สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

EFFICIENCY ESTIMATION OF SINGLE – PHASE INDUCTION MOTOR USING ON-SITE MEASUREMENT

T075120

อิษฎา อุบลไทรย์

ISADA AUBONSAI

ภพ.
๐7590
2550

เลขหมู่........................
เลขทะเบียน 75120
วัน,เดือน,ปี 19 ต.ค. 2550

b. 11833671
i.............................

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFICIENCY ESTIMATION OF SINGLE – PHASE INDUCTION MOTOR USING ON-SITE MEASUREMENT

ISADA AUBONSAI

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
2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2007
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส Efficiency Estimation of Single – Phase Induction Motor Using On-Site Measurements

นักศึกษา นายอิษฎา อุบลไทรย์

รหัสประจำตัว 48060203

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.พิชิต	ลำยอง	
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	
ผศ.ดร.สลิลทิพย์	สินธุสนธิชาติ	สลิลทิพย์ สินธุสนธิชาติ
รศ.ดร.อานันทวัฒน์	คุณากร	
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 29 พฤษภาคม 2550 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-401)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่......29......**เดือน**.....พฤษภาคม.....**พ.ศ.**....2550....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งาน ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส
นักศึกษา	นายอินฎา อุบลไทรย์
รหัสนักศึกษา	48060203
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส จากวิธีการวัดค่าต่าง ๆ ขณะใช้งานโดยไม่จำเป็นต้องหยุดการทำงานและนำมอเตอร์ออกจากระบบ เพื่อไปทำการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพในห้องปฏิบัติการ วิธีการนี้ใช้หลักการของวงจรสมมูลซึ่งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนาม ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลจะสามารถพิจารณาหาได้จากการใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะใช้งานเท่านั้นร่วมกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบจีเนติกอัลกอริธึม นอกจากนี้ได้มีการพิจารณาเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของการสูญเสียในแกนเหล็กเข้าไปในวงจรสมมูลเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่าประสิทธิภาพ โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบวิธีการประมาณค่าประสิทธิภาพด้วยการวัดค่าขณะใช้งานจริงกับมอเตอร์แบบแยกเฟสและมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นที่ยอมรับได้ (ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Efficiency Estimation of Single-Phase Induction Motor Using On-Site Measurements
Student	Mr. Isada Aubonsai
Student ID.	48060203
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr. Chaiwut Chat-uthai

ABSTRACT

This paper proposes the technique for estimating and efficiency of a single-phase induction motor using on-site measurements without the need to disconnect and remove the motor from the process for laboratory tests. The on-site efficiency technique employs an equivalent circuit model which is based on the double-revolving-field theory. Circuit parameters can be obtained from the use of measured voltage, current, power and speed of the motor during operating conditions coupled with the optimization technique GAs (Genetic Algorithms). Furthermore, the addition core loss parameter is then proposed in order to improve an accuracy of the estimated efficiency. The proposed technique is implemented for estimating the efficiencies of split-phase and capacitor-run-capacitor-start induction motors with various sizes. The results obtained from the efficiency estimation are compared with the laboratory tests. It is found that the error is in an acceptable rang (about 2%).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

อิษฎา อุบลไทรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย...I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ……………………………………………………………………………II
กิตติกรรมประกาศ…………………………………………………………………………………III
สารบัญ……...……..………………...…………………………..…………………….……………....IV
สารบัญตาราง……..…………………………………..……………………………..…………………....VII
สารบัญรูป……………………………………………………………..…………………………...……X
บทที่ 1 บทนำ…………………………………………………………………………………………...1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา……………………..…………………...….... ..1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา……………..…………………….......1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา…………………………………………..……………...……2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย………………………..…………….........2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน…………………......2
1.6 ขอบเขตการวิจัย…………………………………………………………..…………………3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา…………………………………………………..…………………3

บทที่ 2 ทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ……………………………………………………....4
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส...4
2.1.1 สเตเตอร์... 4
2.1.2 โรเตอร์.. 5
2.2 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส..7
2.2.1 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนาม..9
2.2.2 การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส... 13
2.2.3 แรงบิดขณะสตาร์ท.. 15
2.2.4 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส....................................... 18
2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบต่างๆ..20
2.3.1 มอเตอร์แบบแยกเฟส... 21
2.3.2 มอเตอร์ชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ.. 22
2.3.3 มอเตอร์ชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ.. 22
2.3.4 มอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ...23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 กระบวนการพื้นฐานในการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส........... 24
2.4.1 Load Test...25
2.4.2 วงจรสมมูล...26

บทที่ 3 เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส................54
3.1 พื้นฐานการออกแบบที่เหมาะสม...54
3.1.1 การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ...................................55
3.1.2 หลักการออกแบบที่เหมาะสม...56
3.1.3 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม..57
3.2 จีนีติกอัลกอริธึม..60
3.2.1 ฟังก์ชั่นเป้าหมายและฟังก์ชันค่าความเหมาะสม...63
3.2.2 ตัวดำเนินการทางจีนีติกอัลกอริธึม...63
3.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจีนีติกอัลกอริธึม..69
3.2.4 การทำงานของจีนีติกอัลกอริธึม...71
3.3 เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพที่โหลดหนึ่ง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสขณะใช้งานจริงโดยหลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจีนีติกอัลกอริธึม............................72
3.4 เทคนิคการประมาณค่าสมรรถนะตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสขณะใช้งานจริงโดยหลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจีนีติกอัลกอริธึม.....................75

บทที่ 4 ผลการทดสอบมอเตอร์และผลที่ได้จากงานวิจัย...78
4.1 บทนำ 78
4.2 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส...78
4.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสตัวที่ 1...78
4.2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสตัวที่ 2...91
4.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ.....................................97
4.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุตัวที่ 1.................97
4.3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุตัวที่ 2..............109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 บทสรุป....117

5.1 บทนำ....117

5.2 สรุปผล OPT....117

5.3 สรุปผล TPT....120

5.4 การนำเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสไปใช้งานจริง.... 121

5.5 ข้อเสนอแนะ.... 122

บรรณานุกรม....124

ภาคผนวก....126

ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบ Load Test ทั้ง 3 ครั้งของมอเตอร์ทั้ง 4 ตัว....127

ภาคผนวก ข. ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพด้วยเทคนิค TPT....134

ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่....149

ประวัติผู้เขียน....155

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4-1 ข้อมูลป้ายพิกัดของมอเตอร์ตัวที่ 1 ที่นำมาทดสอบ..........79

4-2 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W โดยวิธี Load Test..........79

4-3 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W เพื่อหาวงจรสมมูล..........80

4-4 ค่าพารามิเตอร์และผลการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 200 W เมื่อใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2..........80

4-5 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ด้วย OPT โดยใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2.......... 83

4-6 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ที่ความเร็ว 1455 และ 1425.......... 84

4-7 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 200 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1455 และ 1425..........84

4-8 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ที่ความเร็วรอบ 1455 และ 1423..........85

4-9 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 200 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1455 และ 1423..........85

4-10 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ที่ความเร็วรอบ 1455 และ 1420..........86

4-11 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 200 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1455 และ 1420..........86

4-12 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ที่ความเร็วรอบ 1446 และ 1423..........87

4-13 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 200 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1446 และ 1423..........87

4-14 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ที่ความเร็วรอบ 1446 และ 1420..........88

4-15 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 200 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1446 และ 1420..........88

4-16 ข้อมูลป้ายพิกัดของมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่นำมาทดสอบ.......... 91

4-17 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400W โดยวิธี Load Test.......... 92

4-18 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W เพื่อหาวงจรสมมูล.......... 92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4-19 ค่าพารามิเตอร์และผลการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 400 W เมื่อใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2........93

4-20 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ด้วย OPT โดยใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2........ 95

4-21 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1479 และ 1450........96

4-22 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 400 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1479 และ 1450........96

4-23 ข้อมูลป้ายพิกัดของมอเตอร์ตัวที่ 3 ที่นำมาทดสอบ........ 98

4-24 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W โดยวิธี Load Test........98

4-25 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ ขนาด 400 W เพื่อหาวงจรสมมูล........ 99

4-26 ค่าพารามิเตอร์และผลการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุน และหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W เมื่อใช้วงจรสมมูลโมเดล T........100

4-27 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ด้วย OPT โดยใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2........101

4-28 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1483 และ 1468........102

4-29 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและ หมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1483และ1468.......102

4-30 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1483 และ 1460........103

4-31 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและ หมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1483และ1460.........103

4-32 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1483 และ 1457........104

4-33 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและ หมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1483และ1457.......104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4-34 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1477 และ 1460....105

4-35 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1477และ1460.........105

4-36 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1477 และ 1457....106

4-37 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1477และ1457.........106

4-38 ข้อมูลป้ายพิกัดของมอเตอร์ตัวที่ 4 ที่นำมาทดสอบ....111

4-39 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750W ด้วยการวัดแรงบิดทางกลโดยตรง....110

4-40 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W เพื่อหาวงจรสมมูล....111

4-41 ค่าพารามิเตอร์และผลการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W เมื่อใช้วงจรสมมูลโมเดล T....112

4-42 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ด้วย OPT โดยใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2....113

4-43 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ที่ความเร็วรอบ 1490 และ 1442....114

4-44 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1490และ1442.........114

5-1 ข้อมูลป้ายพิกัดของมอเตอร์ที่นำมาประมาณค่าประสิทธิภาพ....121

5-2 ข้อมูลอินพุทของมอเตอร์ที่นำมาประมาณค่าประสิทธิภาพ....121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2-1	สเตเตอร์ของมอเตอร์	4
2-2	โรเตอร์ทรงกระบอก	6
2-3	โรเตอร์แบบพันขดลวด	6
2-4	สนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง	8
2-5	พัลส์เส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส	9
2-6	ทิศทางของสนามแม่เหล็ก	10
2-7	วงจรสมมูลของโรเตอร์	11
2-8	กราฟคุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	12
2-9	รูปคลื่นของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าบนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	13
2-10	กระบวนการเริ่มหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส	13
2-11	เฟสเซอร์ไดอะแกรมขณะสตาร์ท	17
2-12	การส่งผ่านกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส	20
2-13	มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบแยกเฟส	22
2-14	มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ	23
2-15	มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบตัวเก็บประจุ 2 ค่า	24
2-16	การทดสอบ Load Test	26
2-17	วงจรสมมูลโมเดล T สำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟส	27
2-18	วงจรสมมูลโมเดล EC1 สำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟส	31
2-19	วงจรสมมูลโมเดล EC2 สำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟส	34
2-20	วงจรสมมูลโมเดล T สำหรับมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ	37
2-21	วงจรการทดสอบที่ 1 ในการทดสอบหาอัตราส่วนของขดลวด	41
2-22	วงจรการทดสอบที่ 2 ในการทดสอบหาอัตราส่วนของขดลวด	42
2-23	วงจรทดสอบแบบไร้ภาระของขดลวดหลัก	44
2-24	วงจรทดสอบแบบไร้ภาระของขวดลวดช่วยหมุน	46
2-25	วงจรสมมูลโมเดล T สำหรับมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ	47
2-26	วงจรสมมูลโมเดล T สำหรับมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ	51
3-1	แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม	54
3-2	การแก้ปัญหาโดยตรง	55
3-3	การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3-4	แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม	56
3-5	คำตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$	58
3-6	กราฟค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x)$ บนโดเมน x	59
3-7	แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมินิสติก	60
3-8	การคัดเลือกโครโมโซมโดยเทคนิควงล้อลูเล็ท	65
3-9	การสร้างโครโมโซมลูกแบบ one-point crossover	66
3-10	การสร้างโครโมโซมลูกแบบ two-point crossover	67
3-11	การสร้างโคโมโซมลูกแบบ uniform crossover	68
3-12	การกลายพันธุ์(mutation)	68
3-13	ขั้นตอนการทำงานของ OPT	73
3-14	การใช้งานเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพที่โหลดหนึ่งหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสขณะใช้งานจริง	74
3-15	กระบวนการทำงานของ TPT	76
4-1	ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบวงจรสมมูลโมเดลแบบต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 200 W	72
4-2	ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1455 – 1425 r/min	89
4-3	ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1455 – 1423 r/min	89
4-4	ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1455 – 1420 r/min	90
4-5	ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1446 – 1423 r/min	90
4-6	ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1446 – 1420 r/min	91
4-7	ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบวงจรสมมูลโมเดลแบบต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 400 W	94
4-8	ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1479 – 1450 r/min	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4-9 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบวงจรสมมูลโมเดล T ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W.....100

4-10 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1483 – 1468 r/min.....107

4-11 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1483 – 1460 r/min.....107

4-12 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1483 – 1457 r/min.....108

4-13 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1477 – 1460 r/min.....108

4-14 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1477 – 1457 r/min.....109

4-15 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบวงจรสมมูลโมเดล T ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W.....112

4-16 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1490 – 1442 r/min.....115

5-1 ผลการประมาณค่าประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ด้วยเทคนิค OPT.....118

5-2 ผลการประมาณค่าประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ด้วยเทคนิค OPT.....118

5-3 ผลการประมาณค่าประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ด้วยเทคนิค OPT.....119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5-4 ผลการประมาณค่าประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุน และหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ด้วยเทคนิค OPT....119

5-5 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ ขนาด 1 แรงม้าที่การใช้งานจริง ด้วยวงจรสมมูลโมเดล EC2....122

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้มีแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะนำไปจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ และโดยมากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในครัวเรือนส่วนใหญ่จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟสเป็นเครื่องต้นกำลัง ซึ่งแยกใช้ตามลักษณะงานและความเหมาะสม และมีการใช้งานอย่างกว้างขวางถึงกำลังไฟฟ้าต่อตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสจะน้อยแต่ถ้าคิดพลังงานโดยรวมแล้วก็เป็นพลังงานที่ค่อยข้างมาก และจากสถานการณ์ทางด้านพลังงานในปัจจุบันที่ทำให้เราต้องมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า ถ้าเราสามารถทราบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ตัวหนึ่งที่ใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง ก็จะมีส่วนช่วยในการตัดสินใจในการบริหารจัดการพลังงาน ต่อไป

