื่อหาอัตราการระบายความร้อนที่พิกัดภาระทางกล 100% เช่นเดียวกัน

ข.2 การคำนวณหาการสะสมความร้อนของมอเตอร์

(H) คือคุณสมบัติการสะสมความร้อนหรือพลังงานที่เก็บสะสมภายในตัวมอเตอร์ ประกอบด้วยพลังงานที่เก็บสะสมขณะขับภาระทางกล ($H_{(heating)}$) และพลังงานที่เก็บสะสมขณะหยุดขับภาระทางกล ($H_{(cooling)}$) ดังนั้นเพื่อความถูกต้องการหาพลังงานที่เก็บสะสมภายในตัวมอเตอร์จำเป็นต้องหาจากการทดสอบเท่านั้น

สำหรับสมการคำนวณหาอัตราการสะสมความร้อนของมอเตอร์ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.3 ดังสมการ (3.13) และ (3.14)

$$H_{(heating)} = - \frac{hA \times t}{\ln \left[\frac{(T(t) \times hA) - (T_{\alpha} \times hA) - P}{P - (hA \times T_0) + (T_{\alpha} \times hA)} \right]} \quad (\text{Joule})$$

$$H_{(cooling)} = - \frac{hA \times t}{\ln \left(\frac{T(t) - T_{\alpha}}{-T_0 + T_{\alpha}} \right)} \quad (\text{Joule})$$

ดังนั้นเมื่อได้ค่าของการสะสมความร้อนทั้งที่มีภาวะทางกลและหยุดชั่วขณะทางกล ค่าที่ได้จากการคำนวณจะแปรผันตามอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนไป ซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น(Non linear) จึงจำเป็นต้องใช้สมการโพลิโนเมียล Polynomial Regression[6] ในการแก้ปัญหา สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรม Maple เป็นตัวช่วยในการคำนวณพลังงานที่สะสมภายในตัวมอเตอร์

ตัวอย่างการใช้โปรแกรม Maple เพื่อใช้ในการหาโพลิโนเมียล

```
> restart:with(stats):with(plots):
> x:=[1 ,2, 3, 4, 5,..... 3995 ,3996 ,3997 ,3998 ,3999 ,4000];
>y:=[ 689.2458819,1100.882977,2260.597212,2393.496332,..... 15775.59077
,15656.31831,15862.84273,15627.99003,15747.96162,15953.95151];
>n:=4000;

n := 4000
```

```
>fit[leastsquare][[X,Y],Y=A0+A1*X+A2*X^2+A3*X^3+A4*X^4+A5*X^5,
{A0,A1,A2,A3,A4,A5}]](x,y);
```

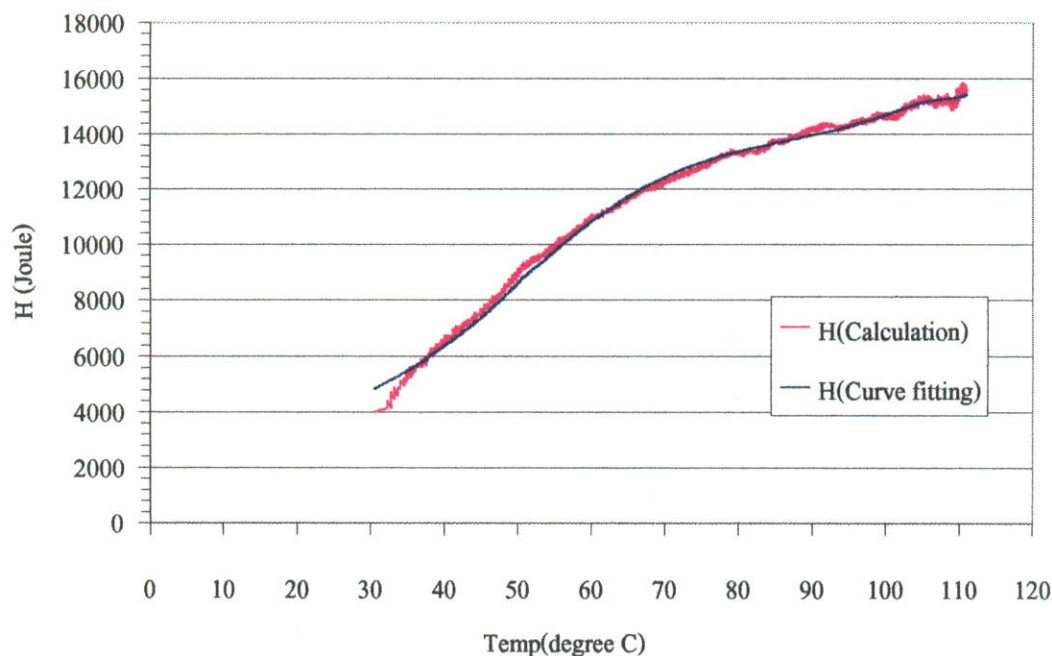
ดังนั้นผลที่ได้เป็นสมการโพลิโนเมียล order 5 ซึ่งเป็น order ที่เหมาะสม เพื่อนำไปคำนวณคุณสมบัติการสะสมความร้อนของมอเตอร์ในขั้นตอนต่อไป

$$Y = 4812.792543 + 19.34813270 X - .01749287151 X^2 + .8088275895 \cdot 10^{-5} X^3 - .1797873505 \cdot 10^{-8} X^4 + .1525002286 \cdot 10^{-12} X^5$$

เมื่อ Y คือ อัตราการสะสมความร้อน มีหน่วยเป็น จูล

X คือ อุณหภูมิของขดลวดมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

เมื่อได้สมการ โพลีโนเมียลเพื่อคำนวณอัตราการสะสมความร้อน สามารถคำนวณอัตราการสะสมความร้อนของมอเตอร์เปรียบเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของมอเตอร์ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ของอัตราการสะสมความร้อนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

จากรูปที่ ข.2 แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราการสะสมความร้อนของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า โดยการใช้สมการ โพลีโนเมียลคำนวณให้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นยิ่งขึ้น จากรูปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการสะสมความร้อนของมอเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงนี้เพื่อคำนวณอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์ต่อไป สำหรับการทดสอบและคำนวณหาอัตราการสะสมความร้อนของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า และ 3 แรงม้า ผลที่ได้นั้นเป็นไปในแนวทางเดียวกับขนาด 5 แรงม้า

ภาคผนวก ค
ผลการทดสอบเมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นคาบเวลา

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มภาระทางกล 10% ถึง 130% ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า

Step	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
Load	220	1.17	0.095	220	1.21	0.083	220	1.24	0.073	0.251	0.075	0.6	1493	0.176	29.721	
10%	220	1.23	0.13	220	1.23	0.11	220	1.24	0.09	0.33	0.149	1	1484	0.181	45.212	
20%	220	1.26	0.14	220	1.25	0.14	220	1.28	0.13	0.41	0.224	1.5	1475	0.186	54.585	
30%	220	1.32	0.17	220	1.32	0.162	220	1.36	0.16	0.492	0.298	2.1	1464	0.194	60.650	
40%	220	1.37	0.2	220	1.38	0.193	220	1.41	0.182	0.575	0.373	2.5	1455	0.202	64.870	
50%	220	1.45	0.23	220	1.45	0.222	220	1.48	0.212	0.664	0.448	3	1442	0.216	67.410	
60%	220	1.56	0.26	220	1.57	0.258	220	1.56	0.24	0.758	0.522	3.6	1429	0.236	68.892	
70%	220	1.69	0.3	220	1.64	0.28	220	1.64	0.27	0.85	0.597	4.1	1420	0.253	70.212	
80%	220	1.79	0.33	220	1.74	0.31	220	1.75	0.302	0.942	0.671	4.6	1408	0.271	71.274	
90%	220	1.93	0.36	220	1.86	0.34	220	1.86	0.338	1.038	0.746	5.2	1396	0.292	71.869	
100%	220	2.09	0.38	220	2.08	0.39	220	2.07	0.38	1.15	0.821	5.7	1377	0.329	71.357	
110%	220	2.25	0.43	220	2.22	0.44	220	2.2	0.42	1.2855	0.895	6.3	1356	0.390	69.638	
120%	220	2.47	0.49	220	2.38	0.47	220	2.36	0.46	1.42	0.970	7	1332	0.450	68.296	

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มภาระทางกล 10% ถึง 130% ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า

Step Load	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
10%	220	2.35	0.204	220	2.35	0.205	220	2.24	0.19	0.599	0.224	1.5	1492	0.375	37.362	
20%	220	2.45	0.27	220	2.54	0.295	220	2.37	0.26	0.825	0.448	3	1485	0.377	54.255	
30%	220	2.71	0.365	220	2.65	0.355	220	2.53	0.34	1.06	0.671	4.4	1477	0.389	63.340	
40%	220	2.94	0.446	220	2.9	0.445	220	2.75	0.42	1.311	0.895	6	1466	0.416	68.284	
50%	220	3.17	0.53	220	3.18	0.51	220	3.06	0.52	1.56	1.119	7.5	1457	0.441	71.731	
60%	220	3.52	0.61	220	3.42	0.595	220	3.35	0.6	1.805	1.343	8.9	1449	0.462	74.393	
70%	220	3.88	0.7	220	3.75	0.66	220	3.77	0.71	2.07	1.567	10.6	1438	0.503	75.681	
80%	220	4.19	0.79	220	4.11	0.76	220	4.08	0.79	2.34	1.790	12.2	1429	0.550	76.513	
90%	220	4.61	0.88	220	4.58	0.86	220	4.54	0.89	2.63	2.014	13.7	1415	0.616	76.586	
100%	220	5.01	0.97	220	5.11	0.98	220	4.9	0.97	2.92	2.238	15.2	1401	0.682	76.644	
110%	220	5.65	1.13	220	5.46	1.07	220	5.37	1.04	3.242	2.462	17	1390	0.780	75.935	
120%	220	6.16	1.24	220	5.81	1.17	220	5.73	1.13	3.536	2.686	18.8	1375	0.850	75.950	
130%	220	6.59	1.32	220	6.51	1.29	220	6.36	1.26	3.869	2.909	20.5	1365	0.960	75.198	

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มภาระทางกล 10% ถึง 130% ของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