โดยปกติแล้ว การได้มาซึ่งค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสมีวิธีหลักๆอยู่ 2 วิธี คือ 1 การทำการวัดแรงบิดทางกลโดยตรง (Load Test) เทียบกับกำลังไฟฟ้าอินพุท แต่วิธีนี้เราจำเป็นที่จะต้องทำการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบิด (Torque Detector) ถ้ามอเตอร์ตัวนั้นๆทำงานอยู่ในภาคอุตสาหกรรม คงเป็นการไม่สะดวกนักที่จะทำการติดตั้งเครื่องมือตัวนี้เข้าไป อีกวิธีการหนึ่งคือการคำนวณค่าประสิทธิภาพจากวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) แต่การได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเราจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ จึงจำเป็นต้องทำการถอดมอเตอร์ออกจากระบบเพื่อทำการทดสอบความต้านทานสเตเตอร์ การทดสอบแบบไร้ภาระทางกล และการทดสอบบล็อคโรเตอร์ จากที่กล่าวมากจะพบว่าการได้มาซึ่งค่าประสิทธิภาพนั้น ค่อนข้างที่จะยุ่งยาก จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่ว่าน่าจะมีวิธีการที่สามารถทราบค่าประสิทธิภาพได้อย่างสะดวก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากที่กล่าวมา การได้มาซึ่งค่าประสิทธิภาพนั้นค่อนข้างที่จะมีความยุ่งยาก วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการนำเสนอทางเลือกใหม่ในการหาค่าประสิทธิภาพที่สามารถทราบค่าประสิทธิภาพได้อย่างรวดเร็ว มีความแม่นยำ และสะดวกในการนำไปใช้งาน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการนำเสนอวิธีการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่สามารถทราบค่าประสิทธิภาพได้อย่างสะดวก มีความแม่นยำ ไม่จำเป็นที่จะต้องทำการถอดมอเตอร์ออกจากระบบเพื่อทดสอบต่างๆ และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการหาค่าประสิทธิภาพลงได้ โดยคาดหวังว่าวิธีการหาประสิทธิภาพวิธีการนี้จะมีส่วนช่วยในการบริหารจัดการพลังงานเพื่อที่จะใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

เมื่อมอเตอร์ตัวหนึ่งทำการขับภาระโหลด มอเตอร์ตัวนั้นๆ ก็จำเป็นที่จะต้องรับอินพุททางไฟฟ้า อันได้แก่ แรงดัน กระแส และ กำลังไฟฟ้า เพื่อที่จะทำให้เกิดกำลังทางกลค่าหนึ่งที่ความเร็วรอบหนึ่งๆ ถ้าเราทำการพิจารณาวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์จะพบว่าจะมีค่าพารามิเตอร์อยู่ชุดหนึ่งที่ทำให้เกิดค่าอินพุททางไฟฟ้านี้ จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่ว่า ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลนั้นอาจสามารถหาได้จากข้อมูลอินพุททางไฟฟ้าและความเร็วทางกลขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานจริงได้โดยอาศัยกระบวนการทางคณิตศาสตร์และความเป็นจริงทางทฤษฎีมอเตอร์เข้าช่วย ถ้าเราสามารถหาค่าพารามิเตอร์จากวิธีการที่อธิบายไว้ข้างต้นได้ เราน่าจะสามารถหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้โดยที่เราไม่จำเป็นที่จะต้องทำการถอดมอเตอร์ออกจากระบบเพื่อไปทำการทดสอบใดๆ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

วิธีการนี้ใช้ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 1 เฟสทั่วไป รวมถึงวงจรสมมูลอันอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนาม โดยจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพต่อไป ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลในวิธีการนี้จะได้มาจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบจีนีติกอัลกลอริธึมโดยใช้ข้อมูลที่วัดได้ขณะที่มอเตอร์ทำงานจริงอันได้แก่ แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ และความเร็วรอบของมอเตอร์เป็นข้อมูลอินพุทเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล ซึ่งสะดวกกว่าวิธีการหาวงจรสมมูลทั่วไปอันได้แก่ การทดสอบแบบไม่มีภาระโหลด (No-load Test) การทดสอบแบบล็อคโรเตอร์ (Lock Rotor Test) และการทดสอบความต้านทานขดสเตเตอร์ (DC Test) นอกจากนี้ยังทำการทดสอบมอเตอร์แบบทั่วไปอันได้แก่ วิธีการ Load Test และวิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบบปกติโดยวิธีการทดสอบแบบทั่วไปนี้ทำเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับวิธีการใหม่ที่ทำการนำเสนอ

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

ความต้องการของวิธีการหาค่าประสิทธิภาพแนวใหม่ที่นำเสนอนี้มีเพียงข้อมูลอินพุท อันได้แก่ แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้าอินพุท และความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะทำงานจริงเท่านั้นในการหาค่าประสิทธิภาพ และยังสามารถทราบค่าประสิทธิภาพได้อย่างรวดเร็ว

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ Load Test โดยตรงนั้น ข้อได้เปรียบของวิธีใหม่นี้คือความสะดวกไม่ยุ่งยาก เนื่องจากไม่จำเป็นที่จะต้องทำการถอดมอเตอร์ออกจากระบบหรือขนย้ายเพื่อที่จะทำการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบิดทางกล แต่ข้อที่ด้อยกว่าคือความแม่นยำเนื่องจาก Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test นั้นจะเป็นการวัดกำลังเอาท์พุทจริงซึ่งมีความถูกต้องมากที่สุด แต่ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนของวิธีการใหม่นี้ก็อยู่ในระดับต่ำมาก

หากเปรียบเทียบกับวิธีการใช้วงจรสมมูลแบบปกติ วิธีการใหม่ที่นำเสนอนี้ได้เปรียบในเรื่องความสะดวกเนื่องจากไม่มีการทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์แบบต่างๆ รวมถึงการที่ไม่จำเป็นต้องทำการถอดและเคลื่อนย้ายมอเตอร์ออกจากระบบ ตลอดจนความแม่นยำที่ได้จากวิธีการใหม่นี้นั้น มีแนวโน้มว่าจะมีความแม่นยำกว่าวิธีการใช้วงจรสมมูลแบบปกติทั่วไป

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือการทดสอบและนำเสนอ การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสโดยการวัดค่าขณะใช้งานจริง โดยทำการทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟสขนาด 200 W, 400 W, และ 750W โดยแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส (Split-Phase) และแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor-Run and Cpacitor-Start) ในการทดสอบได้ทำการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าภาระโหลดต่างๆ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพ และทำการหาค่าประสิทธิภาพจากวิธีการใหม่ที่นำเสนอนี้ และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีการแบบทั่วไป และทำการปรับปรุงกระบวนการเพื่อให้สามารถประมาณค่าประสิทธิภาพได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการวิจัยโดยมีการกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่างๆเป็นลำดับดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส จากนั้นก็อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบต่างๆ ตลอดจนวิธีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสรวมถึงนำเสนอวงจรสมมูลเพื่อใช้ในการคำนวณหาคุณลักษณะต่างๆ

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการหาประสิทธิภาพแนวใหม่ที่ทำการนำเสนอ ตลอดจนพื้นฐานของกระบวนการการหาค่าที่เหมาะสม และ โอกาสในใช้วิธีการประมาณค่าแบบต่างๆ

บทที่ 4 เสนอผลการทดลองวิธีการหารค่าประสิทธิภาพแบบต่างๆ โดยจะแบ่งเป็น 3 หัวข้อหลักอันได้แก่ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการวัดแรงบิดทางกล, ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้วงจรสมมูล และค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสโดยการวัดค่าขณะใช้งานจริง

บทที่ 5 ทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบแบบต่างๆ สรุปผลการทำงาน ผลที่ได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้ ตลอดจนแนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้เพิ่มเติมรวมถึงแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้และผลประโยชน์ทางอ้อมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย [1-7] โดยกล่าวถึงมอเตอร์ไฟฟ้า 2 ชนิด คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส และแบบคาปาซิเตอร์ 2 ค่า โดยเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีการหมุนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษาและหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

สำหรับโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้น โดยหลักแล้วมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้นมีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือสเตเตอร์ (Stator)ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และ (Rotor)ซึ่งเป็นส่วนเคลื่อนที่(ทำการหมุน) [1-3]

2.1.1 สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์ของมอเตอร์นี้เป็นส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนนี้จะถูกสร้างขึ้นจากแผ่นเหล็กบางที่เคลือบผิวทั้ง 2 หน้าด้วยฉนวนหลายๆแผ่น (Laminated Sheet Steel) นำมาวางเรียงซ้อนกันและอัดขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดของมอเตอร์ตัวนั้นๆ และที่สเตเตอร์นี้จะมีการพันขดลวดอยู่ 2 ขด นั้นขดลวดหลัก (Main Winding) และขดลวดช่วยเริ่มหมุน (Starting Winding)

รูปที่ 2-1 สเตเตอร์ของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 ขดลวดหลัก (Main Winding)

ขดลวดนี้เป็นขดลวดที่ทำงานอยู่ตลอดเวลาที่มอเตอร์นั้นทำการหมุนอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับขดลวดช่วยเริ่มหมุนแล้ว ขดลวดหลักนั้นจะมีค่าความต้านทานที่น้อยกว่า ในการพันนั้นโดยมากแล้วนิยมใช้ลวดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าขดลวดช่วยเริ่มหมุน (ขนาดเบอร์ขดลวดทองแดงของขดลวดหลักจะมีเบอร์ต่ำกว่าเบอร์ขดลวดทองแดงของขดลวดช่วยเริ่มหมุน)

2.1.1.2 ขดลวดช่วยเริ่มหมุน (Starting Winding)

ขดลวดขดนี้จะเป็นชุดขดลวดที่ช่วยให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟสเริ่มทำการหมุนได้ ขดลวดชุดนี้นั้นโดยมากแล้วจะมีค่าความต้านทานมากกว่าขดลวดหลัก และในการพันนิยมใช้ขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าขดลวดหลัก (ขนาดเบอร์มากกว่า) การทำงานของขดลวดชุดนี้นั้นมี 2 ลักษณะ คือ ทำงานเฉพาะช่วงที่มอเตอร์เริ่มออกตัวจนถึงความเร็วประมาณ 75% ของความเร็วพิกัดมอเตอร์ การทำงานแบบนี้นั้นขดลวดช่วยเริ่มหมุนจะต้องต่ออยู่กับสวิทซ์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์ (Centrifugal Switch) เพื่อที่จะเป็นตัวตัดการทำงานเมื่อมอเตอร์ได้ความเร็วรอบถึงตามสวิทซ์ที่ติดตั้งไว้ และอีกแบบหนึ่งคือทำงานตลอดเวลา ในการทำงานแบบนี้นั้นขดลวดช่วยเริ่มหมุนนี้ต่ออยู่กับคาปาซิเตอร์ (Capacitor) ซึ่งในการทำงานแบบนี้นั้นขดลวดช่วยเริ่มหมุนจะทำงานตลอดเวลาที่มอเตอร์ทำงานอยู่

2.1.2 โรเตอร์ (Rotor)

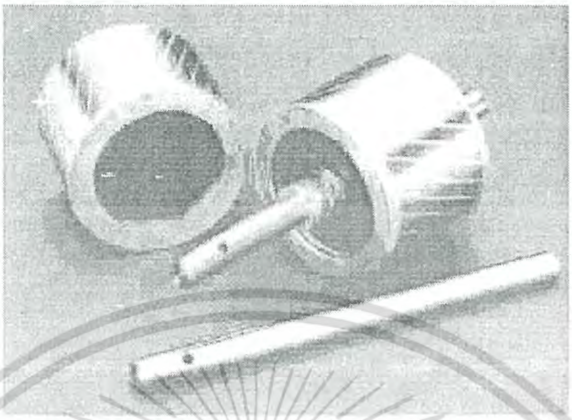
โรเตอร์นั้นเป็นส่วนที่หมุนได้ของมอเตอร์ สำหรับโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) และโรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor) ซึ่งจะมีรายละเอียดแต่ละชนิดดังนี้

2.1.2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor)

โรเตอร์แบบนี้นั้นจะเป็นลักษณะของแท่งตัวนำที่ฝังอยู่ภายในของส่วนหมุนรอบผิวทรงกระบอกของแกนกลม โดยปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำนั้นจะลัดวงจรถึงกันหมดโดยจะมีจำนวณขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนส่วนหมุนเท่ากับจำนวณแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ สำหรับโรเตอร์แบบนี้นั้น จะมีราคาถูก แข็งแรง แต่จะมีแรงบิดเริ่มต้นที่ต่ำ ส่วนหมุนลักษณะนี้ส่วนใหญ่แล้วจะมีแท่นตัวนำฝังลงไปในแนวเฉียงกับร่องสล็อตที่สเตเตอร์ (Skew Slot) เพื่อให้มอเตอร์หมุนได้ราบเรียบยิ่งขึ้น โดยจะไปลดแนวของการยึดจับระหว่างฟัน (Slot Teeth) ที่เป็นแกนเหล็กของส่วนหมุนกับสเตเตอร์ โดยวางลักษณะนี้นั้นเพื่อไปทำการลดค่าแมคเนติกฮัมนั่นเอง (Magnetic Hum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อควรสังเกตสำหรับส่วนหมุนแบบกรงกระรอกนี้ คือ ตัวนำของตัวหมันทุกๆตัวจะถูกลัดวงจรไว้ในตัวเองอย่างถาวร ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะนำความต้านทานภายนอกมาต่อเข้าไปเพื่อเพิ่มแรงบิดทางไฟฟ้าในขณะใช้งาน



รูปที่ 2-2 โรเตอร์แบบกรงกระรอก

2.1.2.2 โรเตอร์แบบพันขดลวดรอบโรเตอร์ (Wound Rotor)

เป็นโรเตอร์ที่มีการพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กไว้ในสล็อตภายนอกรอบๆแกนของโรเตอร์ สำหรับมอเตอร์ประเภทนี้นั้นจะมีข้อจำกัดอยู่บางประการคือจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์ และมีราคาสูงเมื่อเทียบกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก

รูปที่ 2-3 โรเตอร์แบบพันขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำไฟฟ้า 1 เฟสนั้นอาศัยการป้อนพลังงานเข้าที่ขดสเตเตอร์ พลังงานดังกล่าวจะถูกส่งไปยังโรเตอร์โดยอาศัยการเหนี่ยวนำเช่นเดียวกับหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าผ่านช่องว่างอากาศ (Air-gap) ระหว่างมอเตอร์

เมื่อทำการวิเคราะห์มอเตอร์แม่เหล็กแบบ 2 ขั้ว ด้วยอนุกรมฟูเรียร์แล้ว (Fourier Serier) เราจะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กมูลฐาน (Fundanmetal Magneto Motive Force : F_{ag}) รวมอยู่กับฮาร์โมนิตเลขคี่ (Harmonies) โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กมูลฐานนั้นดังสมการที่ 2.1 [4-5]

$$F_{ag} = \frac{4}{\pi}\left(\frac{Ni}{2}\right)\cos\theta_a \qquad (2.1)$$

θ_a คือมุมแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ออกจากสเตเตอร์

i คือกระแสที่ไหลเข้าขดสเตเตอร์

N คือจำนวนแท่งตัวนำบนสเตเตอร์

เมื่อแทน N ในสมการที่ 2.1 ให้อยู่ในรูปการพันขดลวดแล้ว

$$F_{ag} = \frac{4}{\pi}\left(\frac{K_w N_{ph}}{poles}\right) i_a \cos\left(\frac{poles}{2}\theta_a\right) \qquad (2.2)$$

K_w คือแฟคเตอร์ลดทอน โดยจะอยู่ระหว่าง 0.85 ถึง 0.95

เมื่อกระแสเป็นสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$i_a = I_a \cos w_e t \qquad (2.3)$$

และกำหนดให้

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi}\left(\frac{K_w N_{ph}}{poles}\right) Ia \qquad (2.4)$$

แทนสมการที่ 2.3 และ 2.4 ลงในสมการที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{ag} = F_{\max} \cos\left(\frac{poles}{2}\theta_a\right)\cos w_e t \tag{2.5}$$

$$F_{ag} = F_{\max} \cos(\theta_{ae})\cos w_e t \tag{2.6}$$

จากสมการ $\cos\alpha\cos\beta = \frac{1}{2}\cos(\alpha-\beta) + \frac{1}{2}\cos(\alpha+\beta)$

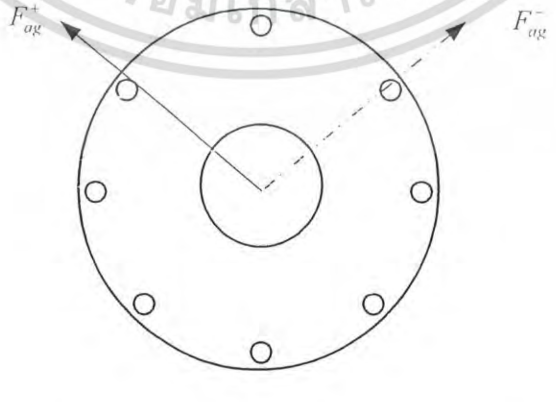
$$F_{ag} = F_{\max}\left[\frac{1}{2}\cos(\theta_{ae} - w_e t) + \frac{1}{2}\cos(\theta_{ae} + w_e t)\right] \tag{2.7}$$

จากสมการที่ 2.7 จะพบว่าจะมีสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนามหมุนสวนทางกันอยู่ โดยสนามแม่เหล็กหมุนทั้ง 2 สนามนี้ต่างมีค่ายอดคลื่น (Amplitude) ที่เท่ากันโดยเป็นครึ่งหนึ่งของ F_{ag} โดย F_{ag}^{+} จะมีทิศทางบวก (Positive) และ F_{ag}^{-} จะมีทิศทางเป็นลบ (Negative) โดยแรงทั้ง 2 แสดงดังสมการที่ 2.8-2.9

$$F_{ag}^{+} = \frac{1}{2}F_{\max}\cos(\theta_{ae} - w_e t) \tag{2.8}$$

$$F_{ag}^{-} = \frac{1}{2}F_{\max}\cos(\theta_{ae} + w_e t) \tag{2.9}$$

จากสมการแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ถ้าทำการพิจารณาในสภาวะที่มอเตอร์เริ่มออกตัว (ความเร็วรอบเท่ากับศูนย์) จะพบว่าแรงที่ไปในทางบวกและลบนั้นต่างมีค่าเท่ากัน มอเตอร์นั้นจะอยู่ในสภาวะสมดุล ทำให้มอเตอร์ไม่สามารถที่จะออกตัวได้ และโรเตอร์จะมีการสั่นเกิดขึ้น



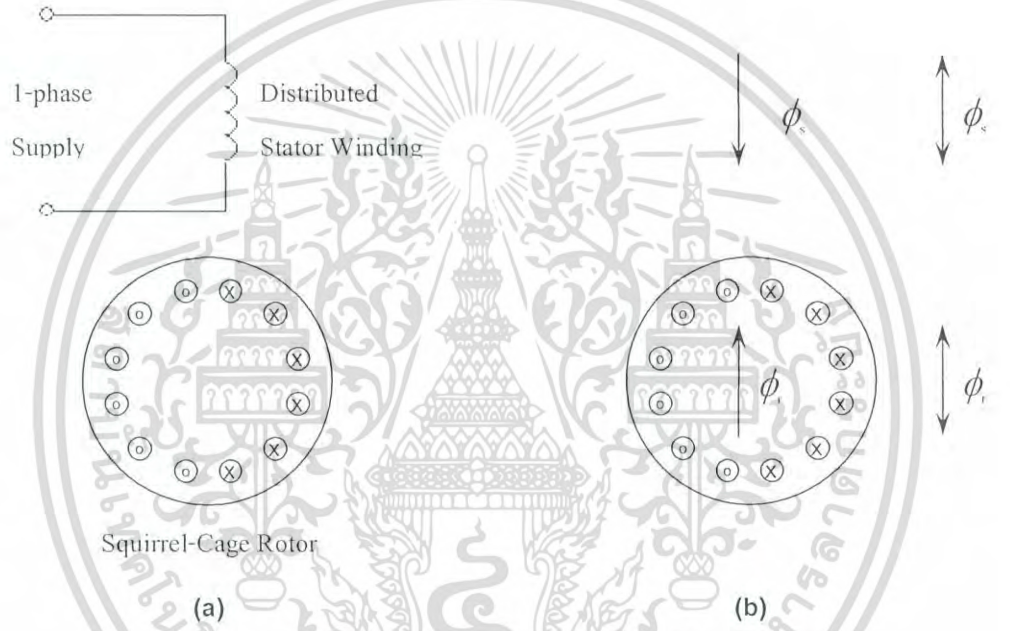
รูปที่ 2-4 สนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้นไม่สามารถที่จะทำการเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเองจึงจำเป็นที่จะต้องมีขดลวดช่วยเริ่มหมุนเข้ามา โดยที่ขดลวดช่วยเริ่มหมุนนี้จะเป็นตัวช่วยให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสนี้จำลองตัวเองเป็นมอเตอร์สองเฟสแบบไม่สมมาตร (Unbalance-Two Phase Motor) แต่ถ้าทำการพิจารณาที่ความเร็วรอบอื่น จะพบว่าแรงในทิศทางบวกและลบนั้นมีค่าไม่เท่ากัน มอเตอร์จึงสามารถหมุนได้ตามปกติ

2.2.1 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนาม (Double revolving field theory)

หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้น สามารถอธิบายได้โดยการวิเคราะห์ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนามดังนี้ [1,6]



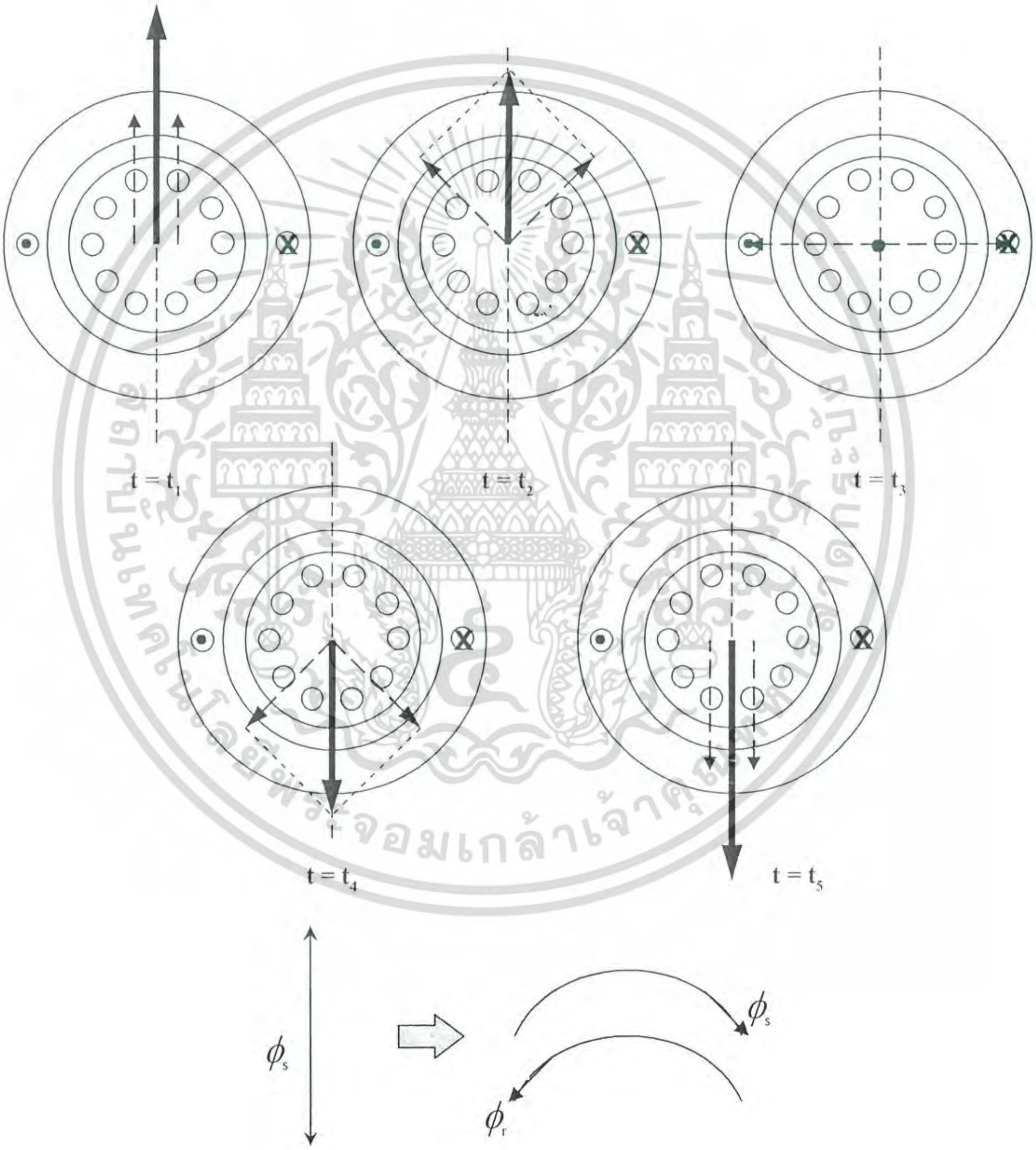
รูปที่ 2-5 พัลส์เส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

ในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่งอยู่กับที่และขดลวดที่สเตเตอร์มีเฉพาะขดลวดหลักอย่างเดียว เมื่อทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว จะทำให้เกิดพัลส์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Pulsating MMF) ϕ_s ดังแสดงในรูปที่ 2-5b โดยเกิดขึ้นในแนวแกนของขดลวดสเตเตอร์ โดยพัลส์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสในวงจรโรเตอร์ ทำให้เกิดพัลส์เส้นแรงแม่เหล็กที่ในแนวแกนของโรเตอร์ ϕ_r ซึ่งอยู่ในแกนเดียวกับแกนของสเตเตอร์ จากกฎของเลนซ์จะได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองนี้จะต้านซึ่งกันและกัน และเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองอยู่ในแนวแกนเดียวกัน จึงทำให้ไม่มีแรงบิดขณะ สตาร์ทเกิดขึ้น ดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวจึงไม่สามารถสตาร์ทด้วยตัวเอง สำหรับวิธีการช่วยสตาร์ท เช่น การเพิ่มขดลวดช่วยสตาร์ทที่สเตเตอร์ทำให้มอเตอร์ทำงานเหมือนกับมอเตอร์แบบสองเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุนคู่ เส้นแรงแม่เหล็กหรือแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ϕ_S สามารถแบ่งออกเป็นเส้นแรงแม่เหล็กหรือแรงเคลื่อนแม่เหล็กทิศทางบวก (Forward flux) กับเส้นแรงแม่เหล็กหรือแรงเคลื่อนแม่เหล็กทิศทางลบ (Backward flux) หมุนในช่องอากาศในทิศทางตรงข้ามกันดังรูปที่ 2-6

เมื่อมอเตอร์ถูกทำให้หมุนไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง โดยการช่วยหมุนด้วยวิธีต่าง ๆ จะพบว่าเส้นแรงแม่เหล็กหรือแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ϕ_S เหนี่ยวนำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กหรือแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์ ϕ_r เกิดขึ้น



รูปที่ 2-6 ทิศทางของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติโรเตอร์หมุนที่ความเร็ว (Rotor . Speed) n_r รอบต่อนาที ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนทิศทางบวก และความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) คือ n_s รอบต่อนาที ดังนั้นความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสและความเร็วรอบของโรเตอร์ เรียกว่า สลิป (Slip) โดยสลิปเมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็กหมุนทิศทางบวกคือ

$$s_f = \frac{n_s - n_r}{n_s} = s \tag{2.10}$$

การหมุนของโรเตอร์จะหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางสนามแม่เหล็กหมุนทิศทางลบ ดังนั้นความเร็วของโรเตอร์จะเป็นลบเมื่อเทียบกับสนามนี้ ดังนั้นสลิปเมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็กหมุนทิศทางลบคือ

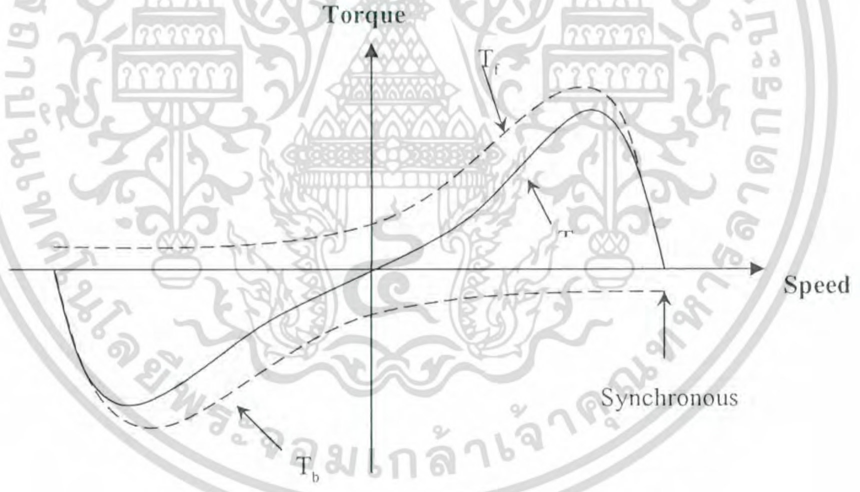
$$s_b = \frac{n_s - (-n_r)}{n_s} = 2 - s \tag{2.11}$$