Step	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
Load	220	3.71	0.215	220	3.42	0.25	220	3.35	0.19	0.655	0.373	2.4	1496	0.282	56.947	
10%	220	3.72	0.295	220	3.77	0.42	220	3.7	0.33	1.045	0.746	4.9	1487	0.299	71.388	
20%	220	4.06	0.435	220	4.05	0.55	220	3.93	0.45	1.435	1.119	7.3	1479	0.316	77.979	
30%	220	4.37	0.57	220	4.44	0.7	220	4.29	0.58	1.85	1.492	9.8	1470	0.358	80.649	
40%	220	4.73	0.7	220	4.84	0.81	220	4.87	0.77	2.28	1.865	12.4	1459	0.415	81.798	
50%	220	5.24	0.85	220	5.46	0.98	220	5.28	0.9	2.73	2.238	14.9	1448	0.492	81.978	
60%	220	5.84	1.01	220	6.13	1.15	220	5.81	1.04	3.2	2.611	17.6	1439	0.589	81.594	
70%	220	6.49	1.18	220	6.72	1.3	220	6.48	1.2	3.68	2.984	20.1	1427	0.696	81.087	
80%	220	7.15	1.35	220	7.43	1.45	220	7.27	1.4	4.2	3.357	22.8	1414	0.843	79.929	
90%	220	7.98	1.55	220	8.25	1.64	220	7.85	1.53	4.72	3.730	25.5	1402	0.990	79.025	
100%	220	8.82	1.70	220	9.35	1.9	220	8.64	1.70	5.298	4.103	28	1388	1.195	77.444	
110%	220	9.8	1.84	220	10.07	2.06	220	10.15	1.98	5.88	4.476	31.3	1375	1.404	76.122	
120%	220	10.5	2.10	220	10.7	2.18	220	10.48	2.12	6.4	4.849	34.6	1360	1.551	75.766	

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ด้วตีไซ้เกิด 50%, ภาระทางกล 110%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
300	220	2.09	0.38	220	2.07	0.38	220	2.05	0.37	1.13	0.821	5.7	1398	0.309	72.619	
900	220	2.1	0.38	220	2.09	0.39	220	2.08	0.38	1.15	0.821	5.7	1394	0.329	71.357	
1500	220	2.09	0.38	220	2.11	0.4	220	2.07	0.38	1.16	0.821	5.7	1392	0.339	70.741	
2100	220	2.09	0.38	220	2.09	0.39	220	2.07	0.38	1.15	0.821	5.7	1388	0.329	71.357	
2700	220	2.09	0.38	220	2.09	0.39	220	2.07	0.38	1.15	0.821	5.7	1387	0.329	71.357	
3300	220	2.08	0.39	220	2.1	0.39	220	2.07	0.38	1.16	0.821	5.8	1386	0.339	70.741	
3900	220	2.1	0.38	220	2.09	0.39	220	2.07	0.38	1.15	0.821	5.8	1386	0.329	71.357	
4500	220	2.1	0.38	220	2.11	0.4	220	2.07	0.38	1.16	0.821	5.8	1383	0.339	70.741	
5100	220	2.09	0.39	220	2.11	0.4	220	2.6	0.38	1.17	0.821	5.8	1380	0.349	70.137	
5700	220	2.08	0.39	220	2.11	0.4	220	2.08	0.38	1.17	0.821	5.8	1383	0.349	70.137	
6300	220	2.08	0.38	220	2.09	0.39	220	2.06	0.38	1.15	0.821	5.8	1384	0.329	71.357	
6900	220	2.09	0.39	220	2.09	0.39	220	2.06	0.38	1.16	0.821	5.8	1384	0.339	70.741	
7500	220	2.11	0.39	220	2.11	0.39	220	2.05	0.38	1.16	0.821	5.8	1384	0.339	70.741	
8100	220	2.11	0.39	220	2.1	0.39	220	2.05	0.38	1.16	0.821	5.8	1380	0.339	70.741	

ตารางที่ ค.4 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
8700	220	2.11	0.38	220	2.12	0.39	220	2.06	0.38	1.15	0.821	5.8	1380	0.329	71.357	
9300	220	2.1	0.38	220	2.09	0.39	220	2.07	0.38	1.15	0.821	5.8	1380	0.329	71.357	
9900	220	2.11	0.39	220	2.08	0.39	220	2.1	0.38	1.16	0.821	5.8	1380	0.339	70.741	
10500	220	2.09	0.39	220	2.08	0.39	220	2.08	0.38	1.16	0.821	5.8	1380	0.339	70.741	

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ตัวสี่เหลี่ยม 50%, ภาระทางกล 130%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
300	220	2.44	0.48	220	2.36	0.45	220	2.36	0.45	1.38	0.970	6.9	1374	0.410	70.275	
900	220	2.43	0.47	220	2.38	0.46	220	2.38	0.46	1.39	0.970	6.9	1363	0.420	69.770	
1500	220	2.41	0.47	220	2.39	0.46	220	2.41	0.47	1.4	0.970	6.9	1361	0.430	69.271	
2100	220	2.45	0.48	220	2.42	0.47	220	2.4	0.47	1.42	0.970	7	1350	0.450	68.296	
2700	220	2.44	0.48	220	2.43	0.48	220	2.41	0.47	1.43	0.970	7	1347	0.460	67.818	
3300	220	2.45	0.48	220	2.43	0.48	220	2.39	0.46	1.42	0.970	7	1340	0.450	68.296	
3900	220	2.45	0.48	220	2.41	0.47	220	2.42	0.47	1.42	0.970	7	1337	0.450	68.296	
4500	220	2.45	0.48	220	2.44	0.48	220	2.42	0.47	1.43	0.970	7	1336	0.460	67.818	
5100	220	2.43	0.48	220	2.43	0.48	220	2.44	0.48	1.44	0.970	7	1334	0.470	67.347	
5700	220	2.43	0.48	220	2.42	0.47	220	2.42	0.48	1.43	0.970	7	1333	0.460	67.818	
6300	220	2.49	0.49	220	2.45	0.48	220	2.45	0.48	1.45	0.970	7.1	1330	0.480	66.883	
6900	220	2.45	0.49	220	2.41	0.47	220	2.4	0.47	1.43	0.970	7	1332	0.460	67.818	

ตารางที่ ค.5 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
7500	220	2.44	0.47	220	2.4	0.47	220	2.42	0.48	1.42	0.970	7	1331	0.450	68.296	
8100	220	2.43	0.47	220	2.42	0.48	220	2.42	0.48	1.43	0.970	7	1332	0.460	67.818	
8700	220	2.42	0.48	220	2.4	0.47	220	2.42	0.47	1.42	0.970	7	1333	0.450	68.296	
9300	220	2.49	0.48	220	2.41	0.47	220	2.4	0.47	1.42	0.970	7	1333	0.450	68.296	
9900	220	2.43	0.47	220	2.39	0.47	220	2.42	0.47	1.41	0.970	7	1333	0.440	68.780	
10500	220	2.45	0.48	220	2.39	0.47	220	2.41	0.47	1.42	0.970	7	1333	0.450	68.296	
11100	220	2.43	0.48	220	2.39	0.47	220	2.43	0.48	1.43	0.970	7	1333	0.460	67.818	
11700	220	2.42	0.48	220	2.44	0.48	220	2.41	0.47	1.43	0.970	7	1332	0.460	67.818	
12300	220	2.45	0.48	220	2.41	0.47	220	2.43	0.48	1.43	0.970	7	1332	0.460	67.818	

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, ด้วตีไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
150	220	2.1	0.38	220	2.08	0.38	220	2.01	0.36	1.12	0.821	5.7	1408	0.299	73.268	
450	220	2.08	0.38	220	2.07	0.38	220	2.03	0.37	1.13	0.821	5.7	1402	0.309	72.619	
750	220	2.09	0.38	220	2.08	0.38	220	2.08	0.38	1.14	0.821	5.7	1398	0.319	71.982	
1050	220	2.1	0.39	220	2.08	0.38	220	2.02	0.37	1.14	0.821	5.7	1393	0.319	71.982	
1350	220	2.07	0.37	220	2.08	0.38	220	2.03	0.37	1.12	0.821	5.7	1393	0.299	73.268	
1650	220	2.09	0.38	220	2.08	0.39	220	2.07	0.38	1.15	0.821	5.7	1393	0.329	71.357	
1950	220	2.1	0.39	220	2.12	0.39	220	2.11	0.37	1.15	0.821	5.8	1386	0.329	71.357	
2250	220	2.08	0.38	220	2.08	0.39	220	2.06	0.39	1.16	0.821	5.8	1388	0.339	70.741	
2550	220	2.11	0.39	220	2.09	0.39	220	2.07	0.38	1.16	0.821	5.8	1387	0.339	70.741	
2850	220	2.14	0.42	220	2.1	0.39	220	2.07	0.38	1.19	0.821	5.8	1384	0.369	68.958	
3150	220	2.13	0.40	220	2.1	0.39	220	2.08	0.38	1.17	0.821	5.8	1386	0.349	70.137	
3450	220	2.12	0.4	220	2.08	0.39	220	2.1	0.39	1.18	0.821	5.8	1384	0.359	69.542	
3750	220	2.14	0.40	220	2.1	0.38	220	2.07	0.38	1.16	0.821	5.8	1383	0.339	70.741	
4050	220	2.14	0.40	220	2.08	0.39	220	2.08	0.38	1.17	0.821	5.8	1382	0.349	70.137	

ตารางที่ ค.6 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)	Pin (kW)					
4350	220	2.1	0.39	220	2.1	0.39	220	2.08	0.38	1.16	0.821	5.8	1382	0.339	70.741
4650	220	2.12	0.4	220	2.1	0.39	220	2.09	0.39	1.18	0.821	5.8	1382	0.359	69.542
4950	220	2.12	0.4	220	2.12	0.39	220	2.1	0.39	1.18	0.821	5.8	1382	0.359	69.542
5250	220	2.12	0.4	220	2.09	0.39	220	2.07	0.38	1.17	0.821	5.8	1382	0.349	70.137
5550	220	2.09	0.39	220	2.08	0.39	220	2.08	0.38	1.16	0.821	5.8	1379	0.339	70.741
5850	220	2.11	0.4	220	2.1	0.39	220	2.08	0.39	1.18	0.821	5.8	1380	0.359	69.542
6150	220	2.13	0.4	220	2.08	0.39	220	2.1	0.38	1.17	0.821	5.8	1380	0.349	70.137
6450	220	2.13	0.39	220	2.07	0.39	220	2.1	0.39	1.17	0.821	5.8	1380	0.349	70.137
6750	220	2.09	0.39	220	2.09	0.39	220	2.07	0.38	1.16	0.821	5.8	1380	0.339	70.741
7050	220	2.09	0.4	220	2.11	0.39	220	2.08	0.39	1.18	0.821	5.8	1379	0.359	69.542
7350	220	2.1	0.40	220	2.11	0.39	220	2.07	0.39	1.18	0.821	5.8	12379	0.359	69.542
7650	220	2.13	0.39	220	2.09	0.39	220	2.1	0.39	1.17	0.821	5.8	1378	0.349	70.137
7950	220	2.08	0.39	220	2.09	0.39	220	2.09	0.39	1.17	0.821	5.8	1378	0.349	70.137
8250	220	2.11	0.39	220	2.08	0.39	220	2.05	0.39	1.17	0.821	5.8	1380	0.349	70.137