รูปที่ 2-7 วงจรสมมูลของโรเตอร์

วงจรสมมูลของโรเตอร์สำหรับเส้นแรงแม่เหล็กหมุนทิศทางบวกและทิศทางลบแสดงในรูปที่ 2-7 ในขณะมอเตอร์หยุดนิ่ง สลิปมีค่าเป็นหนึ่งทำให้อิมพิแดนซ์ของวงจรสมมูลทั้งสองจะเท่ากัน และดังนั้นกระแสโรเตอร์ที่ถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กหมุนทิศทางบวกจะเท่ากับกระแสโรเตอร์ที่ถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กหมุนทิศทางลบ ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กของเส้นแรงแม่เหล็กทิศทางบวกและทิศทางลบของโรเตอร์เท่ากันเนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์ จึงทำให้แรงบิดทิศทางบวกและทิศทางลบเท่ากันนั้นคือมอเตอร์ไม่สามารถออกตัวได้

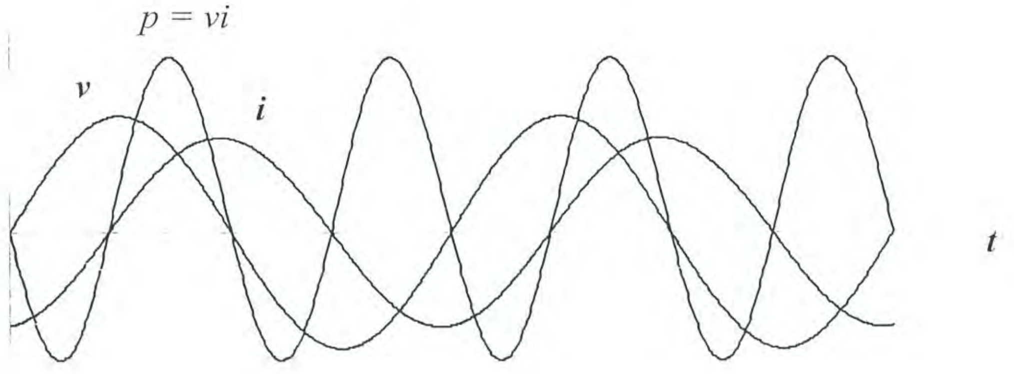
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาในขณะที่มอเตอร์กำลังหมุน ค่าสลิปจะน้อยกว่าขณะหยุดนิ่งทำให้ค่าอิมพิแดนซ์ของวงจรโรเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน โดยอิมพิแดนซ์ของวงจรสำหรับเส้นแรงแม่เหล็กทิศทางบวกจะมากกว่าของวงจรเส้นแรงแม่เหล็กทิศทางลบ ทำให้กระแสโรเตอร์ที่ถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กหมุนทิศทางบวกจะน้อยกว่ากระแสโรเตอร์ที่ถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กหมุนทิศทางลบ และจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กของเส้นแรงแม่เหล็กทิศทางบวกและเส้นแรงแม่เหล็กทิศทางลบของวงจรสเตเตอร์จะคงที่และมีขนาดเท่ากันเสมอ คือ $0.5F_{max}$ ถ้าพิจารณาด้วยกฎของเลนซ์จะพบว่า แรงต้านจากโรเตอร์ในทิศทางบวกนั้นน้อยกว่าแรงต้านจากโรเตอร์ในทิศทางลบ ทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางบวก และเมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์สูงขึ้นก็จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กหมุนทิศทางบวกเพิ่มขึ้นในขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กแม่เหล็กหมุนทิศทางลบลดลง แต่ผลรวมลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กจะคงที่เสมอเพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันในขดลวดสเตเตอร์ซึ่งมีขนาดเกือบจะเท่ากับขนาดแรงดันของแหล่งจ่าย (ถ้าแรงดันตกคร่อมความต้านทานและรีแอคแตนซ์รั่วไหล มีค่าน้อยมาก) ดังนั้นในขณะที่โรเตอร์กำลังหมุนจะทำให้แรงบิดทิศทางบวกเพิ่มขึ้นในขณะที่แรงบิดทิศทางลบลดลง ดังนั้นถ้ามอเตอร์ถูกทำให้หมุนแล้วเราสามารถปลดขดลวดขดช่วย สตาร์ทออกได้ โดยมอเตอร์จะยังคงหมุนต่อไป สำหรับรูปที่ 2-8 แสดงรูปคลื่นของโวลท์เตจ กระแส และกำลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว



รูป 2-8 กราฟคุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

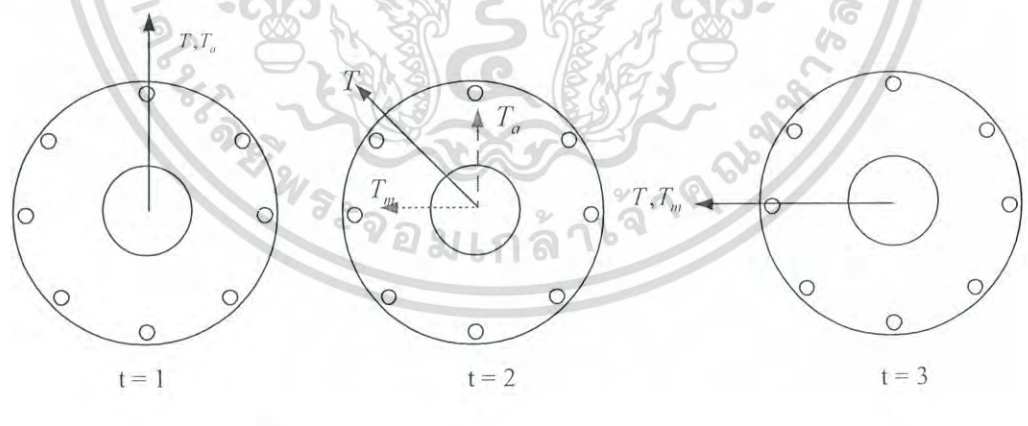
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2-9 รูปคลื่นของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

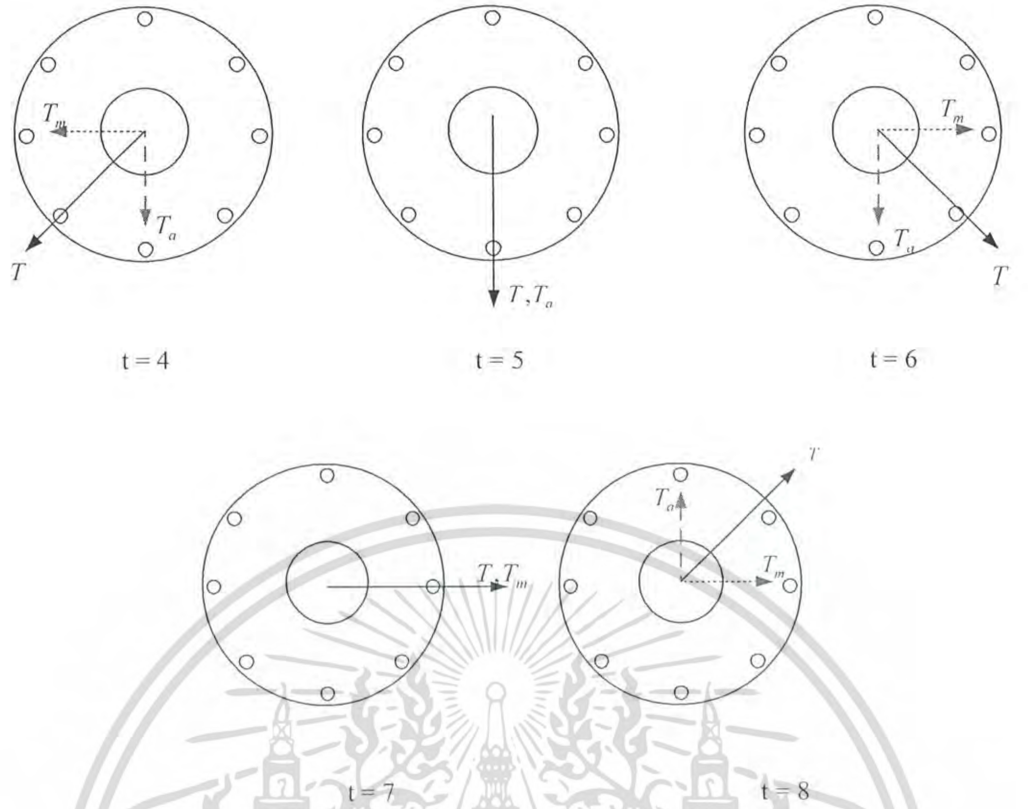
2.2.2 การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้น ไม่สามารถที่จะออกตัวได้ด้วยตัวเองจึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการของทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนาม โดยเมื่อแหล่งจ่าย (Source) เป็นสัญญาณไซน์ (Sine Wave) ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะส่งผลให้กระแสนั้นเป็นไปในลักษณะของสัญญาณไซน์ด้วย และเนื่องจากแรงบิดแม่เหล็กนั้นขึ้นอยู่กับค่าของกระแสไฟฟ้า จึงทำให้แรงบิดแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดแต่ละขดมีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์อันเนื่องมาจากผลของกระแส แรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงสุดของขดลวดหลักและขดลวดช่วยเริ่มหมุนเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน โดยจะยกตัวอย่างเป็นเวคเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ขดลวดหลักและขดลวดช่วยเริ่มหมุนมีมุมทางไฟฟ้าต่างกัน 90° ซึ่งขั้นตอนการเริ่มหมุนนั้นแสดงดังรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 กระบวนการเริ่มหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-10(ต่อ)

ที่เวลา t = 1 แรงบิดแม่เหล็กที่ขดลวดช่วยมีค่าสูงสุดและแรงบิดแม่เหล็กที่ขดลวดหลักมีค่าเป็นศูนย์

ที่เวลา t = 2 แรงบิดแม่เหล็กที่ขดลวดทั้ง 2 มีค่าเท่ากัน ทำให้เกิดแรงรับในทิศทางที่เป็นผลรวมทางเวคเตอร์ระหว่างขดทั้งสอง

ที่เวลา t = 3 แรงบิดแม่เหล็กที่ขดลวดหลักที่ค่าสูงสุดและแรงบิดแม่เหล็กที่ขดลวดช่วยมีค่าเป็นศูนย์

ที่เวลา t = 4 แรงบิดแม่เหล็กของขดลวดช่วยเกิดการกลับเฟส และมีค่าเท่ากับแรงบิดแม่เหล็กของขดลวดหลัก ทำให้เกิดแรงลัพธ์ที่เป็นผลรวมทางเวคเตอร์ระหว่างขดทั้งสอง

ที่เวลา t = 5 แรงบิดแม่เหล็กของขดลวดช่วยมีค่าสูงสุดและแรงบิดแม่เหล็กของขดลวดหลักมีค่าเป็นศูนย์

ที่เวลา t = 6 แรงบิดแม่เหล็กของขดลวดหลักเกิดการกลับเฟสและมีค่าเท่ากับแรงบิดแม่เหล็กที่ขดลวดช่วย ทำให้เกิดแรงลัพธ์ที่เป็นผลรวมทางเวคเตอร์ระหว่างขดทั้งสอง

ที่เวลา t = 7 แรงบิดแม่เหล็กของขดลวดหลักมีค่าสูงสุดและแรงบิดแม่เหล็กของขดลวดช่วยมีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เวลา t = 8 แรงบิดแม่เหล็กของขดลวดช่วยเกิดการกลับเฟสอีก 1 ครั้งและมีค่าเท่ากับแรงบิดแม่เหล็กของขดลวดหลัก ทำให้เกิดแรงลัพธ์ที่เป็นผลรวมทางเวคเตอร์ระหว่างขดทั้งสอง

ที่เวลา t = 9 แรงบิดแม่เหล็กของขดลวดช่วยมีค่าสูงสุดและแรงบิดแม่เหล็กของขดลวดหลักมีค่าเท่ากับศูนย์และแรงบิดแม่เหล็กของขดลวดหลักกำลังจะกลับเฟส

หลังจากที่มอเตอร์ได้ออกตัวเริ่มหมุนไปแล้วนั้น เราสามารถที่จะทำการตัวขดลวดช่วยเริ่มหมุนออกจากวงจรได้ โดยที่มอเตอร์นั้นสามารถหมุนต่อไปได้แม้จะไม่มีขดลวดช่วยเริ่มหมุนแล้วก็ตามดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2.1

2.2.3 แรงบิดขณะสตาร์ท

พิจารณาการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ขดลวดของสเตเตอร์ทั้ง 2 ขด และกระแสที่ไหลภายในขดลวดแสดงในรูป 2-11 (a) โรเตอร์สามารถแทนได้ด้วยขดลวดสองเฟสเสมือน แทนด้วยขดลวด a-b และ c-d สมมุติว่าขดลวดแต่ละขดมีจำนวนรอบเท่ากับ N_2 และมีความต้านทานเท่ากับ R_2 และมีรีแอคแตนซ์เท่ากับ X_2 (ที่ความถี่สเตเตอร์) กระแสที่ไหลผ่านขดลวดหลักจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันเท่ากับ e_{2m} (โดยวิธีการแบบเดียวกับในหม้อแปลงไฟฟ้า) และกระแส i_{2m} ในขดลวด a-b ของโรเตอร์กระแส i_{2m} จะไหลในทิศทางที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาในทิศที่จะต่อต้านกับเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_m ในทำนองเดียวกัน ϕ_m ในขดลวดช่วย จะเหนี่ยวนำโวลท์เตจ e_{2a} และกระแส i_{2a} ในขดลวด c-d ของโรเตอร์

$$E_{2m} = 4.44 f N_2 \phi_m \tag{2.12}$$

$$E_{2a} = 4.44 f N_2 \phi_a \tag{2.13}$$

กระแส i_m ล้าหลัง e_{2m} และ i_{2a} ล้าหลัง e_{2a} ไปเป็นมุม θ_2 โดยที่

$$\cos\theta_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{Z_2} \tag{2.14}$$

เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเส้นแรงแม่เหล็ก แรงดัน และกระแส แสดงดังรูปที่ 2.11 (b) สังเกตว่าแรงบิดที่เกิดขึ้น (Develop Torque) จากการกระทำระหว่าง ϕ_m กับ i_{2a} และหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาแรงบิดอีกอันหนึ่งเกิดจากกระแสระหว่าง ϕ_a และ i_{2m} และกระทำในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แต่จะไม่มีแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการกระทำระหว่างกันระหว่าง ϕ_m และ i_{2m} หรือ ϕ_a และ i_{2a} จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$
\begin{aligned}
T_m \quad &\alpha \quad \phi_m I_{2a} \cos\angle\phi_m, I_{2a} \\
&\alpha \quad \phi_m I_{2a} \cos(90+\theta_2-\alpha)
\end{aligned} \tag{2.15}
$$

แรงบิดที่เกิดจาก ϕ_a และ i_{2m} คือ

$$
\begin{aligned}
T_a \quad &\alpha \quad \phi_a I_{2m} \cos\angle\phi_a, I_{2m} \\
&\alpha \quad \phi_a I_{2m} \cos(90+\theta_2+\alpha)
\end{aligned} \tag{2.16}
$$