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
450	220	2.08	0.38	220	2.12	0.39	220	2.1	0.39	1.16	0.821	5.7	1398	0.339	70.741	
1350	220	2.08	0.38	220	2.08	0.39	220	2.09	0.39	1.16	0.821	5.7	1391	0.339	70.741	
2250	220	2.1	0.39	220	2.12	0.4	220	2.06	0.38	1.17	0.821	5.8	1386	0.349	70.137	
3150	220	2.14	0.39	220	2.12	0.4	220	2.09	0.38	1.17	0.821	5.8	1384	0.349	70.137	
4050	220	2.14	0.4	220	2.07	0.38	220	2.08	0.38	1.16	0.821	5.8	1385	0.339	70.741	
4950	220	2.1	0.38	220	2.09	0.39	220	2.08	0.38	1.15	0.821	5.8	1382	0.329	71.357	
5850	220	2.14	0.41	220	2.09	0.39	220	2.07	0.38	1.18	0.821	5.8	1381	0.359	69.542	
6750	220	2.13	0.4	220	2.06	0.38	220	2.07	0.38	1.16	0.821	5.8	132	0.339	70.741	
7650	220	2.16	0.41	220	2.11	0.38	220	2.09	0.38	1.17	0.821	5.8	1377	0.349	70.137	
8550	220	2.14	0.4	220	2.07	0.38	220	2.11	0.38	1.16	0.821	5.8	1378	0.339	70.741	
9450	220	2.15	0.41	220	2.05	0.38	220	2.07	0.38	1.17	0.821	5.8	1379	0.349	70.137	
10350	220	2.12	0.4	220	2.05	0.38	220	2.08	0.38	1.16	0.821	5.8	1380	0.339	70.741	
11250	220	2.16	0.41	220	2.06	0.38	220	2.07	0.38	1.17	0.821	5.8	1380	0.349	70.137	

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ตัวใช้เคล็ด 50%, ภาระทางกล 120%

Time (sec)	Input										Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)	Pin (kW)					
300	220	2.18	0.41	220	2.15	0.4	220	2.14	0.4	1.21	0.895	6.3	1390	0.315	73.983
900	220	2.21	0.42	220	2.15	0.4	220	2.14	0.4	1.22	0.895	6.3	1377	0.325	73.377
1500	220	2.16	0.41	220	2.14	0.4	220	2.15	0.41	1.22	0.895	6.3	1373	0.325	73.377
2100	220	2.21	0.42	220	2.14	0.4	220	2.14	0.4	1.22	0.895	6.3	1370	0.325	73.377
2700	220	2.21	0.42	220	2.17	0.41	220	2.18	0.41	1.24	0.895	6.3	1368	0.345	72.194
3300	220	2.17	0.41	220	2.13	0.41	220	2.16	0.41	1.23	0.895	6.3	1366	0.335	72.780
3900	220	2.2	0.42	220	2.14	0.41	220	2.14	0.41	1.24	0.895	6.3	1366	0.345	72.194
4500	220	2.2	0.42	220	2.17	0.41	220	2.15	0.41	1.24	0.895	6.3	1366	0.345	72.194
5100	220	2.19	0.42	220	2.14	0.41	220	2.14	0.41	1.24	0.895	6.3	1366	0.345	72.194
5700	220	2.19	0.42	220	2.15	0.41	220	2.18	0.42	1.25	0.895	6.3	1363	0.355	71.616
6300	220	2.2	0.42	220	2.16	0.41	220	2.16	0.41	1.24	0.895	6.3	1362	0.345	72.194
6900	220	2.17	0.42	220	2.13	0.41	220	2.16	0.41	1.24	0.895	6.3	1364	0.345	72.194
7500	220	2.18	0.43	220	2.1	0.39	220	2.13	0.4	1.22	0.895	6.3	1362	0.325	73.377
8100	220	2.16	0.42	220	2.13	0.41	220	2.16	0.41	1.24	0.895	6.3	1362	0.345	72.194

ตารางที่ ค.8 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
8700	220	2.16	0.41	220	2.16	0.41	220	2.16	0.41	0.41	1.23	0.895	6.3	1362	0.335	72.780
9300	220	2.16	0.42	220	2.16	0.41	220	2.16	0.41	0.41	1.24	0.895	6.3	1361	0.345	72.194
9900	220	2.17	0.42	220	2.14	0.41	220	2.14	0.41	0.41	1.24	0.895	6.3	1362	0.345	72.194
10500	220	2.14	0.41	220	2.13	0.4	220	2.17	0.41	0.41	1.22	0.895	6.3	1361	0.325	73.377
11100	220	2.18	0.42	220	2.13	0.4	220	2.16	0.41	0.41	1.23	0.895	6.3	1361	0.335	72.780
11700	220	2.15	0.41	220	2.15	0.41	220	2.15	0.41	0.41	1.23	0.895	6.3	1363	0.335	72.780
12300	220	2.13	0.41	220	2.2	0.4	220	2.14	0.41	0.41	1.22	0.895	6.3	1361	0.325	73.377

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ตัวใช้เคล็ด 80%, ภาระทางกล 120%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
480	220	2.18	0.43	220	2.15	0.4	220	2.21	0.42	1.25	0.895	6.2	1382	0.355	71.616	
1080	220	2.21	0.43	220	2.15	0.4	220	2.21	0.42	1.25	0.895	6.3	1371	0.355	71.616	
1680	220	2.18	0.42	220	2.18	0.41	220	2.21	0.42	1.25	0.895	6.3	1364	0.355	71.616	
2280	220	2.2	0.43	220	2.14	0.41	220	2.2	0.42	1.26	0.895	6.3	1359	0.365	71.048	
2880	220	2.18	0.42	220	2.16	0.41	220	2.19	0.42	1.25	0.895	6.3	1356	0.355	71.616	
3480	220	2.15	0.42	220	2.17	0.41	220	2.16	0.41	1.24	0.895	6.3	1356	0.345	72.194	
4080	220	2.2	0.43	220	2.15	0.41	220	2.2	0.43	1.27	0.895	6.3	1354	0.375	70.488	
4680	220	2.19	0.43	220	2.16	0.41	220	2.22	0.43	1.27	0.895	6.3	1350	0.375	70.488	
5280	220	2.17	0.43	220	2.17	0.41	220	2.18	0.42	1.26	0.895	6.3	1349	0.365	71.048	
5880	220	2.17	0.43	220	2.18	0.42	220	2.2	0.42	1.27	0.895	6.3	1348	0.375	70.488	
6480	220	2.2	0.43	220	2.18	0.42	220	2.17	0.41	1.26	0.895	6.3	1348	0.365	71.048	
7080	220	2.18	0.43	220	2.16	0.41	220	2.18	0.42	1.26	0.895	6.4	1347	0.365	71.048	
7680	220	2.21	0.43	220	2.14	0.41	220	2.19	0.42	1.26	0.895	6.4	1347	0.365	71.048	
8280	220	2.23	0.43	220	2.19	0.42	220	2.22	0.42	1.27	0.895	6.4	1346	0.375	70.488	

ตารางที่ ค.9 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
8880	220	2.22	0.44	220	2.22	0.43	220	2.2	0.42	1.29	0.895	6.4	1346	0.395	69.395	
9480	220	2.18	0.44	220	2.22	0.43	220	2.23	0.43	1.3	0.895	6.4	1345	0.405	68.862	
10080	220	2.15	0.42	220	2.15	0.41	220	2.2	0.43	1.26	0.895	6.4	1344	0.365	71.048	
10680	220	2.22	0.44	220	2.12	0.41	220	2.22	0.42	1.27	0.895	6.4	1344	0.375	70.488	

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, คิวที่ไหลเกิด 50%, ภาระทางกล 110%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
300	220	5.69	1.09	220	5.45	1.04	220	5.43	1.01	3.14	2.462	16.8	1415	0.678	78.401	
900	220	5.71	1.11	220	5.47	1.06	220	5.45	1.03	3.2	2.462	16.8	1413	0.738	76.931	
1500	220	5.65	1.1	220	5.43	1.06	220	5.48	1.04	3.2	2.462	16.9	1407	0.738	76.931	
2100	220	5.68	1.1	220	5.61	1.09	220	5.34	1.01	3.2	2.462	16.9	1406	0.738	76.931	
2700	220	5.84	1.15	220	5.66	1.11	220	5.42	1.04	3.3	2.462	16.9	1403	0.838	74.600	
3300	220	5.73	1.12	220	5.59	1.09	220	5.41	1.04	3.25	2.462	16.9	1399	0.788	75.748	
3900	220	5.64	1.1	220	5.48	1.07	220	5.44	1.04	3.21	2.462	16.9	1399	0.748	76.692	
4500	220	5.73	1.13	220	5.6	1.1	220	5.37	1.02	3.25	2.462	17	1398	0.788	75.748	
5100	220	5.71	1.13	220	5.54	1.08	220	5.39	1.04	3.25	2.462	17	1397	0.788	75.748	
5700	220	5.65	1.11	220	5.62	1.1	220	5.39	1.04	3.25	2.462	17	1396	0.788	75.748	
6300	220	5.66	1.11	220	5.67	1.11	220	5.46	1.06	3.28	2.462	17	1395	0.818	75.055	
6900	220	5.73	1.11	220	5.66	1.11	220	5.46	1.06	3.28	2.462	17	1396	0.818	75.055	
7500	220	5.77	1.13	220	5.6	1.1	220	5.46	1.06	3.29	2.462	17	1394	0.828	74.827	
8100	220	5.65	1.10	220	5.65	1.1	220	5.47	1.07	3.27	2.462	17	1395	0.808	75.284	

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 130%

Time (sec)	Input										Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)	Pin (kW)					
300	220	6.41	1.27	220	6.42	1.23	220	6.44	1.28	3.78	2.909	20.1	1397	0.871	76.968
900	220	6.44	1.28	220	6.45	1.24	220	6.52	1.3	3.82	2.909	20.1	1387	0.911	76.162
1500	220	6.42	1.28	220	6.47	1.24	220	6.56	1.31	3.83	2.909	20.3	1376	0.921	75.963
2100	220	6.48	1.28	220	6.49	1.28	220	6.59	1.32	3.88	2.909	20.4	1373	0.971	74.985
2700	220	6.52	1.29	220	6.49	1.28	220	6.59	1.32	3.89	2.909	20.5	1366	0.981	74.792
3300	220	6.62	1.32	220	6.48	1.28	220	6.68	1.34	3.94	2.909	20.5	1363	1.031	73.843
3900	220	6.53	1.3	220	6.56	1.29	220	6.64	1.33	3.92	2.909	20.6	1356	1.011	74.219
4500	220	6.66	1.33	220	6.52	1.29	220	6.7	1.35	3.97	2.909	20.7	1354	1.061	73.285
5100	220	6.74	1.34	220	6.61	1.29	220	6.66	1.33	3.96	2.909	20.7	1353	1.051	73.470