แรงลัพธ์ขณะสตาร์ทคือ

$$T \quad \alpha \quad [\phi_m I_{2a} \cos(90+\theta_2-\alpha) - \phi_a I_{2m} \cos(90+\theta_2+\alpha)] \tag{2.17}$$

แต่

$$\frac{\phi_m}{\phi_a} = \frac{E_{2m}}{E_{2a}} = \frac{I_{2m}}{I_{2a}} \tag{2.18}$$

หรือ

$$\phi_m I_{2a} = \phi_a I_{2m} \tag{2.19}$$

ดังนั้น

$$T \quad \alpha \quad I_{2m} I_{2a} R_2 \cos(\theta_2) \tag{2.20}$$

เพราะฉะนั้น

$$T \quad \alpha \quad I_{2m} I_{2a} R_2 \sin(\alpha) / 4.44 fN_2 \tag{2.21}$$

จากทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้า I_{2m} เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ I_m และ I_{2a} เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ I_a ดังนั้น

$$T_a \quad \alpha \quad I_m I_a \sin(\alpha) \tag{2.22}$$

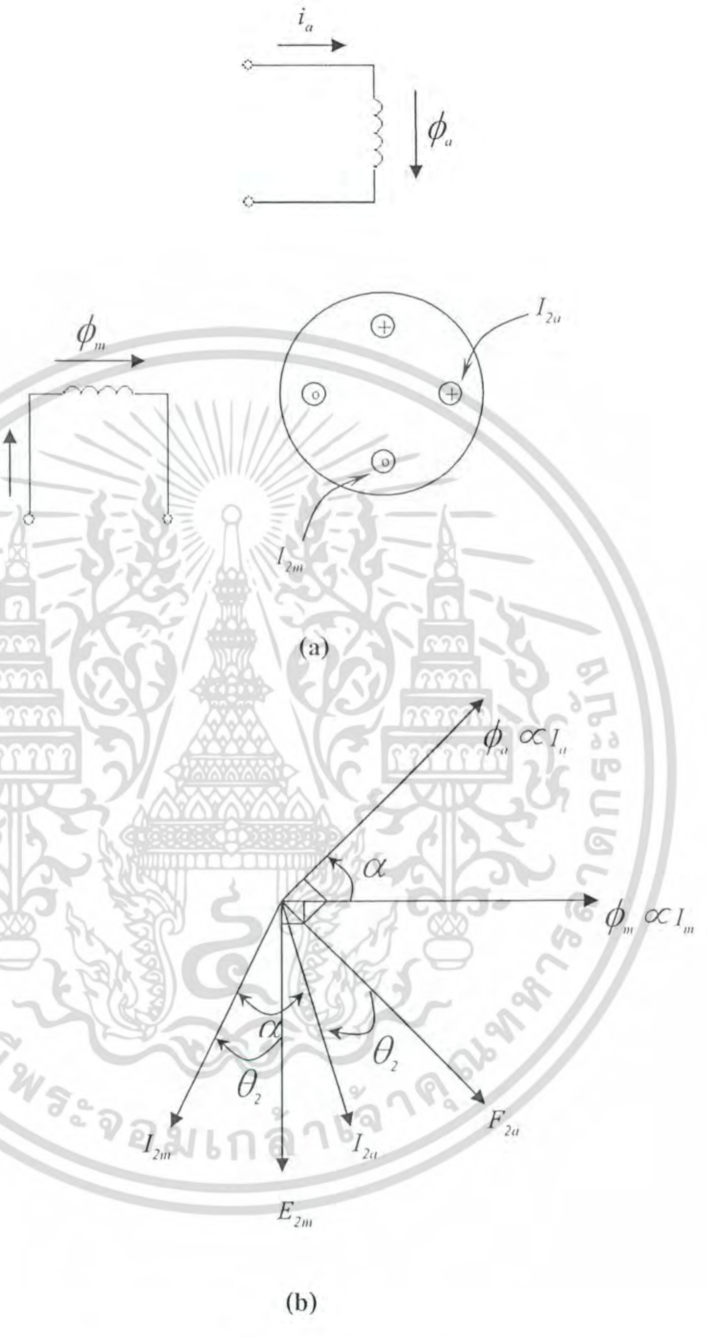
หรือ

$$T_a \quad = \quad KI_m I_a \sin(\alpha) \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จากสมการ จะเห็นได้ว่าแรงบิดขณะสตาร์ทขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสในขดลวดหลัก และขดลวดช่วย และความแตกต่างระหว่างมุมของกระแสทั้งสอง



รูปที่ 2-11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมขณะสตาร์ท

75120
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

เมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส ขอลวดที่อยู่ภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส จะทำการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นโดยมีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส โดยความเร็วซิงโครนัสหาได้จาก

$$n_s = \frac{120f}{P} \tag{2.24}$$

โดย n_s ความเร็วซิงโครนัส รอบ/นาที
f ความถี่ไฟฟ้า
P จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จากสมการข้างต้นความเร็วซิงโครนัสจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ จำนวนขั้วแม่เหล็ก โดยเพิ่มความถี่ความเร็วซิงโครนัสจะมากขึ้น ถ้าลดจำนวนขั้วแม่เหล็ก ความเร็วก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนี้จะทำการเหนี่ยวนำโรเตอร์ให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ขึ้นมาส่งผลให้เกิดแรงบิดในโรเตอร์ขึ้นให้ให้โรเตอร์นั้นเกิดการหมุนโดยความเร็วโรเตอร์ (n_r) สามารถวัดได้ที่เพลาของมอเตอร์ โดยความเร็วโรเตอร์จะมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเสมอ เพราะถ้าความเร็วโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัสแล้วจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำ ทำให้มอเตอร์ไม่หมุนผลต่างของความเร็วซิงโครนัสกับความเร็วโรเตอร์เรียกว่า สลิป $(slip)$

ค่าของสลิปจะอยู่ในรูปของร้อยละเมื่อเทียบกับความเร็วซิงโครนัส ดังสมการต่อไปนี้

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \tag{2.25}$$

$$\%s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \tag{2.26}$$

s สลิป

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีภาระ จะถือว่าความเร็วซิงโครนัสเท่ากับความเร็วโรเตอร์ เมื่อเป็นเช่นนี้ค่าสลิปจะมีค่าเท่ากับ ศูนย์และเมื่อโรเตอร์ถูกล็อก ค่าสลิปจะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 100% ดังนั้นจึงจะสามารถหาความเร็วโรเตอร์ที่มีค่าความเร็วซิงโครนัสและสลิปเป็นตัวแปรได้

$$n_r = (1-s)n_s \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในส่วนของความถี่ของโรเตอร์ (f_r) สามารถหาได้จากสมการที่มีค่าสลิปเป็นตัวแปรในการหา

$$f_r = sf_s \tag{2.28}$$

ความเร็วของโรเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับภาระที่มอเตอร์ต้องทำการขับ ถ้ามอเตอร์ทำการขับภาระมากขึ้นจำส่งผลให้ความเร็วของโรเตอร์นั้นมีค่าลดลงจะเกิดการเหนี่ยวนำที่โรเตอร์มากขึ้นส่งผลให้กระแสที่ไหลในโรเตอร์มีค่ามากขึ้นทำให้แรงบิดขาออกของมอเตอร์นั้นมีค่ามากขึ้น แต่การที่เกิดการเหนี่ยวนำที่โรเตอร์มากขึ้นนี้จะส่งผลไปยังสเตเตอร์ โดยอาศัยทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้ามาช่วยวิเคราะห์จะพบว่า โรเตอร์นั้นเปรียบเสมือนกับขดลวดทางด้านจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Secondary Winding) และสเตเตอร์ของมอเตอร์นั้นเปรียบเหมือนขดลวดด้านรับไฟข้าวของหม้อแปลงไฟฟ้า (Primary Winding) เมื่อโรเตอร์ทำการเหนี่ยวนำมากขึ้นทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์เพิ่มขึ้น จะส่งผลไปยังขดลวดด้านต้นซึ่งในที่นี้คือสเตเตอร์ทำให้สเตเตอร์ต้องทำการดึงกระแสเพิ่มมากขึ้น เพื่อที่จะได้มีกระแสและกำลังไฟฟ้ามากพอส่งผ่านไปยังโรเตอร์

เมื่อพิจารณาโครงสร้างและการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟสแล้ว พบว่ามีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยมีการสูญเสียต่างๆดังนี้

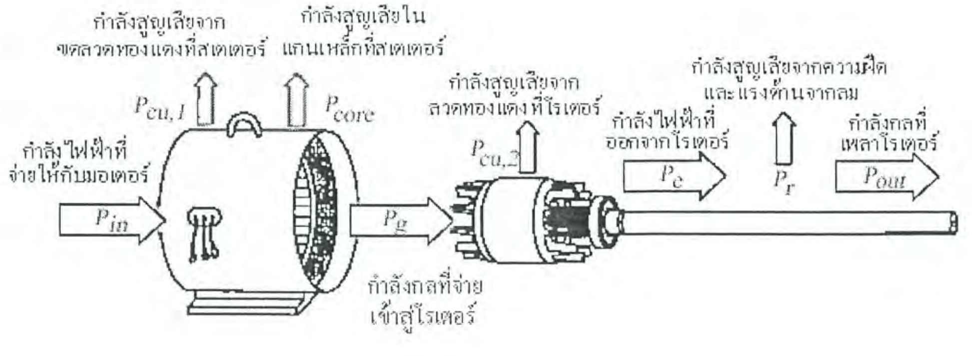
1. การสูญเสียที่สเตเตอร์ ประกอบด้วยการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss : P_{core}) ซึ่งหมายถึง Eddy Current และ Hystersis ที่แกนเหล็กสเตเตอร์และเกิดการสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (Stator Copper Loss : P_{cu1})

2. การสูญเสียที่โรเตอร์ จะเกิดการสูญเสียที่ขดลวดมอเตอร์ (Rotor Copper Loss : P_{cu2})

3. การสูญเสียทางกล เป็นการสูญเสียจากการฝืดและแรงต้านจากลม (Friction& Windage Loss : P_r)

กำลังขาออกของมอเตอร์จะเกิดจาก กำลังไฟฟ้าอินพุท (Input Power) – การสูญเสียรวมทั้งหมด (Total Loss) โดยลำดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้านั้นแสดงดังรูปที่ 2-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-12 การส่งผ่านกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส

2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบต่างๆ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ ถูกออกแบบตามมาตรฐาน class ต่างๆเพื่อให้ได้คุณสมบัติในการสตาร์ทและทำงานปกติที่ดีตามลักษณะการใช้งานต่างๆ ได้แบ่งการออกแบบได้ดังนี้ [7-8]

Design class A: มีแรงบิดขณะสตาร์ทปกติ ขนาดกระแสสตาร์ทปกติมีค่าสลิปต่ำ ซึ่งการออกแบบใน class นี้โรเตอร์จะเป็นแบบ single cage และมีความต้านทานต่ำมีคุณสมบัติขณะทำงานที่ดี ขณะโหลดพิกัดมีค่า slip ต่ำและประสิทธิภาพสูง แรงบิดสูงสุดประมาณ 200 เปอร์เซ็นต์ ของแรงบิดขณะโหลดพิกัด และเกิดขึ้นได้ในขณะที่ สลิปน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ แรงบิดที่แรงดันพิกัดจะมีค่าอยู่ประมาณ 200 เปอร์เซ็นต์ (มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็ก) ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ (มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่) ของแรงบิดโหลดพิกัด มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้รับการออกแบบ class A มีข้อเสียคือ มีกระแสขณะสตาร์ทสูง (500- 800 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด)

Design class B: มีแรงบิดขณะสตาร์ทปกติ มีค่าสลิปต่ำ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบใน class นี้ จะมีแรงบิดขณะสตาร์ทเช่นเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำใน class A โดยที่กระแสสตาร์ทมีค่าประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ (ของ class A) ดังนั้นจึงสามารถสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ (เมื่อเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำใน class A) ด้วยแรงดันพิกัดได้จากการที่ออกแบบให้มีลีคเกจรีแอคแตนซ์สูงทำให้กระแสในขณะสตาร์ทต่ำ ในขณะโหลดพิกัดสลิปต่ำและประสิทธิภาพดีเช่นเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำใน class A แต่เนื่องจาก ลีคเกจรีแอคแตนซ์สูง จึงทำให้ power factor ลดลงและแรงบิดสูงสุดต่ำ (อยู่ประมาณ 200 เปอร์เซ็นต์ ของแรงบิดขณะโหลดพิกัด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design class C: มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูง, ขนาดกระแสขณะสตาร์ทต่ำ มอเตอร์เหนี่ยวนำออกแบบใน class นี้มีโรเตอร์ แบบ double-cage ค่าความต้านทานสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบใน class B, ประสิทธิภาพขณะทำงานปกติต่ำกว่าและมีสลิปสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำใน class A, B.

Design class D: มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูง, slip สูง มอเตอร์เหนี่ยวนำในการออกแบบ class นี้ ปกติมีโรเตอร์แบบ single-cage และความต้านทานสูง (เช่นทองเหลือง) ซึ่งให้แรงบิดขณะสตาร์ทสูง กระแสขณะสตาร์ทต่ำ slip ขณะที่เกิดแรงบิดสูงสุดจะมีค่าอยู่ประมาณ 50-100 เปอร์เซ็นต์และหมุนด้วย slip สูง (ขณะโหลดพิกัด) ประมาณ 7-11 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพทำงานปกติต่ำ

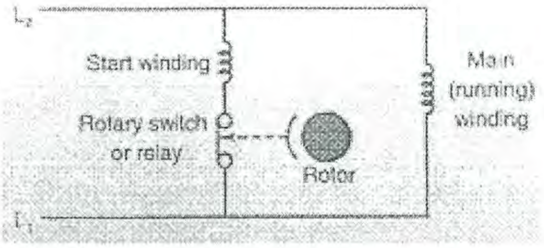
นอกจากนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีด้วยกันหลายชนิด โดยแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้ คือ

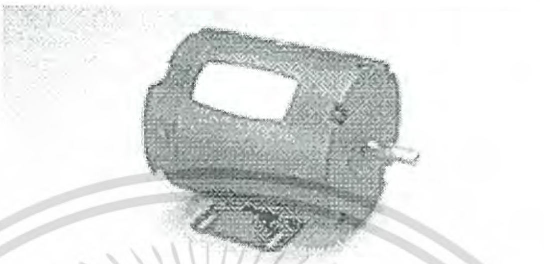
2.3.1 มอเตอร์แยกเฟส (Split phase motor)

ในขณะที่ป้อนแรงดันไฟสลับให้กับมอเตอร์ ขดลวดทั้งสองของมอเตอร์คือขดสตาร์ทและขดรันจะต่อขนานกันตอนเริ่มทำงาน เนื่องจากขดรันพันด้วยลวดเส้นใหญ่ ความต้านทานจะต่ำและขดรันนี้จะพันอยู่ด้านล่างของสล็อต ดังนั้นอินดักแตนซ์จะสูง ทำให้กระแสไฟที่ไหลผ่านขดรันล้าหลังแรงดันที่ป้อนให้เกือบ 90 องศาไฟฟ้า ส่วนกระแสไฟที่ไหลผ่านขดสตาร์ทเกือบจะมีเฟสเดียวกันกับแรงดันที่ป้อนให้เนื่องจาก ขดสตาร์ทพันด้วยลวดเส้นเล็กจึงมีความต้านทานสูงและขดสตาร์ทจะพันอยู่ด้านบนของสล็อตจึงทำให้อินดักแตนซ์ต่ำ ดังนั้น จึงทำให้กระแสเกือบจะมีเฟสเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์

กระแสไหลผ่านขดรันและขดสตาร์ทจะมีมุมต่างเฟสกันเกือบ 90 องศาไฟฟ้า และกระแสไฟทั้งสองส่วนนี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในลักษณะเดียวกับมอเตอร์ไฟสลับสองเฟส สนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์นี้จะตัดกับตัวนำในโรเตอร์ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาที่โรเตอร์และทำให้เกิดแรงบิดขึ้นมาที่โรเตอร์ทำให้โรเตอร์หมุนได้ สำหรับทิศทางการหมุนของโรเตอร์จะหมุนไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ ขณะที่มอเตอร์กำลังเร่งความเร็วขึ้นเรื่อยๆ สวิตช์เซนตริฟูกัลจะยังต่อวงจรขดสตาร์ทอยู่จนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์สูงขึ้นประมาณ 75% ของความเร็วเต็มพิกัด สวิตช์เซนตริฟูกัลจะตัดวงจรขดสตาร์ทออก และปล่อยให้ขดรันทำงานต่อไปเพียงชุดเดียว [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2-13 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบแยกเฟส

2.3.2 มอเตอร์ชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor start motor)

มอเตอร์ชนิดนี้มีส่วนประกอบเหมือนกับมอเตอร์สปลิทเฟส และมีตัวเก็บประจุเพิ่มเข้ามาในวงจรมอเตอร์เพื่อเพิ่มแรงบิดในตอนสตาร์ทให้สูงขึ้น ตัวเก็บประจุจะต่อร่วมอยู่กับวงจรขดสตาร์ทโดยต่ออันดับกับขดสตาร์ท ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้จึงเป็นชนิดอิเล็กทรอไลติกเพราะต้องการให้ต่ออยู่ในวงจรเพียงช่วงเวลาสตาร์ทเท่านั้น

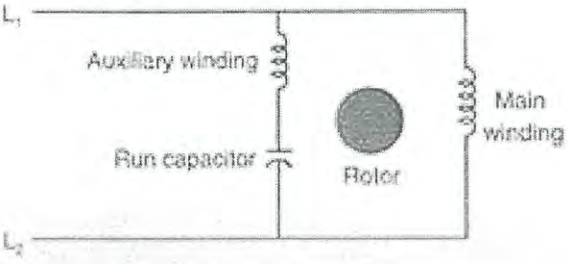
การที่ต่อตัวเก็บประจุเข้ากับวงจรขดสตาร์ทจะทำให้กระแสที่ไหลผ่านขดสตาร์ทนำหน้าแรงดัน และทำให้กระแสขดสตาร์ทและกระแสขดรันมีมุมต่างเฟสมากขึ้นเกือบถึง 90 องศาไฟฟ้า จึงเป็นเหตุที่ทำให้แรงบิดขณะสตาร์ทสูงขึ้น เนื่องจากมุมต่างเฟสของกระแสขดสตาร์ทและขดรัน [2]

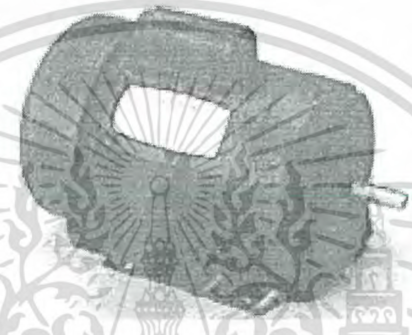
2.3.3 มอเตอร์ชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor run motor)

ตัวเก็บประจุ ที่ใช้จะเป็นชนิดบรรจุน้ำมันและต่ออันดับกับขดสตาร์ทตลอดเวลาโดยไม่มีสวิตส์เซนตริฟูกัลเหมือนกับมอเตอร์คาปาซิเตอร์แบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท ดังนั้นขณะเริ่มเดินตลอดจนมอเตอร์ทำงานเต็มพิกัดจะมีตัวเก็บประจุต่อร่วมกับขดสตาร์ทตลอดเวลา จึงทำให้แรงบิดทั้งขณะ สตาร์ทและเวลาทำงานดีสม่ำเสมอโดยตลอด และค่าตัวประกอบกำลังขณะทำงานที่โหลดเต็มพิกัดจะมีค่าสูงมาก ขณะทำงานจะไม่มีเสียงดังเหมือนมอเตอร์แบบอื่น มอเตอร์จะหมุนเรียบมาก ซึ่งโครงสร้างและลักษณะวงจรแบบนี้สามารถลดต้นทุนให้ต่ำลงได้ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีสวิตช์แรงเหวี่ยง ที่สำคัญโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ทำให้สามารถปรับปรุงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบกำลัง การสั่น และประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้ดีขึ้นเนื่องจากมอเตอร์ทำงานเป็นแบบมอเตอร์สองเฟส ซึ่งทำให้หมุนได้เรียบขึ้น [2]





รูปที่ 2-14 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

สำหรับการต่อให้หมุนกลับทิศทางนั้นสามารถปฏิบัติได้เช่นเดียวกับมอเตอร์สปลิทเฟส และมอเตอร์คาปาซิเตอร์แบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท ขดลวดชุดสตาร์ทและขดรันจะพันด้วยเส้นลวดที่มีขนาดใกล้เคียงกัน

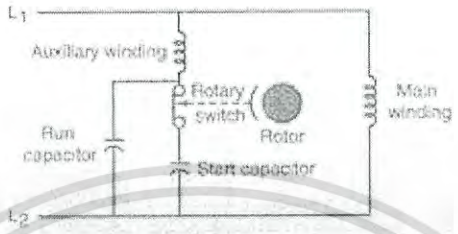
2.3.4 มอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor start capacitor run motor)

โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้จะมีตัวเก็บประจุสองตัวประกอบอยู่ในวงจร โดยที่ตัวแรกจะใช้เพื่อการเริ่มหมุน ส่วนอีกตัวหนึ่งใช้ขณะมอเตอร์หมุน ตัวเก็บประจุเริ่มหมุนจะมีขนาดใหญ่และเป็นชนิด AC Electrolytic ส่วนตัวเก็บประจุขณะมอเตอร์หมุนถูกต่ออนุกรมอย่างถาวรกับขดลวดเริ่มหมุนซึ่งมีขนาดเล็กเป็นชนิด Paper oil ตัวเก็บประจุ ที่ใช้กับมอเตอร์แบบนี้มีทั้งชนิดบรรจุน้ำมันและชนิดอิเล็กทรอไลติก โดยที่ตัวเก็บประจุทั้งสองตัวนี้จะต่อขนานกันก่อนแล้วจึงนำไปต่ออันดับกับขดสตาร์ทของมอเตอร์ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กทรอไลติกจะต่ออันดับกับ สวิตส์เซนตริฟูกัลก่อนที่จะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ชนิดบรรจุน้ำมัน ดังนั้นตัวเก็บประจุชนิดบรรจุน้ำมันจะต่ออันดับอยู่กับวงจรสตาร์ทตลอดเวลาที่มอเตอร์ทำงาน ส่วนตัวเก็บประจุชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอไลติกจะต่ออันดับอยู่กับขดสตาร์ทก็เฉพาะในช่วงสตาร์ทเท่านั้น เมื่อความเร็วของมอเตอร์ได้ 75% ของความเร็วเต็มพิกัดสวิตส์เซนตริฟูกัลปก็จะปลดตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กทรอไลติกออก มอเตอร์ชนิดนี้มีราคาแพง การทำงานแรงบิดสตาร์ทดีมากและแรงบิดขณะทำงาน ก็ดีด้วยและเป็นมอเตอร์ที่มีสมรรถนะที่ดีที่สุดชนิดหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว [2]

สำหรับการต่อให้หมุนกลับทิศทางนั้น สามารถปฏิบัติเหมือนกับมอเตอร์คาปาซิเตอร์ชนิดอื่นๆ



รูปที่ 2-15 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบตัวเก็บประจุ 2 ค่า

2.4 กระบวนการพื้นฐานในการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

มอเตอร์ 1 เฟสนั้นเมื่อมีการใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง ค่าประสิทธิภาพย่อมที่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งถ้าวิเคราะห์ในทางทฤษฎีแล้ว ค่าประสิทธิภาพย่อมจะมีการลดลง ถ้าเราต้องการทราบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ตัวนั้นๆหลังจากใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง เราก็จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ตัวนั้นๆ ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์นั้นสามารถหาได้จากสมการ 2.29

$$Eff = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100 \qquad (2.29)$$

เมื่อ Eff = ค่าประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_o = กำลังทางกลเอาท์พุทของมอเตอร์ หน่วย วัตต์ (watt)

P_{in} = กำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์ หน่วย วัตต์ (watt)

วิธีการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้น มี อยู่ 2 วิธีหลัก นั้นคือ Load Test และอีกวิธีหนึ่งคือการใช้พารามิเตอร์ของวงจรสมมูล (Equivalence Circuit) ทำการหาค่าประสิทธิภาพ

2.4.1 Load Test

วิธีการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดย Load Test นั้น ถือว่าเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือสูงที่สุด เนื่องจากเป็นการวัดค่ากำลังเอาท์พุทโดยตรงเทียบกับกำลังไฟฟ้าอินพุทที่มอเตอร์รับเข้าไป แต่วิธีการนี้นั้นมีข้อเสียคือจำเป็นที่จะต้องทำการถอดมอเตอร์ตัวที่เราต้องการหาค่าประสิทธิภาพออกจากระบบมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และยังต้องมีเครื่องมือวัดแรงบิดเอาท์พุททางกลรวมถึงเครื่องมือวัดความเร็วรอบทางกลของมอเตอร์

การทดสอบนี้เริ่มจากทำการถอดมอเตอร์ออกจากระบบเพื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เชื่อมต่อมอเตอร์เข้ากับเครื่องมือวัดแรงบิดทางกลและทำการเชื่อมต่อกับตัวจำลองภาระทางกลโดยตัวจำลองภาระทางกลนี้อาจเป็นไดนาโมมิเตอร์ (Dynamo-Meter) หรืออาจจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ก็ได้ แล้วจึงทำการติดตั้งแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์

ทำการทดสอบจำลองภาระทางกลกับมอเตอร์โดยอาศัยหลักการ มอเตอร์ตัวเดียวกันถ้าทำการควบคุมการจ่ายแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าอินพุทให้เท่ากับค่าอินพุททางไฟฟ้าเมื่อมอเตอร์ทำการขับภาระจริงในการทำงานแล้ว ภาระทางกลที่ทำการจำลองในห้องปฏิบัติการนี้ย่อมเป็นภาระทางกลขนาดเดียวกันกับภาระทางกลในการทำงานจริงของมอเตอร์

ทำการอ่านค่าแรงบิดทางกลและความเร็วรอบของมอเตอร์ แล้วทำการคำนวณให้เป็นกำลังเอาท์พุททางกลตามสมการ 2.30 และ 2.31

$$P_o = T_o \omega_r \tag{2.30}$$

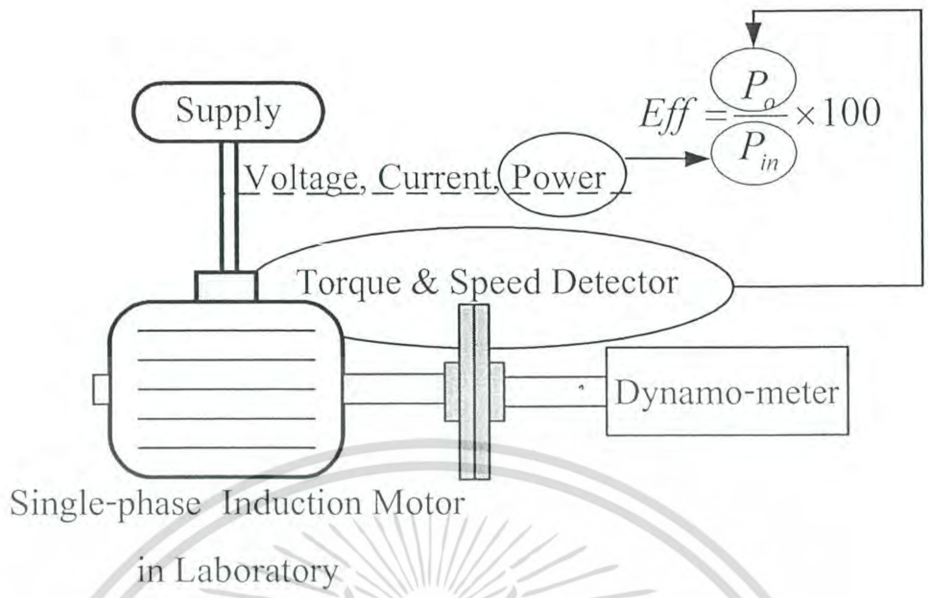
$$\omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \tag{2.31}$$

เมื่อ T_o = แรงบิดที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดค่าแรงบิด หน่วย นิวตันเมตร (N.m)

ω_r = ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ หน่วย เรเดียนต่อวินาที (rad/sec)

n_r = ความเร็วรอบของมอเตอร์ หน่วย รอบต่อนาที (r/min)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-16 การทดสอบ Load Test

2.4.2 วงจรสมมูล (Equivalence Circuit)

ในการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสอีกวิธีการหนึ่งนั่นคือการใช้วงจรสมมูล ซึ่งวิธีการนี้นั้นจะอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนาม นั่นคือทำการทดสอบมอเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล แล้วจึงนำวงจรสมมูลนั้นไปทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพต่อไป

วิธีการนี้นั้นในทางปฏิบัติมีความสะดวกกว่าวิธี Load Test เนื่องจากเราไม่จำเป็นที่จะต้องมีเครื่องมือวัดความเร็วรอบและ เครื่องมือวัดแรงบิดทางกล แต่วิธีการนี้ก็จำเป็นที่จะต้องทำการถอดมอเตอร์ออกจากระบบเพื่อทำการทดสอบ และค่าประสิทธิภาพที่ได้ถ้าเทียบกันแล้ววิธี Load Test นั้นมีความน่าเชื่อถือที่สูงกว่า