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
150	220	5.71	1.11	220	5.62	1.07	220	5.46	1.04	3.22	2.462	16.8	1418	0.758	76.453	
450	220	5.73	1.11	220	5.52	1.07	220	5.35	1.02	3.2	2.462	16.8	1415	0.738	76.931	
750	220	5.73	1.12	220	5.58	1.08	220	5.31	1.01	3.21	2.462	16.8	1411	0.748	76.692	
1050	220	5.78	1.13	220	5.51	1.07	220	5.42	1.04	3.24	2.462	16.9	1409	0.778	75.981	
1350	220	5.73	1.12	220	5.51	1.07	220	5.4	1.04	3.23	2.462	16.9	1407	0.768	76.217	
1650	220	5.67	1.11	220	5.57	1.09	220	5.39	1.03	3.23	2.462	16.9	1405	0.768	76.217	
1950	220	5.68	1.11	220	5.51	1.07	220	5.46	1.05	3.23	2.462	16.9	1403	0.768	76.217	
2250	220	5.74	1.12	220	5.55	1.08	220	5.34	1.02	3.22	2.462	16.9	1402	0.758	76.453	
2550	220	5.76	1.13	220	5.54	1.07	220	5.34	1.02	3.22	2.462	16.9	1401	0.758	76.453	
2850	220	5.68	1.11	220	5.53	1.07	220	5.36	1.03	3.21	2.462	16.9	1400	0.748	76.692	
3150	220	5.76	1.13	220	5.53	1.07	220	5.21	1.00	3.2	2.462	16.9	1400	0.738	76.931	
3450	220	5.67	1.11	220	5.57	1.10	220	5.38	1.03	3.24	2.462	16.9	1399	0.778	75.981	
3750	220	5.66	1.11	220	5.53	1.08	220	5.42	1.04	3.23	2.462	16.9	1399	0.768	76.217	
4050	220	5.74	1.13	220	5.54	1.09	220	5.45	1.05	3.27	2.462	16.9	1396	0.808	75.284	

ตารางที่ ค.12 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	V _r (V)	I _r (A)	P _r (kW)	V _s (V)	I _s (A)	P _s (kW)	V _t (V)	I _t (A)	P _t (kW)	P _{in} (kW)					
4350	220	5.69	1.12	220	5.5	1.06	220	5.53	1.07	3.25	2.462	17	1396	0.788	75.748
4650	220	5.69	1.11	220	5.58	1.06	220	5.31	1.03	3.2	2.462	17	1395	0.738	76.931
4950	220	5.72	1.12	220	5.63	1.11	220	5.37	1.03	3.26	2.462	17	1394	0.798	75.515
5250	220	5.63	1.1	220	5.61	1.1	220	5.41	1.04	3.24	2.462	17	1395	0.778	75.981
5550	220	5.68	1.11	220	5.57	1.09	220	5.41	1.04	3.24	2.462	17	1394	0.778	75.981
5850	220	5.71	1.13	220	5.58	1.09	220	5.34	1.02	3.24	2.462	17	1394	0.778	75.981
6150	220	5.84	1.16	220	5.51	1.08	220	5.36	1.03	3.27	2.462	17	1394	0.808	75.284
6450	220	5.81	1.14	220	5.46	1.08	220	5.3	1.02	3.24	2.462	17	1394	0.778	75.981
6750	220	5.75	1.14	220	5.54	1.09	220	5.32	1.01	3.24	2.462	17	1394	0.778	75.981
7050	220	5.75	1.13	220	5.57	1.09	220	5.36	1.03	3.25	2.462	17	1393	0.788	75.748
7350	220	5.65	1.10	220	5.54	1.09	220	5.42	1.05	3.24	2.462	17	1393	0.778	75.981
7650	220	5.72	1.13	220	5.64	1.10	220	5.57	1.08	3.31	2.462	17	1392	0.848	74.375
7950	220	5.79	1.14	220	5.46	1.06	220	5.47	1.06	3.26	2.462	17	1393	0.798	75.515
8250	220	5.76	1.13	220	5.55	1.09	220	5.46	1.06	3.28	2.462	17	1392	0.818	75.055

ตารางที่ ค.12 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
8550	220	5.73	1.14	220	5.51	1.08	220	5.42	1.05	3.27	2.462	17	1392	0.808	75.284	
8850	220	5.73	1.13	220	5.53	1.08	220	5.45	1.05	3.26	2.462	17	1391	0.798	75.515	
9150	220	5.78	1.15	220	5.52	1.07	220	5.42	1.04	3.26	2.462	17	1391	0.798	75.515	
9450	220	5.71	1.13	220	5.49	1.06	220	5.39	1.04	3.23	2.462	17	1392	0.768	76.217	
9750	220	5.72	1.14	220	5.5	1.06	220	5.47	1.06	3.26	2.462	17	1391	0.798	75.515	
10050	220	5.67	1.12	220	5.44	1.07	220	5.46	1.06	3.25	2.462	17	1392	0.788	75.748	
10350	220	5.65	1.11	220	5.47	1.07	220	5.56	1.08	3.26	2.462	17	1391	0.798	75.515	

ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
450	220	5.72	1.13	220	5.62	1.1	220	5.47	1.04	3.27	2.462	16.9	1417	0.808	75.284	
1350	220	5.69	1.13	220	5.46	1.07	220	5.45	1.05	3.25	2.462	16.9	1406	0.788	75.748	
2250	220	5.66	1.12	220	5.42	1.07	220	5.31	1.02	3.21	2.462	16.9	1402	0.748	76.692	
3150	220	5.71	1.14	220	5.64	1.11	220	5.38	1.04	3.29	2.462	17	1397	0.828	74.827	
4050	220	5.72	1.13	220	5.58	1.1	220	5.38	1.04	3.27	2.462	17	1396	0.808	75.284	
4950	220	5.64	1.12	220	5.54	1.09	220	5.37	1.06	3.27	2.462	17	1391	0.808	75.284	
5850	220	5.67	1.13	220	5.56	1.09	220	5.37	1.05	3.27	2.462	17	1390	0.808	75.284	
6750	220	5.65	1.13	220	5.46	1.07	220	5.37	1.04	3.24	2.462	17	1390	0.778	75.981	
7650	220	5.74	1.14	220	5.51	1.09	220	5.42	1.06	3.29	2.462	17	1390	0.828	74.827	
8550	220	5.72	1.14	220	5.51	1.09	220	5.41	1.06	3.29	2.462	17	1390	0.828	74.827	
9450	220	5.62	1.12	220	5.56	1.11	220	5.47	1.07	3.3	2.462	17	1393	0.838	74.600	
10350	220	5.62	1.11	220	5.49	1.09	220	5.45	1.06	3.26	2.462	17	1390	0.798	75.515	
11250	220	5.62	1.11	220	5.49	1.09	220	5.36	1.04	3.24	2.462	17	1390	0.778	75.981	

ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 120%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
300	220	6.27	1.24	220	5.88	1.16	220	5.66	1.1	3.5	2.686	18.4	1403	0.814	76.731	
900	220	6.15	1.23	220	5.87	1.16	220	5.68	1.1	3.49	2.686	18.5	1394	0.804	76.951	
1500	220	6.15	1.24	220	5.83	1.17	220	5.69	1.11	3.52	2.686	18.5	1392	0.834	76.295	
2100	220	6.15	1.24	220	5.83	1.17	220	5.76	1.13	3.54	2.686	18.6	1385	0.854	75.864	
2700	220	6.15	1.24	220	5.85	1.17	220	5.76	1.13	3.54	2.686	18.7	1384	0.854	75.864	
3300	220	6.18	1.25	220	5.96	1.19	220	5.68	1.12	3.56	2.686	18.7	1382	0.874	75.438	
3900	220	6.18	1.25	220	5.97	1.19	220	5.68	1.12	3.56	2.686	18.8	1378	0.874	75.438	
4500	220	6.19	1.25	220	6.01	1.21	220	5.81	1.15	3.61	2.686	18.8	1377	0.924	74.393	
5100	220	6.26	1.26	220	5.91	1.18	220	5.81	1.15	3.59	2.686	18.8	1377	0.904	74.808	
5700	220	6.23	1.26	220	5.99	1.2	220	5.78	1.14	3.6	2.686	18.8	1376	0.914	74.600	
6300	220	6.19	1.25	220	5.92	1.18	220	5.79	1.14	3.57	2.686	18.8	1374	0.884	75.227	
6900	220	6.16	1.24	220	6	1.21	220	5.84	1.15	3.6	2.686	18.8	1374	0.914	74.600	
7500	220	6.12	1.23	220	5.92	1.15	220	5.82	1.13	3.51	2.686	18.8	1375	0.824	76.513	
8100	220	6.14	1.24	220	5.84	1.14	220	5.83	1.13	3.51	2.686	18.8	1375	0.824	76.513	

ตารางที่ ค.14 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
8700	220	6.12	1.23	220	5.88	1.14	220	5.8	1.13	3.5	2.686	18.8	1374	0.814	76.731	
9300	220	6.12	1.23	220	5.88	1.15	220	5.8	1.13	3.51	2.686	18.8	1373	0.824	76.513	
9900	220	6.14	1.23	220	5.91	1.15	220	5.78	1.13	3.51	2.686	18.8	1374	0.824	76.513	
10500	220	6.16	1.24	220	5.72	1.12	220	5.81	1.14	3.5	2.686	18.8	1375	0.814	76.731	
11100	220	6.17	1.24	220	5.82	1.14	220	5.71	1.12	3.5	2.686	18.8	1372	0.814	76.731	
11700	220	6	1.2	220	5.8	1.13	220	5.81	1.14	3.47	2.686	18.8	1374	0.784	77.395	

ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 80%, ภาระทางกล 120%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
480	220	6.12	1.22	220	5.96	1.15	220	5.69	1.08	3.45	2.686	18.5	1399	0.764	77.843	
1080	220	6.12	1.22	220	5.82	1.12	220	5.62	1.08	3.42	2.686	18.5	1391	0.734	78.526	
1680	220	6.12	1.22	220	5.88	1.14	220	5.78	1.11	3.47	2.686	18.6	1383	0.784	77.395	
2280	220	5.99	1.21	220	5.8	1.12	220	5.88	1.14	3.47	2.686	18.6	1382	0.784	77.395	
2880	220	6.09	1.24	220	5.88	1.15	220	5.92	1.15	3.54	2.686	18.6	1372	0.854	75.864	
3480	220	6.08	1.23	220	5.92	1.16	220	5.93	1.16	3.55	2.686	18.6	1368	0.864	75.651	

ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
180	220	8.76	1.65	220	8.87	1.76	220	8.6	1.66	5.07	4.103	27.8	1426	0.967	80.927	
780	220	8.72	1.66	220	9.22	1.85	220	8.62	1.67	5.18	4.103	27.8	1421	1.077	79.208	
1380	220	8.74	1.67	220	9.26	1.88	220	8.67	1.7	5.25	4.103	28	1413	1.147	78.152	
1980	220	8.77	1.68	220	9.37	1.89	220	8.7	1.7	5.27	4.103	28	1412	1.167	77.856	
2580	220	8.65	1.65	220	9.28	1.88	220	8.8	1.73	5.26	4.103	28	1406	1.157	78.004	
3180	220	8.82	1.69	220	9.35	1.9	220	8.64	1.7	5.29	4.103	28	1406	1.187	77.561	
3780	220	8.75	1.69	220	9.35	1.89	220	8.69	1.7	5.28	4.103	28	1406	1.177	77.708	
4380	220	8.86	1.7	220	9.35	1.88	220	8.71	1.71	5.29	4.103	28	1403	1.187	77.561	
4980	220	8.75	1.68	220	9.36	1.89	220	8.7	1.71	5.28	4.103	28.2	1400	1.177	77.708	
5580	220	8.81	1.7	220	9.38	1.9	220	8.68	1.7	5.3	4.103	28	1403	1.197	77.415	
6180	220	8.79	1.70	220	9.4	1.9	220	8.82	1.73	5.33	4.103	28.2	1400	1.227	76.979	
6780	220	8.69	1.68	220	9.17	1.85	220	8.7	1.70	5.23	4.103	28	1402	1.127	78.451	
7380	220	8.83	1.70	220	9.33	1.89	220	8.72	1.71	5.3	4.103	28.2	1400	1.197	77.415	
7980	220	8.7	1.68	220	9.3	1.88	220	8.85	1.75	5.31	4.103	28.2	1400	1.207	77.269	

ตารางที่ ค.16 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
8580	220	8.9	1.73	220	9.42	1.9	220	8.69	1.71	5.34	4.103	28.2	1397	1.237	76.835	
9180	220	8.81	1.7	220	9.3	1.88	220	8.73	1.7	5.28	4.103	28.2	1397	1.177	77.708	
9780	220	8.75	1.69	220	9.35	1.88	220	8.75	1.72	5.29	4.103	28.2	1397	1.187	77.561	
10380	220	8.8	1.71	220	9.27	1.82	220	8.8	1.73	5.26	4.103	28.2	1395	1.157	78.004	
10980	220	8.76	1.7	220	9.31	1.87	220	8.73	1.72	5.29	4.103	28.2	1400	1.187	77.561	
11580	220	8.83	1.71	220	9.26	1.86	220	8.75	1.72	5.29	4.103	28.2	1400	1.187	77.561	
12180	220	8.76	1.7	220	9.24	1.87	220	8.9	1.76	5.33	4.103	28.2	1397	1.227	76.979	
12780	220	8.76	1.69	220	9.23	1.85	220	8.77	1.73	5.27	4.103	28.2	1395	1.167	77.856	
13380	220	8.97	1.73	220	9.31	1.88	220	8.77	1.71	5.32	4.103	28.2	1395	1.217	77.124	
13980	220	8.82	1.71	220	9.25	1.86	220	8.77	1.73	5.3	4.103	28.2	1400	1.197	77.415	
14580	220	8.81	1.70	220	9.32	1.88	220	8.71	1.71	5.29	4.103	28.2	1400	1.187	77.561	
15180	220	8.99	1.74	220	9.38	1.90	220	8.69	1.71	5.35	4.103	28.2	1397	1.247	76.692	
15780	220	8.97	1.74	220	9.37	1.89	220	8.82	1.74	5.37	4.103	28.2	1397	1.267	76.406	

ตารางที่ ค.17 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 130%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
180	220	9.78	1.87	220	10.64	2.16	220	9.98	2	6.03	4.849	33.1	1402	1.181	80.415	
780	220	9.87	1.91	220	10.55	2.14	220	10.18	2.04	6.09	4.849	33.4	1391	1.241	79.622	
1380	220	9.95	1.93	220	10.62	2.15	220	10.19	2.05	6.13	4.849	33.9	1380	1.281	79.103	
1980	220	10.02	1.95	220	10.66	2.17	220	10.44	2.12	6.24	4.849	33.9	1371	1.391	77.708	
2580	220	10.2	2	220	10.73	2.17	220	10.45	2.11	6.28	4.849	34.1	1362	1.431	77.213	
3180	220	10.08	1.99	220	10.83	2.21	220	10.45	2.12	6.32	4.849	34.1	1360	1.471	76.725	
3780	220	10.21	2.12	220	10.81	2.21	220	10.65	2.16	6.49	4.849	34.3	1355	1.641	74.715	
4380	220	10.34	2.04	220	10.83	2.21	220	10.59	2.16	6.41	4.849	34.3	1352	1.561	75.647	

ตารางที่ ค.18 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 5 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 110%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
90	220	8.44	1.59	220	8.79	1.75	220	8.58	1.67	5.01	4.103	27.5	1426	0.907	81.896	
390	220	8.42	1.58	220	8.77	1.73	220	8.62	1.68	4.99	4.103	27.6	1422	0.887	82.224	
690	220	8.41	1.58	220	8.82	1.75	220	8.61	1.68	5.01	4.103	27.7	1420	0.907	81.896	
990	220	8.4	1.58	220	8.9	1.77	220	8.6	1.68	5.03	4.103	27.8	1415	0.927	81.571	
1290	220	8.4	1.59	220	8.9	1.78	220	8.75	1.73	5.1	4.103	27.8	1413	0.997	80.451	
1590	220	8.3	1.58	220	8.81	1.76	220	8.91	1.77	5.11	4.103	27.8	1412	1.007	80.294	
1890	220	8.44	1.63	220	8.89	1.79	220	8.81	1.74	5.16	4.103	27.8	1410	1.057	79.516	
2190	220	8.39	1.58	220	8.83	1.75	220	8.98	1.79	5.12	4.103	28	1406	1.017	80.137	
2490	220	8.54	1.62	220	8.84	1.78	220	8.84	1.76	5.16	4.103	28	1406	1.057	79.516	
2790	220	8.49	1.6	220	8.92	1.78	220	8.9	1.77	5.15	4.103	28	1406	1.047	79.670	
3090	220	8.36	1.58	220	8.92	1.79	220	9	1.79	5.16	4.103	28	1405	1.057	79.516	
3390	220	8.48	1.59	220	8.82	1.77	220	8.82	1.75	5.11	4.103	28	1401	1.007	80.294	
3690	220	8.6	1.63	220	8.9	1.78	220	8.84	1.76	5.17	4.103	28	1401	1.067	79.362	
3990	220	8.51	1.63	220	8.86	1.79	220	8.81	1.75	5.17	4.103	28	1401	1.067	79.362	

ตารางที่ ค.18 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
4290	220	8.39	1.58	220	8.86	1.8	220	8.9	1.76	5.14	4.103	28	1398	1.037	79.825	
4590	220	8.36	1.57	220	8.98	1.82	220	8.88	1.77	5.16	4.103	28	1401	1.057	79.516	
4890	220	8.45	1.58	220	9.1	1.85	220	8.76	1.75	5.18	4.103	28	1400	1.077	79.208	
5190	220	8.5	1.6	220	9	1.82	220	8.85	1.75	5.17	4.103	28	1397	1.067	79.362	
5490	220	8.5	1.58	220	9	1.83	220	8.86	1.75	5.16	4.103	28	1400	1.057	79.516	
5790	220	8.69	1.62	220	9	1.83	220	8.76	1.74	5.19	4.103	28	1395	1.087	79.056	
6090	220	8.56	1.6	220	9	1.84	220	8.96	1.79	5.23	4.103	28	1397	1.127	78.451	
6390	220	8.43	1.57	220	9	1.85	220	8.87	1.77	5.19	4.103	28.2	1394	1.087	79.056	
6690	220	8.45	1.57	220	8.99	1.83	220	8.8	1.75	5.15	4.103	28	1399	1.047	79.670	
6990	220	8.4	1.56	220	9	1.84	220	8.97	1.79	5.19	4.103	28.1	1395	1.087	79.056	
7290	220	8.42	1.58	220	9	1.85	220	8.81	1.75	5.18	4.103	28.2	1394	1.077	79.208	
7590	220	8.49	1.58	220	8.9	1.81	220	8.95	1.75	5.14	4.103	28.2	1395	1.037	79.825	
7890	220	8.37	1.54	220	8.93	1.82	220	8.9	1.78	5.14	4.103	28	1396	1.037	79.825	
8190	220	8.36	1.55	220	9	1.84	220	8.86	1.65	5.04	4.103	28	1396	0.937	81.409	

ตารางที่ ค.18 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
8490	220	8.34	1.56	220	9.18	1.86	220	8.84	1.74	5.16	4.103	28.2	1396	1.057	79.516	
8790	220	8.48	1.58	220	8.99	1.81	220	8.79	1.74	5.13	4.103	28	1396	1.027	79.981	
9090	220	8.33	1.56	220	8.97	1.82	220	8.85	1.76	5.14	4.103	28	1398	1.037	79.825	
9390	220	8.3	1.54	220	8.9	1.82	220	8.88	1.77	5.13	4.103	28	1399	1.027	79.981	
9690	220	8.3	1.56	220	8.85	1.79	220	9.02	1.8	5.15	4.103	28	1397	1.047	79.670	
9990	220	8.43	1.58	220	8.99	1.83	220	8.85	1.76	5.17	4.103	28	1398	1.067	79.362	
10290	220	8.4	1.59	220	8.96	1.83	220	8.98	1.79	5.21	4.103	28	1400	1.107	78.752	
10590	220	8.44	1.61	220	9	1.84	220	8.69	1.72	5.17	4.103	28	1398	1.067	79.362	
10890	220	8.32	1.56	220	9.1	1.86	220	8.96	1.78	5.2	4.103	28	1398	1.097	78.904	
11190	220	8.47	1.59	220	9	1.83	220	8.83	1.76	5.18	4.103	28	1399	1.077	79.208	
11490	220	8.44	1.59	220	9	1.84	220	8.89	1.77	5.2	4.103	28	1398	1.097	78.904	
11790	220	8.46	1.59	220	9	1.83	220	8.75	1.74	5.16	4.103	28	1399	1.057	79.516	
12090	220	8.37	1.57	220	9	1.8	220	8.97	1.78	5.15	4.103	28	1399	1.047	79.670	
12390	220	8.42	1.58	220	8.99	1.82	220	8.8	1.75	5.15	4.103	28	1399	1.047	79.670	