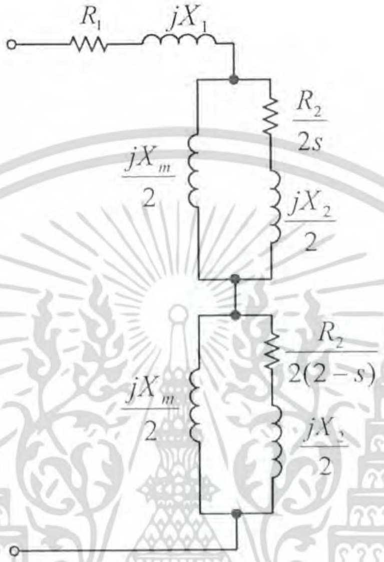
โดยหลักแล้ววิธีการนี้มีขั้นตอนการทดสอบอยู่ 3 ขั้นตอนหลักๆอันได้แก่ การทดสอบแบบไร้ภาระ (No-load Test) การทดสอบแบบล็อคโรเตอร์ (Lock Rotor Test) และการทดสอบความต้านทานสเตเตอร์ (DC Test) ซึ่งเป็นการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล

วงจรสมมูลที่ใช้ในการประมาณค่าประสิทธิภาะนั้นจะแบ่งออกเป็นวงจรสมมูลที่ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบสลิปเฟสกับเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ และวงจรสมมูลสำหรับมอเตอร์แบบหมุนด้วยตัวเก็บประจุและเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุโดยมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.1 วงจรสมมูลแบบดั้งเดิมสำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟส (Traditional Model for Split Phase)

วงจรสมมูลแบบนี้เป็นวงจรสมมูลสำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟสที่ได้ถูกนำเสนอขึ้นเป็นวงจรแรกและเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ดังแสดงดังรูปที่ 2-17 ซึ่งจะขอเรียกวงจรสมมูลแบบนี้ว่าโมเดล T เป็นวงจรสมมูลแบบปกติทั่วไปซึ่งอยู่บนทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนาม โดยค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุทนั้นสมารถหาได้ดังนี้ [9-10]



รูปที่ 2-17 วงจรสมมูลโมเดล T สำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟส

$$Z_m = R_1 + jX_1 \tag{2.32}$$

$$Z_{fm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}\right) \tag{2.33}$$

$$Z_{bm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2(s-s)} + \frac{jX_2}{2}\right) \tag{2.34}$$

จากสมการที่ 2.32 ถึง 2.34 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z_t)

$$Z_t = Z_m + Z_{fm} + Z_{bm} \tag{2.35}$$

ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (I_t)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_t = \frac{V}{Z_t} \tag{2.36}$$

เมื่อ V คือแรงดันพิกัดที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังในส่วนของสนามแม่เหล็กบวก (I_f)

$$I_f = \frac{I_t \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.37}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังหักล้างในสนามแม่เหล็กลบ (I_b)

$$I_b = \frac{I_t \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2(2-s)} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.38}$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศ (P_g)

$$P_g = \frac{I_f^2 R_2}{2s} - \frac{I_b^2 R_2}{2(2-s)} \tag{2.39}$$

กำลังทางกลขาออก (P_o)

$$P_o = (1-s)P_g \tag{2.40}$$

เมื่อ R_1 = ความต้านทานของขดลวดหลัก

R_2 = ความต้านทานของโรเตอร์

X_1 = ความต้านทานเหนี่ยวนำของขดลวดหลัก

X_2 = ความต้านทานเหนี่ยวนำของโรเตอร์

X_m = ความต้านทานเหนี่ยวนำของแกนเหล็ก

โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลโมเดล T นี้สมารถหาได้จากการทดสอบ 3 ขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.1.1 การทดสอบแบบไร้ภาระ (No-load Test)

การทดสอบแบบไร้ภาระนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำเชิงไฟฟ้าของแกนเหล็ก และยังสามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งในการหาความต้านทานเชิงไฟฟ้าของแกนเหล็ก (R_c) โดยการทดสอบนั้นจะเป็นการทดสอบมอเตอร์ขณะที่ไม่มีการขับโหลดใดๆ โดยทำการจ่ายแรงดันที่พิกัดให้กับมอเตอร์ เนื่องจากมอเตอร์ไม่มีการขับโหลดใดๆ ดังนั้นจะถือว่าความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นเท่ากับความเร็วซิงโครนัส เพราะฉะนั้นสลิปมีค่าเป็นศูนย์ ทำการอ่านและบันทึกค่าแรงดัน กระแส เพาเวอร์เฟคเตอร์ และกำลังไฟฟ้า

จากข้อมูลของการทดสอบแบบไร้ภาระสามารถหาค่าผลรวมของค่าเหนี่ยวนำของวงจร X_{nl} ได้จากสมการ

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{I_{nl}} \tag{2.41}$$

$$X_{nl} = \frac{\sqrt{(V_{nl} I_{nl})^2 - P_{nl}^2}}{I^2_{nl}} \tag{2.42}$$

เมื่อ X_{nl} คือผลรวมของค่ารีแอกแต้นซ์ที่อนุกรมกันอยู่ในวงจร

$$X_{nl} = X_1 + 0.5X_m + 0.5X_2 \tag{2.43}$$

เมื่อ Z_{nl} = ค่าอิมพีแดนซ์จากการทดสอบแบบไร้ภาระ
V_{nl} = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในการทดสอบแบบไร้ภาระ
I_{nl} = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในการทดสอบแบบไร้ภาระ
P_{nl} = กำลังไฟฟ้าอินพุทในการทดสอบมอเตอร์แบบไร้ภาระ
X_{nl} = ผลรวมของความเหนี่ยวนำที่อนุกรมกันอยู่ในวงจรในการทดสอบแบบไร้ภาระ

2.4.2.1.2 การทดสอบแบบล็อคโรเตอร์ (Locked Rotor Test)

การทดสอบแบบล็อคโรเตอร์นี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในของลวดทองแดงที่สเตอตร์และการสูญเสียบนแท่งตัวนำของโรเตอร์ รวมถึงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหลักและความเหนี่ยวนำของโรเตอร์ตลอดจนเป็นส่วนหนึ่งในการหาความต้านทานเชิงไฟฟ้าของแกนเหล็กที่ใช้ร่วมกับการทดสอบแบบไร้ภาระ

การทดสอบมอเตอร์แบบล็อคโรเตอร์นี้ทำได้โดยการไม่จ่ายไฟให้กับขดลวดช่วยเริ่มหมุนเลย มอเตอร์จะไม่สามารถทำการออกตัวได้ ทำการค่อยๆจ่ายแรงดันเพิ่มขึ้นน้อยๆจนมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้กระแสพิกัด ทำการอ่านและบันทึกค่าของ แรงดัน กระแส เพาเวอร์เฟคเตอร์ และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบแบบล็อคโรเตอร์สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

$$Z_{lr} = \frac{V_{lr}}{I_{lr}} \tag{2.44}$$

$$X_{lr} = \frac{\sqrt{(V_{lr} I_{lr})^2 - P_{lr}^2}}{I_{lr}^2} \tag{2.45}$$

โดยปกติแล้วจะกำหนดให้ค่า ความเหนี่ยวนำของขดลวดหลักเท่ากับความเหนี่ยวนำที่โรเตอร์

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{lr}}{2} \tag{2.46}$$

จากสมการที่ 2.43 และสมการที่ 2.45 จะได้สมการหาค่าความเหนี่ยวนำของแกนเหล็ก

$$X_m = 2X_{nl} - 1.5X_{lr} \tag{2.47}$$

ค่าความต้านทานที่อนุกรมกันอยู่ในวงจรสมมูลของขดลวดหลักขณะล็อคโรเตอร์

$$R_{lr} = \frac{P_{lr}^2}{I_{lr}^2} \tag{2.48}$$

ดังนั้นค่าความต้านทานของโรเตอร์ (R_2) ที่ย้ายไปด้านสเตเตอร์ หาได้จาก

$$R_2 = R_{lr} - R_1 \tag{2.49}$$

เมื่อ Z_{lr} = ค่าอิมพีแดนซ์จากการทดสอบล็อคโรเตอร์

V_{lr} = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในการทดสอบล็อคโรเตอร์

I_{lr} = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในการทดสอบล็อคโรเตอร์

P_{lr} = กำลังไฟฟ้าอินพุทในการทดสอบมอเตอร์ล็อคโรเตอร์

X_{lr} = ผลรวมของความเหนี่ยวนำที่อนุกรมกันอยู่ในวงจรในการทดสอลล็อคโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.1.3 การทดสอบความต้านทานสเตเตอร์ (DC Test)

การทดสอบความต้านทานสเตเตอร์นี้เป็นการทดสอบเพื่อหาความต้านทานของขดลวดหลักหรือขดลวดช่วย โดยจะทำการทดสอบทีละขด และเป็นการทดสอบขณะมอเตอร์ไม่มีการหมุน ทดสอบได้โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในขดลวดที่ต้องการทดสอบ ค่อยๆ เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นจะกระแสที่อ่านได้เป็นค่ากระแสพิกัด แล้วคำนวณหาค่าความต้านทานตามสมการ

$$R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \tag{2.50}$$

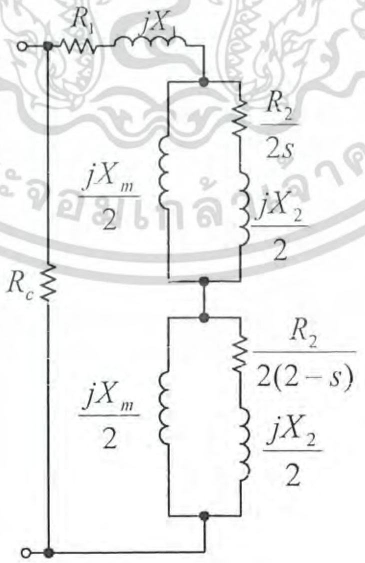
เมื่อ V_{dc} = แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายเมื่อทำการทดสอบความต้านทานสเตเตอร์

I_{dc} = ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากการทดสอบความต้านทานสเตเตอร์

2.4.2.2 วงจรสมมูลโมเดล EC1 สำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟส

(Equivalence Circuit Model EC1 for Split-Phase)

ถ้าเราทำการพิจารณาวงจรสมมูลโมเดล T จะพบว่า ยังไม่มีการคิดรวมถึงการสูญเสียในแกนเหล็กรวมเข้าไปด้วย จึงได้มีการค้นคว้านำเสนอวงจรสมมูลโมเดล EC1 ซึ่งมีการคิดรวมการสูญเสียในแกนเหล็กเข้าไปในระบบไว้แล้ว ในรูปของ R_c แต่ข้อเสียของวงจรสมมูลแบบนี้นั้นคือความยุ่งยากในการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถหาได้โดยตรงนั้นมีอยู่เพียงตัวเดียวนั้นคือค่าความต้านทานของขดลวดหลัก ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆนั้น จำเป็นที่จะต้องอาศัยกระบวนการทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการหาค่า [9-10]



รูปที่ 2-18 วงจรสมมูลโมเดล EC1 สำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าอินพุทและกำลังทางกลเอาท์พุทของวงจรสมมูลโมเดล EC1 นี้สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Z_m = R_1 + jX_1 \tag{2.51}$$

$$Z_{fm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2} \right) \tag{2.52}$$

$$Z_{bm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2(s-s)} + \frac{jX_2}{2} \right) \tag{2.53}$$

จากสมการที่ 2.51 ถึง 2.53 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z_t)

$$Z_t = R_c // \left(Z_m + Z_{fm} + Z_{bm} \right) \tag{2.54}$$

ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (I_t)

$$I_t = \frac{V}{Z_t} \tag{2.55}$$

เมื่อ V คือแรงดันพิกัดที่จ่ายให้กับมอเตอร์

กระแสที่ไหลผ่านสเตเตอร์ (I_1)

$$I_1 = \frac{V}{Z_m + Z_{fm} + Z_{bm}} \tag{2.56}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังในส่วนของสนามแม่เหล็กบวก (I_f)

$$I_f = \frac{I_1 \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.57}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังหักล้างในสนามแม่เหล็กลบ (I_b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_b = \frac{I_1 \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2(2-s)} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.58}$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศ (P_g)

$$P_g = \frac{I_f^2 R_2}{2s} - \frac{I_b^2 R_2}{2(2-s)} \tag{2.59}$$

กำลังทางกลขาออก (P_o)

$$P_o = (1-s)P_g \tag{2.60}$$

ในการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลโมเดล EC1 นั้น จำเป็นที่จะต้องทำการทำการทดสอบมอเตอร์แบบไร้ภาระทางกล, ล็อคโรเตอร์, และการทดสอบความต้านทานขดลวดหลัก เช่นเดียวกับวงจรสมมูลโมเดล T แต่พารามิเตอร์ที่เราทราบค่าทันทีเลยนั้นมีแต่ค่าความต้านทานขดลวดหลักเท่านั้น ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นนั้นหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

-จากการทดสอบแบบไร้ภาระทางกลจะได้ค่า Z_{nl} จากสมการที่ 2.41
-จากการทดสอบล็อคโรเตอร์จะได้ค่า Z_{lr} จากสมการที่ 2.44

ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.61 ถึง 2.62

$$Z_{nl} = R_c // \left(\frac{4R_1 + R_2}{4} + j\frac{2X_1 + X_m + X_2}{2} \right) \tag{2.61}$$

$$Z_{lr} = R_c // \left(R_1 + jX_1 + jX_m // (R_2 + jX_2) \right) \tag{2.62}$$

ค่าพารามิเตอร์ R_1 นั้น เราทราบค่าแล้วจากการทำการทดสอบความต้านทานขดลวดหลัก และค่าความต้านทานเหนี่ยวนำของสเตเตอร์และโรเตอร์จะถูกกำหนดให้เท่ากับ เพราะฉะนั้นจะสามารถยุบสมการที่ 2.56 และ 2.57 โดยแทน $X_2 = X_1$ ได้ดังสมการที่ 2.63 และ 2.64

$$Z_{nl} = R_c // \left(\frac{4R_1 + R_2}{4} + j\frac{3X_1 + X_m}{2} \right) \tag{2.63}$$

$$Z_{lr} = R_c // \left(R_1 + jX_1 + jX_m // (R_2 + jX_1) \right) \tag{2.64}$$

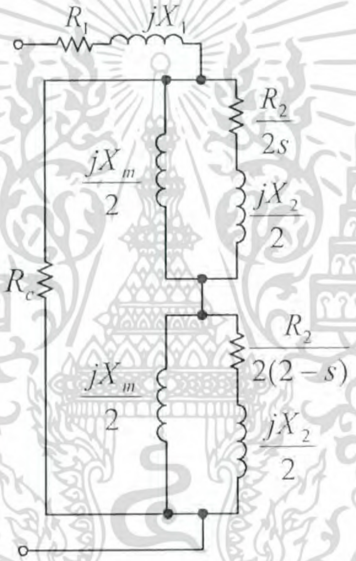
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ที่เราต้องทำการหาจะเหลือ R_2, X_1, X_m, R_c ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เราอาศัยกระบวนการคำนวณต่างๆเข้ามาทำการหาค่า