ตารางที่ ค.19 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 15 นาที, ตัวใช้เคล็ด 50%, ภาระทางกล 110%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
240	220	7.92	1.48	220	8.7	1.79	220	7.98	1.56	4.83	4.103	27.8	1424	0.727	84.948	
1140	220	7.9	1.47	220	8.7	1.78	220	8.04	1.58	4.83	4.103	28	1416	0.727	84.948	
2040	220	7.99	1.5	220	8.66	1.78	220	8.03	1.57	4.85	4.103	28	1410	0.747	84.598	
2940	220	8.03	1.51	220	8.77	1.8	220	8	1.57	4.88	4.103	28	1407	0.777	84.078	
3840	220	8.25	1.54	220	8.91	1.83	220	8.38	1.65	5.02	4.103	28	1405	0.917	81.733	
4740	220	8.32	1.56	220	9.08	1.86	220	8.35	1.65	5.07	4.103	28.2	1401	0.967	80.927	
5640	220	8.31	1.57	220	8.99	1.83	220	8.46	1.67	5.07	4.103	28.2	1400	0.967	80.927	
6540	220	8.35	1.58	220	8.92	1.83	220	8.36	1.66	5.07	4.103	28.2	1400	0.967	80.927	
7440	220	8.36	1.59	220	8.87	1.8	220	8.46	1.68	5.07	4.103	28.2	1399	0.967	80.927	
8340	220	8.36	1.58	220	8.9	1.82	220	8.46	1.68	5.08	4.103	28.2	1399	0.977	80.768	
9240	220	8.3	1.57	220	8.94	1.83	220	8.42	1.68	5.08	4.103	28.2	1400	0.977	80.768	
10140	220	8.38	1.58	220	8.94	1.82	220	8.39	1.66	5.06	4.103	28.2	1399	0.957	81.087	
11040	220	8.35	1.58	220	8.99	1.83	220	8.38	1.66	5.07	4.103	28.2	1399	0.967	80.927	
11940	220	8.3	1.58	220	8.98	1.83	220	8.5	1.68	5.09	4.103	28.2	1398	0.987	80.609	

ตารางที่ ค.20 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 50%, ภาระทางกล 120%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
180	220	9.52	1.84	220	9.83	1.87	220	9.65	1.89	4.476	5.6	4.476	30.4	1414	1.124	79.929
780	220	9.78	1.92	220	10.13	2.06	220	9.87	1.96	4.476	5.94	4.476	30.6	1407	1.464	75.354
1380	220	9.87	1.94	220	10.15	2.07	220	9.86	1.96	4.476	5.97	4.476	30.9	1397	1.494	74.975
1980	220	9.81	1.92	220	10.1	2.07	220	9.83	1.96	4.476	5.95	4.476	30.9	1393	1.474	75.227
2580	220	9.78	1.92	220	10.17	2.08	220	10.1	2.02	4.476	6.02	4.476	31.1	1386	1.544	74.352
3180	220	9.82	1.93	220	10.34	2.12	220	9.91	1.98	4.476	6.03	4.476	31.1	1384	1.554	74.229
3780	220	9.87	1.94	220	10.46	2.16	220	9.85	1.96	4.476	6.06	4.476	31.1	1382	1.584	73.861
4380	220	9.89	1.94	220	10.37	2.15	220	9.88	1.97	4.476	6.06	4.476	31.1	1379	1.584	73.861
4980	220	9.94	1.93	220	10.57	2.22	220	9.85	1.97	4.476	6.12	4.476	31.3	1376	1.644	73.137
5580	220	9.93	1.94	220	10.58	2	220	9.9	1.98	4.476	5.92	4.476	31.3	1375	1.444	75.608
6180	220	9.83	1.90	220	10.56	2.19	220	9.93	1.99	4.476	6.08	4.476	31.3	1372	1.604	73.618
6780	220	9.91	1.93	220	10.53	2.19	220	9.83	1.96	4.476	6.08	4.476	31.3	1375	1.604	73.618
7380	220	9.91	1.94	220	10.55	2.19	220	9.75	1.94	4.476	6.07	4.476	31.3	1374	1.594	73.740
7980	220	9.91	1.94	220	10.33	2.14	220	9.74	1.94	4.476	6.02	4.476	31.3	1373	1.544	74.352

ตารางที่ ค.20 (ต่อ)

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
8580	220	9.81	1.92	220	10.55	2.19	220	9.91	1.99	6.1	4.476	31.3	1372	1.624	73.377	
9180	220	9.87	1.92	220	10.58	2.2	220	9.83	1.97	6.09	4.476	31.3	1373	1.614	73.498	
9780	220	9.8	1.9	220	10.58	2.19	220	9.71	1.94	6.03	4.476	31.3	1372	1.554	74.229	
10380	220	10	1.94	220	10.56	2.18	220	9.96	2	6.12	4.476	31.3	1371	1.644	73.137	
10980	220	10	1.96	220	10.46	2.17	220	9.85	1.98	6.11	4.476	31.3	1372	1.634	73.257	
11580	220	9.85	1.93	220	10.4	2.16	220	9.81	1.97	6.06	4.476	31.3	1371	1.584	73.861	
12180	220	9.86	1.92	220	10.6	2.21	220	9.93	2	6.13	4.476	31.3	1372	1.654	73.018	
12780	220	9.81	1.91	220	10.46	2.17	220	9.99	2.01	6.09	4.476	31.3	1373	1.614	73.498	
13380	220	9.93	1.94	220	10.5	2.17	220	9.93	1.99	6.1	4.476	31.3	1374	1.624	73.377	
13980	220	9.78	1.9	220	10.57	2.19	220	9.96	2	6.09	4.476	31.3	1371	1.614	73.498	
14580	220	9.75	1.89	220	10.53	2.18	220	10.01	2.02	6.09	4.476	31.3	1372	1.614	73.498	

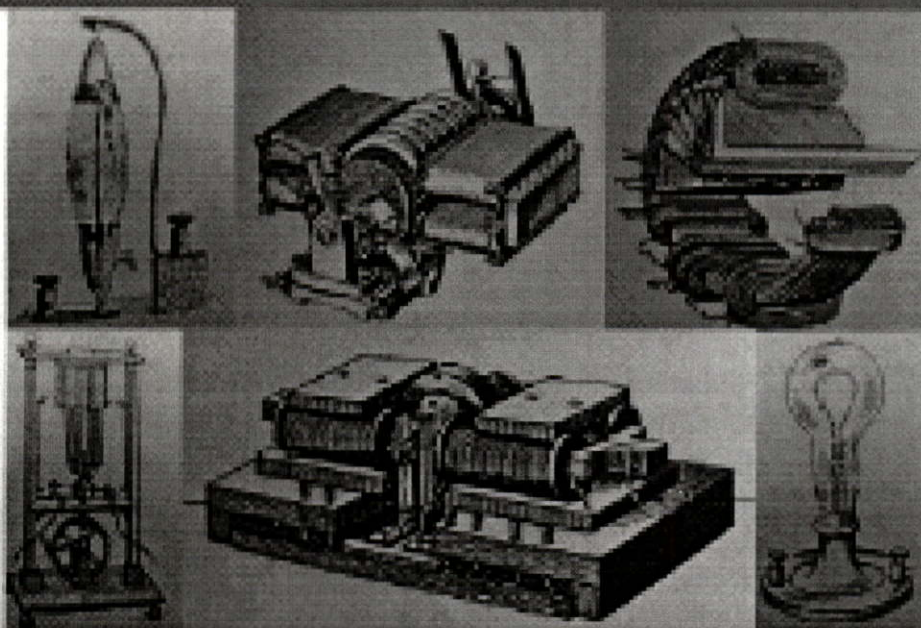
ตารางที่ ค.21 ผลการทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า เมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที, ดิวตี้ไซเคิล 80%, ภาระทางกล 120%

Time (sec)	Input										Pin (kW)	Pout (kW)	Torque (N-m)	Speed (rpm)	Ploss (kW)	Efficiency (%)
	Vr (V)	Ir (A)	Pr (kW)	Vs (V)	Is (A)	Ps (kW)	Vt (V)	It (A)	Pt (kW)							
360	220	9.23	1.78	220	9.84	1.98	220	9.54	1.89	5.65	4.476	30.6	1407	1.174	79.221	
960	220	9.37	1.82	220	9.92	2.01	220	9.48	1.88	5.71	4.476	30.8	1398	1.234	78.389	
1560	220	9.43	1.84	220	9.93	2.01	220	9.69	1.94	5.79	4.476	31.1	1385	1.314	77.306	
2160	220	9.68	1.91	220	10.03	2.04	220	9.76	1.97	5.92	4.476	31.3	1376	1.444	75.608	
2760	220	9.76	1.94	220	9.97	2.03	220	9.78	1.98	5.95	4.476	31.3	1371	1.474	75.227	
3360	220	9.68	1.92	220	10.1	2.06	220	9.93	2	5.98	4.476	31.6	1364	1.504	74.849	

ภาคผนวก ง
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



22 - 23 พฤศจิกายน 2544

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เทคนิคการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของ มอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลาในสภาวะโหลดเกินปกติ

A Temperature Calculation Technique of Induction Motor Stator Winding for Periodically Overload Condition

เปรมศักดิ์ ปรินษา* พิชิต ถ้ายอง* และรัชต์ มั่งมีชัย**

*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร:(02)737-3000 ต่อ 3322 E-mail:Pramsak@hotmail.com

**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
กรุงเทพมหานคร 10530 โทร/โทรสาร:(02)9883666 ต่อ 149 E-mail:ratchata@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อมอเตอร์มีลักษณะการทำงานเป็นคาบเวลาและภาระทางกลเกินปกติต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60034-1:1996 [1] โดยใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำคำนวณพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่มีผลต่ออุณหภูมิในมอเตอร์ ซึ่งประยุกต์ใช้ร่วมกับหลักการของการถ่ายเทความร้อน และใช้สมการโพลีโนเมียลทางคณิตศาสตร์ช่วยคำนวณให้เกิดความแม่นยำยิ่งขึ้น บทความวิจัยนี้ได้ใช้หลักการดังกล่าวเพื่อคำนวณอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์เทียบกับการทดสอบจริง เพื่อดูว่ามอเตอร์สามารถทำงานในสภาวะที่กำหนดได้หรือไม่ โดยการพิจารณาจากฉนวนของมอเตอร์ที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด และยังศึกษาถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่ออุณหภูมิและการทำงานของมอเตอร์ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกคาบเวลาและพิคคิมอเตอร์ไปใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะการทำงานได้อย่างปลอดภัยและเกิดประโยชน์สูงสุด

Abstract

This paper is a study of temperature calculation on stator winding of a three-phase induction motor when it was periodically operated in overload condition base on IEC 60034-1:1996 [1] standard. This concept is a consideration of an induction motor equivalent circuit in order to calculate the power loss which is related to the induction motor temperature. The calculation procedure is applied to the heat transfer principle along with mathematical polynomial equations in order to increase the calculation accuracy. In this paper, this principle is used to calculate the stator winding temperature. The calculation results are compared with the experimental results in order to investigate if the motor can be operated under the given conditions by considering the

insulator temperature and other factors which influence on the temperature and the motor operation. The period and rated of the motor can be selected using this calculation to operate safely in practical work for useful purpose.

Keywords: induction motor, equivalent circuit, heat transfer

1. บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำได้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งภายในบ้านพักอาศัย หน่วยงานของรัฐและเอกชน ผู้ประกอบการส่วนใหญ่นิยมใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่องใช้กับลักษณะการทำงานเป็นคาบเวลากันเป็นจำนวนมาก เช่น เครื่องปั๊มแผ่นเหล็ก คอมเพรสเซอร์และปั๊มน้ำ เป็นต้น ซึ่งในลักษณะการทำงานเป็นคาบเวลาเช่นนี้ บางกรณีมอเตอร์ยังสามารถทำงานในลักษณะภาระทางกลเกินปกติและกระแสไฟฟ้าเกินพิคคิมอเตอร์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องหยุดการทำงานมอเตอร์ ระบายไคที่อุณหภูมิยังไม่ถึงจุดวิกฤตของฉนวน ปกติมอเตอร์จะเกิดความเสียหายได้นั้นส่วนใหญ่แล้วเนื่องมาจากฉนวนและวานิชที่เคลือบขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิเกินปกติได้ แต่การที่มอเตอร์จะทำงานลักษณะภาระทางกลเกินปกติได้นั้นใช้ระยะเวลาสั้นเท่าใดจึงไม่ทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหายนั้นเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอเทคนิคการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อมีการทำงานแบบคาบเวลาประเภทที่ 3 (Intermittent Periodic Duty) หรือ S3 ตามมาตรฐาน IEC 60034-1:1996 สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ทดสอบทั้งหมดสองตัวคือ ขนาด 1 แรงม้า และ 3 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก, 380 โวลท์, 50 เฮิร์ต, ฉนวนคลาส E ซึ่งทนอุณหภูมิสูงสุด 120 องศาเซลเซียส

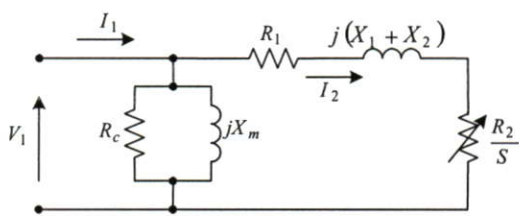
ดังนั้นการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาใช้งานจึงต้องมีความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้อง เพื่อสามารถนำไปใช้กับลักษณะงานต่างๆได้อย่างเหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งหากนำไปใช้อย่างผิดวิธี ผิดประเภทและไม่เหมาะสมกับการใช้งานแล้ว จะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับมอเตอร์ ซึ่งเป็นผลเสียกับระบบไฟฟ้าและกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมได้

2. ทฤษฎีและหลักการ

เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ มอเตอร์เปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเพื่อขับเคลื่อนภาระทางกลที่ต้องการ แต่ยังมีพลังงานไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งที่สูญเสียภายในมอเตอร์ คือ การสูญเสียเนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss) , การสูญเสียเนื่องจากขดลวดโรเตอร์ (Rotor copper loss) , การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และการสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลม(Friction and windage loss)[3] ซึ่งการสูญเสียทั้งหมดนี้จะแปรรูปเป็นพลังงานความร้อนภายในมอเตอร์ สำหรับทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีดังนี้

2.1 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถคำนวณจากวงจรมูลย์แบบประมาณ(Approximate equivalent circuit) ดังรูปที่ 1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้จากการทดสอบซีโรเตอร์ (Block rotor test) การทดสอบสภาวะไม่มีภาระทางกล(No load test) และการทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์



รูปที่ 1 วงจรสมมูลย์แบบประมาณ (Approximate equivalent circuit)

2.2 การถ่ายเทความร้อน

ความร้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถเคลื่อนที่ได้ 3 วิธีด้วยกันคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน สำหรับการแผ่รังสีความร้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าน้อยจึงไม่นำมาคิดเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์และคำนวณ [4]

2.2.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อนคือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อน พิจารณาได้จากสมการ (1)

$$q_x = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \tag{1}$$

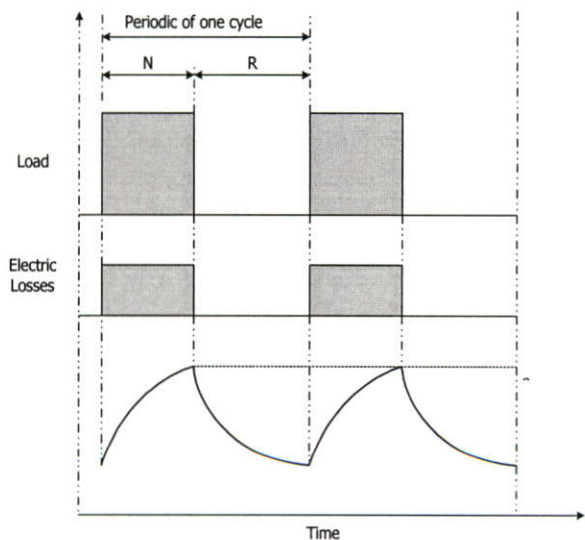
2.2.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของแข็งและของไหล ของไหลนั้นจะเป็นตัวพาความร้อนจากผิวของแข็ง การพาความร้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การพาโดยบังคับ (Forced convection) และการพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection) การพาความร้อนโดยรวมสามารถพิจารณาได้จากสมการ (2)

$$q = hA(T_h - T_c) \tag{2}$$

2.3 การคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การคำนวณอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อทำงานเป็นคาบเวลาประกอบด้วยช่วงของการขับภาระทางกล และ ช่วงหยุดการทำงาน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทำงานเป็นคาบเวลา (Intermittent periodic duty)

$$P = (P_{core} + I_1^2 P_{cu}) \tag{14}$$

เมื่อทดสอบมอเตอร์ที่พิกัดภาระทางกล 100% กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์คิดเป็น 1.0 pu. ฉะนั้นจะได้ดังสมการ (15)

$$P = (P_{core} + P_{cu}) \tag{15}$$

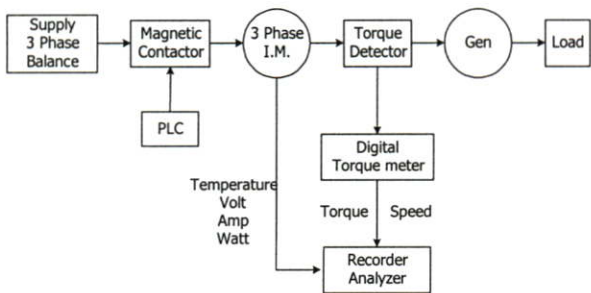
P คือ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์ (Watt)

P_{core} คือ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Watt)

P_{cu} คือ พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ (Watt)

3. การทดสอบ

มอเตอร์ที่ทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 4 ขั้วแม่เหล็ก, 380 โวลท์, 50 เฮิร์ต และฉนวนคลาส E ที่ทนอุณหภูมิสูงสุด 120 องศาเซลเซียส โดยมีการวัดอุณหภูมิที่ขดลวดสเตเตอร์ด้วยเทอร์โมคัปเปิล สำหรับมอเตอร์ที่ทดสอบมีขนาด 1 แรงม้า และ 3 แรงม้า ทั้งสองตัวมีลักษณะการทำงานเป็นคาบเวลา 5, 10 และ 15 นาที ที่ควิตซ์ไจเคิล 50 และ 80 เปอร์เซนต์ มอเตอร์รับภาระทางกลเกินพิกัด 110, 120 และ 130 เปอร์เซนต์ โดยเขียนโปรแกรม PLC ควบคุมลักษณะการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสภาวะเฟสสมดุลป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ และใช้ Analyzing Recorder เป็นตัวบันทึกอุณหภูมิและความเร็วรอบของมอเตอร์ดังรูปที่ 3

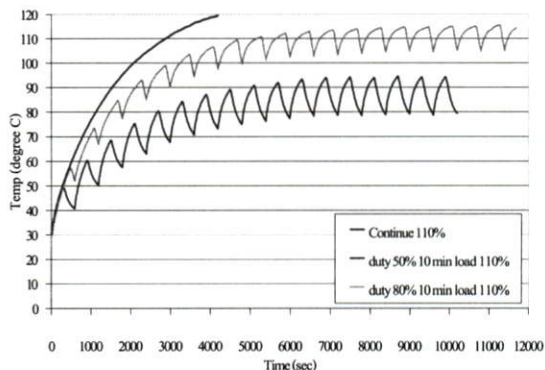


รูปที่ 3 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

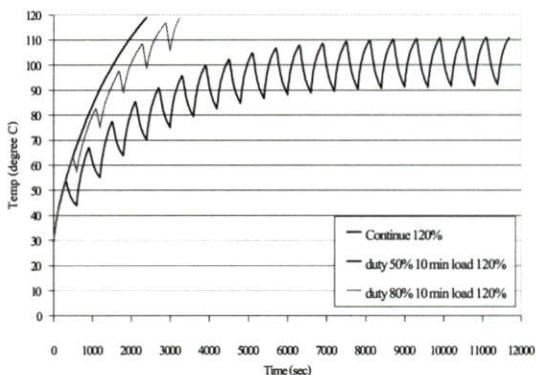
4. ผลการทดสอบและการคำนวณ

จากรูปที่ 4 ถึง รูปที่ 6 เป็นผลการทดสอบอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อทำงานเป็นคาบเวลา 10 นาที ที่ควิตซ์ไจเคิล 50 และ 80 เปอร์เซนต์ เปรียบเทียบกับการทำงานของมอเตอร์มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่อง ส่วนรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 12 เป็นการคำนวณอุณหภูมิข

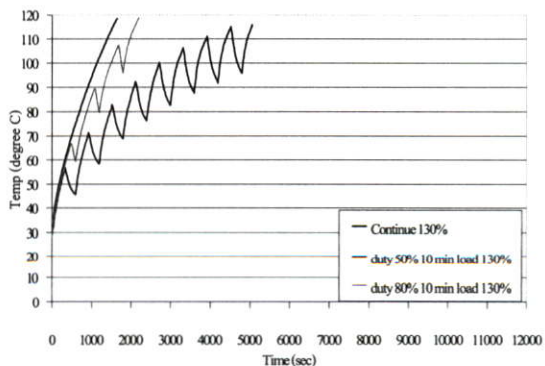
ลวดสเตเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงเมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นคาบเวลา 5, 10 และ 15 นาที ที่ควิตซ์ไจเคิล 50 และ 80 เปอร์เซนต์ ภาระทางกลเกินพิกัด 110, 120 และ 130 เปอร์เซนต์



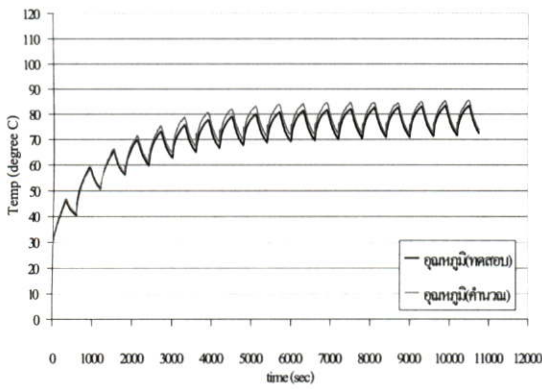
รูปที่ 4 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ 3 Hp เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 110 %



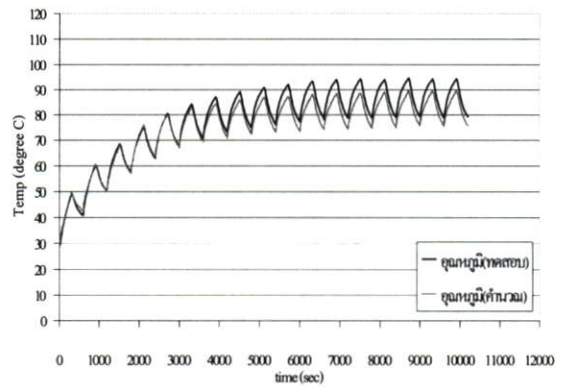
รูปที่ 5 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ 3 Hp เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 120 %



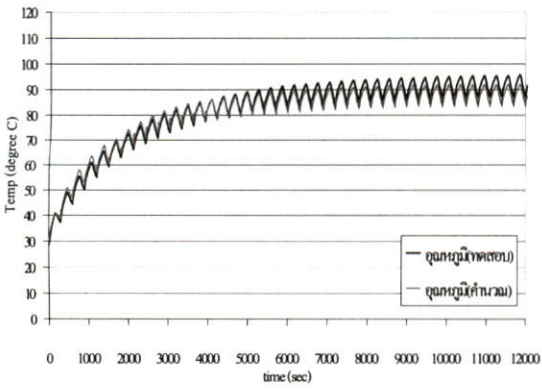
รูปที่ 6 อุณหภูมิจากการทดสอบมอเตอร์ 3 Hp เมื่อทำงานเป็นคาบเวลาเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง ที่ภาระทางกล 130 %



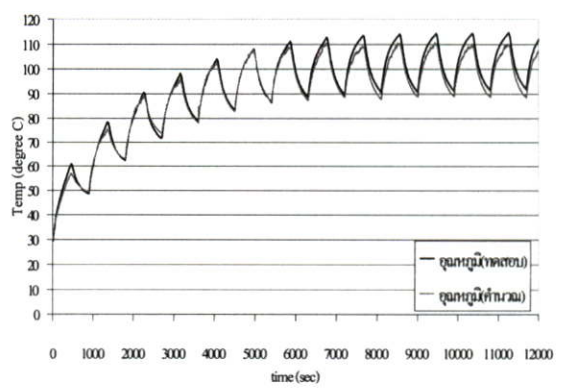
รูปที่ 7 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดเทียบกับการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 Hp ที่คิวดีไซเคิล 50%, คาบเวลา 10 นาที, ที่ภาระทางกล 110%



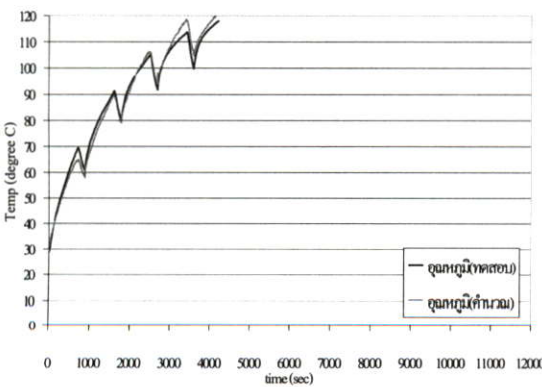
รูปที่ 10 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดเทียบกับการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 Hp ที่คิวดีไซเคิล 50 %, คาบเวลา 10 นาที, ที่ภาระทางกล 110%



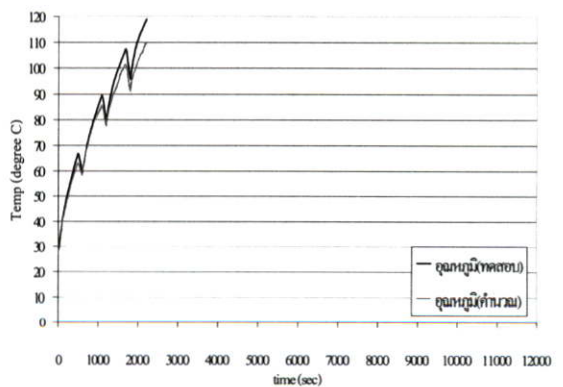
รูปที่ 8 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดเทียบกับการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 Hp ที่คิวดีไซเคิล 50%, คาบเวลา 5 นาที, ที่ภาระทางกล 120%



รูปที่ 11 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดเทียบกับการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 Hp ที่คิวดีไซเคิล 50 %, คาบเวลา 15 นาที, ที่ภาระทางกล 120%



รูปที่ 9 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดเทียบกับการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 Hp ที่คิวดีไซเคิล 80%, คาบเวลา 15 นาที, ที่ภาระทางกล 130%



รูปที่ 12 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดเทียบกับการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 Hp ที่คิวดีไซเคิล 80 %, คาบเวลา 10 นาที, ที่ภาระทางกล 130%

5. สรุป

จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อทำงานเป็นคาบเวลา เมื่อเปอร์เซ็นต์โหลดไซเคิลหรือภาระทางกลเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าภายในมอเตอร์สูงขึ้น ซึ่งจะแปรรูปเป็นความร้อนในตัวมอเตอร์ องค์ประกอบหลักที่ทำให้ให้อุณหภูมิของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงคือ พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียภายในตัวมอเตอร์ อุณหภูมิโดยรอบ และความเร็วลมที่ระบายความร้อนให้กับกริบบของมอเตอร์

จากรูปที่ 7 ถึง รูปที่ 12 เป็นการคำนวณอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์เทียบกับการทดสอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า และ 3 แรงม้า เมื่อมีการทำงานเป็นคาบเวลา ที่พิกัดภาระทางกล 110 , 120 และ 130 เปอร์เซ็นต์ และผลจากการคำนวณนั้นมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ จากการทดสอบและการคำนวณที่พิกัดภาระทางกล 110 และ 120 เปอร์เซ็นต์ ของมอเตอร์ทั้งสองตัวดังรูปที่ 7,8 (1 แรงม้า) และ รูปที่ 10,11 (3 แรงม้า) มอเตอร์ยังสามารถทำงานต่อไปได้ โดยไม่เป็นอันตรายต่อมอเตอร์ถึงแม้ว่ากระแสไฟฟ้าจะเกินพิกัดก็ตาม แต่เมื่อเพิ่มภาระทางกลเป็น 130 เปอร์เซ็นต์ ที่คาบเวลาดังกล่าว ดังรูปที่ 9 และ รูปที่ 12 มอเตอร์ไม่สามารถทำงานที่พิกัดภาระจุดนี้ต่อไปได้ ณ.ที่เวลา 4200 sec(1 แรงม้า) และที่เวลา 2500 sec (3 แรงม้า) เพราะอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดวิกฤติที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส (ณ.วณคลาส E) ถ้าอุณหภูมิมากกว่าจุดนี้ทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย

หลักการและวิธีการคำนวณอุณหภูมิที่นำมาใช้นี้จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำนายอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ก่อนที่อุณหภูมิจะเกิดความเสียหาย ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจรและเป็นอันตรายต่อมอเตอร์ได้ รวมถึงระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับมอเตอร์ด้วย

สำหรับประโยชน์จากการวิจัยเรื่องนี้ คือ สามารถป้องกันมอเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพก่อนที่จะเกิดความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิเกินพิกัด และสามารถเลือกคาบเวลา,พิกัดภาระทางกลและขนาดมอเตอร์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม และเกิดประโยชน์สูงสุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] CEI/IEC 60034-1 1996 International Standard, "Rotating electrical machines Part 1: Rating and performance," International Standard,1996,pp 118-126.
- [2] G Henneberger, K Ben Yahia and M Schmitz, " Calculation and Identification of A Thermal Equivalent Circuit of A Water Cooled Induction Motor for Electric Vehicle Applications,"Electrical Machines and Drives,Conference Publication No.412, IEE, Sep 1995,pp.6-10.

[3] IEEE Standards 112-1996, "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators," American National Standard (ANSI), 1996

[4] Yildiz Bayazitoglu and M.Necati Ozisik, "Elements of Heat Transfer," McGraw-Hill Book Company, 1988,pp 17-28.

[5] Douglas Griffiths, "Principles and Problems of Electrical Machines," Prentice Hall International (UK) Limited, 1995, pp 96-100.

[6] Denis O'Kely, "Performance and Control of Electrical Machines", McGraw-Hill Book Company, 1992,pp 33-335.

[7] JoeD.Hoffman, "Numerical Methods for Engineers and Scientists," McGraw-Hill, 1993,pp 144-150.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายปรวมศักดิ์ ปรีชา จบการศึกษา ว.ศ.บ.ไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2539 ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยในด้านการแปลงรูปพลังงาน, มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าและการถ่ายเทความร้อน



นาย พิชิต ล้าอง จบการศึกษา ว.ศ.บ.ไฟฟ้า และ ว.ศ.ม.ไฟฟ้าจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และหัวหน้าศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยในด้าน การแปลงรูปพลังงาน, เครื่องจักรกลไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



นายรัชต์ มั่งมีชัย จบการศึกษา ว.ศ.บ.ไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปี พ.ศ 2536 และ จบการศึกษา ว.ศ.ม.ไฟฟ้าจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2543 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร โดยทำงานวิจัยในด้าน การแปลงรูปพลังงาน, มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าและมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น

ประวัติผู้เขียน

นายเปรมศักดิ์ ปรีชา เกิดเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม 2516 ที่จังหวัดกระบี่ สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา
2540 และประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ไฟฟ้ากำลัง) จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขต
เทคนิคกรุงเทพ ปีการศึกษา 2537

ปี พ.ศ. 2543 เข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีมหานคร จนถึงปัจจุบัน