2.4.2.3 วงจรสมมูลโมเดล EC2 สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส

(Equivalence Circuit Model EC2 for Split-Phase)

ถ้าเราทำการวิเคราะห์วงจรสมมูลโมเดล EC1 จะพบว่า การคิดการสูญเสียในแกนเหล็กนั้น อาจไม่เป็นจริงตามการไหลของกำลังไฟฟ้า เนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น การสูญเสียในแกนเหล็กควรที่จะมาหลังจากการเกิดการสูญเสียในสเตเตอร์แล้ว แต่ถ้าพิจารณาวงจรสมมูลโมเดล EC1 จะพบว่า การสูญเสียในแกนเหล็กนั้น เกิดพร้อมกันกับการสูญเสียในสเตเตอร์ จึงไม่เป็นจริงตามการไหลของกำลังไฟฟ้า จึงได้มีการค้นคว้าและวิจัยต่ออันเป็นที่มาของวงจรสมมูลโมเดล EC2 [9-10]



รูปที่ 2-19 วงจรสมมูลโมเดล EC2 สำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟส

ถ้าพิจารณาจากรูปวงจรสมมูลโมเดล EC2 จะพบว่าการสูญเสียในแกนเหล็กนั้น เกิดหลังจากที่มีการสูญเสียในสเตเตอร์แล้ว ซึ่งเป็นจริงตามการไหลของกำลังไฟฟ้า แต่วงจรสมมูลแบบนี้นั้นค่อนข้างที่จะมีความยุ่งยากในการหาค่าพารามิเตอร์และการคำนวณ หาค่ากำลังเอาท์พุท

ค่ากำลังทางกลเอาพุทของวงจรสมมูลโมเดล EC2 นั้นสมารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Z_m = R_1 + jX_1 \tag{2.65}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{fm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2} \right) \tag{2.66}$$

$$Z_{bm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2(s-s)} + \frac{jX_2}{2} \right) \tag{2.67}$$

$$Z_{t1} = R_c // \left(Z_{fm} + Z_{bm} \right) \tag{2.68}$$

จากสมการที่ 2.67 ถึง 2.68 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z_t)

$$Z_t = Z_m + Z_{t1} \tag{2.69}$$

ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (I_t)

$$I_t = \frac{V}{Z_t} \tag{2.70}$$

เมื่อ V คือแรงดันพิกัดที่จ่ายให้กับมอเตอร์

กระแสที่ไหลไปยังส่วนของโรเตอร์ (I_1)

$$I_1 = \frac{I_t \cdot R_c}{R_c + Z_{fm} + Z_{bm}} \tag{2.71}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังในส่วนของสนามแม่เหล็กบวก (I_f)

$$I_f = \frac{I_1 \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.72}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังหักล้างในสนามแม่เหล็กลบ (I_b)

$$I_b = \frac{I_1 \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2(2-s)} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.73}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศ (P_g)

$$P_g = \frac{I_f^2 R_2}{2s} - \frac{I_b^2 R_2}{2(2-s)} \tag{2.74}$$

กำลังทางกลขาออก (P_o)

$$P_o = (1-s)P_g \tag{2.75}$$

ในการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลโมเดล EC2 นั้น จำเป็นที่จะต้องทำการทำการทดสอบมอเตอร์แบบไร้ภาระทางกล, ล็อคโรเตอร์, และการทดสอบความต้านทานขดลวดหลัก เช่นเดียวกับวงจรสมมูลโมเดล T แต่พารามิเตอร์ที่เราทราบค่าทันทีเลยนั้นมีแต่ค่าความต้านทานขดลวดหลักเท่านั้น ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นนั้นหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

- จากการทดสอบแบบไร้ภาระทางกลจะได้ค่า Z_{nl} จากสมการที่ 2.41
- จากการทดสอบล็อคโรเตอร์จะได้ค่า Z_{lr} จากสมการที่ 2.44

ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.71 ถึง 2.72

$$Z_{nl} = R_1 + jX_1 + R_c // \left(\frac{R_2}{4} + j\frac{X_m + X_2}{2}\right) \tag{2.76}$$

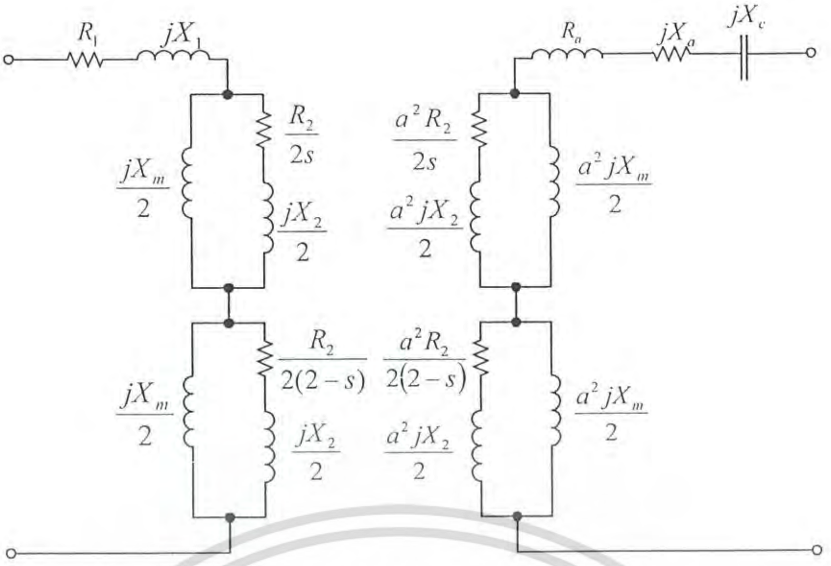
$$Z_{lr} = R_1 + jX_1 + R_c // jX_m // (R_2 + jX_2) \tag{2.77}$$

ค่าพารามิเตอร์ที่เราต้องทำการหาจะเหลือ R_2, X_1, X_m, R_c ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เราอาศัยกระบวนการคำนวณต่างๆเข้ามาทำการหาค่า

2.4.2.4 วงจรสมมูลโมเดล T สำหรับมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Equivalence Circuit Model T for Two-Value Capacitor)

วงจรสมมูลที่กล่าวมา 3 แบบข้างต้นนั้น เป็นวงจรสมมูลสำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟส วงจรสมมูลสำหรับมอเตอร์เริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุนั้น มีลักษณะคล้ายกับวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส จะมีส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาคือวงจรสมมูลด้านขดลวดช่วยเริ่มหมุน เนื่องจากในมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุนั้นขดลวดช่วยเริ่มหมุนจะทำงานตลอดเวลาที่มอเตอร์ทำงาน ดังรูปที่ 2-22 [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-20 วงจรสมมูลโมเดล T สำหรับมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

วงจรสมมูลโมเดล T ตามรูปที่ 2-20 นี้ เป็นวงจรสมมูลที่ใช้กับมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ เป็นวงจรที่ได้มีการนำเสนอขึ้นมาเป็นวงจรแรก ในส่วนของขดลวดหลักนั้นเหมือนกับวงจรสมมูลของมอเตอร์แบบแยกเฟส ส่วนที่เพิ่มมาทางด้านขวามือของรูปคือส่วนของขดลวดช่วยเริ่มหมุนเมื่ออ้างอิงด้านขดลวดหลัก (Auxiliary Winding Refer to Main Winding) การคำนวณกำลังเอาท์พุทนั้น สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

พิจารณาทางด้านขดลวดหลัก

$$Z_m = R_1 + jX_1 \tag{2.78}$$

$$Z_{fm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}\right) \tag{2.79}$$

$$Z_{bm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2(s-s)} + \frac{jX_2}{2}\right) \tag{2.80}$$

จากสมการที่ 2.78 ถึง 2.80 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวมด้านขดลวดหลัก (Z_{tm})

$$Z_{tm} = Z_m + Z_{fm} + Z_{bm} \tag{2.81}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทางด้านขดลวดหลัก (I_{tm})

$$I_{tm} = \frac{V}{Z_{tm}} \tag{2.82}$$

เมื่อ V คือแรงดันพิกัดที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังในส่วนของสนามแม่เหล็กบวกด้านขดลวดหลัก (I_{fm})

$$I_{fm} = \frac{I_{tm} \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.83}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังหักล้างในสนามแม่เหล็กลบด้านขดลวดหลัก (I_{bm})

$$I_{bm} = \frac{I_{tm} \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2(2-s)} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.84}$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศด้านขดลวดหลัก (P_{gm})

$$P_{gm} = \frac{I_{fm}^2 R_2}{2s} - \frac{I_{bm}^2 R_2}{2(2-s)} \tag{2.85}$$

พิจารณาทางด้านขดลวดช่วย

$$Z_a = R_a + jX_a - jX_c \tag{2.86}$$

$$Z_{fa} = \frac{a^2 jX_m}{2} \,//\, a^2 \cdot \left(\frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2} \right) \tag{2.87}$$

$$Z_{ba} = \frac{a^2 jX_m}{2} \,//\, a^2 \left(\frac{R_2}{2(s-s)} + \frac{jX_2}{2} \right) \tag{2.88}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.86 ถึง 2.88 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวมด้านขดลวดช่วย (Z_{ta})

$$Z_{ta} = Z_a + Z_{fa} + Z_{ba} \tag{2.89}$$

ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทางด้านขดลวดช่วย (I_{ta})

$$I_{ta} = \frac{V}{Z_{ta}} \tag{2.90}$$

เมื่อ V คือแรงดันพิกัดที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังในส่วนของสนามแม่เหล็กบวกด้านขดลวดช่วย (I_{fa})

$$I_{fa} = \frac{I_{ta} \cdot \frac{a^2 \cdot jX_m}{2}}{a^2 \cdot \left(\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2} \right)} \tag{2.91}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังหักล้างในสนามแม่เหล็กลบด้านขดลวดช่วย (I_{ba})

$$I_{ba} = \frac{I_{ta} \cdot \frac{a^2 \cdot jX_m}{2}}{a^2 \cdot \left(\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2(2-s)} + \frac{jX_2}{2} \right)} \tag{2.92}$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศด้านขดลวดช่วย (P_{ga})

$$P_{ga} = \frac{I_{fa}^2 \cdot a^2 R_2}{2s} - \frac{I_{ba}^2 \cdot a^2 R_2}{2(2-s)} \tag{2.93}$$

กระแสไฟฟ้ารวมที่ไหลเข้ามอเตอร์ (I_t)

$$I_t = I_{tm} + I_{ta} \tag{2.94}$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศ (P_g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_g = P_{gm} + P_{ga} \tag{2.95}$$

กำลังทางกลขาออก (P_o)

$$P_o = (1-s)P_g \tag{2.96}$$

การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆนั้น ก็ทำคล้ายกับการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส แต่จะต่างกันตรงที่สำหรับมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุนั้นจะต้องมีอุปกรณ์ไว้ค่อยตัดขดลวดชุดที่ไม่ได้ทำการทดสอบออกจากวงจร ค่าพารามิเตอร์ตัวที่ไม่ต้องทำการหานั้นคือค่าความต้านทานเชิงเก็บประจุ (X_c) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าตัวเก็บประจุและความถี่ไฟฟ้าที่มอเตอร์ตัวนั้นใช้ โดยมีกระบวนการในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

2.4.2.4.1 การทดสอบค่าความต้านทานของขดลวดหลักและขอลวดช่วย (DC Test)

การทดสอบค่าความต้านทานของขดลวดหลักและขดลวดช่วยนั้น ทำเหมือนกับการทดสอบค่าความต้านทานขดลวดหลักของมอเตอร์แบบแยกเฟสในหัวข้อที่ 2.4.2.1.3 แต่เราจะการทดสอบมอเตอร์ที่ละขดเท่านั้น ขดลวดชุดที่ไม่ได้ทำการทดสอบต้องไม่ต่ออยู่กับวงจร และเมื่อทำการทดสอบขดลวดช่วยเริ่มหมุนต้องทำการลัดวงจรตัวเก็บประจุ (ควรปลดตัวเก็บประจุออกจากวงจรด้วย) ค่าความต้านทานหาได้จากสมการดังนี้

$$R_1 = \frac{V_{dcm}}{I_{dcm}} \tag{2.97}$$

$$R_a = \frac{V_{dca}}{I_{dca}} \tag{2.98}$$

เมื่อ V_{dcm} = แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายเมื่อทำการทดสอบขดลวดหลัก

I_{dcm} = ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากการทดสอบความต้านทานขดลวดหลัก

V_{dca} = แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายเมื่อทำการทดสอบขดลวดช่วยเริ่มหมุน

I_{dca} = ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากการทดสอบความต้านทานขดลวดช่วยเริ่มหมุน

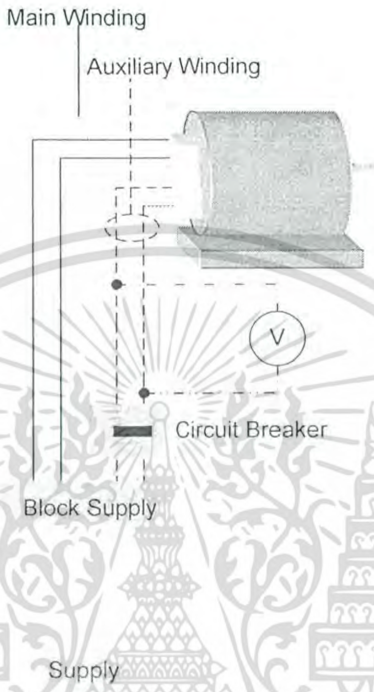
R_a = ค่าความต้านทานขดลวดช่วยเริ่มหมุน

2.4.2.4.2 การทดสอบหาอัตราส่วน (Ratio Test)

การทดสอบหาอัตราส่วนรอบ (a^2) เป็นการทดสอบที่คล้ายกับการทดสอบมอเตอร์แบบไร้ภาระ มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้จะมีอยู่หลักๆด้วยกัน 6 ขั้นตอนดังนี้ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เริ่มทำการทดสอบที่ขดลวดหลักก่อนทำการต่อวงจรตามรูปที่ 2-21 ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดให้กับมอเตอร์ กำหดให้แทนแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในขั้นตอนนี้ด้วย E_m เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วใกล้เคียงความเร็วซิงโครนัสแล้ว ทำการตัดวงจรของขดลวดช่วยเริ่มหมุนออกจากวงจร



รูปที่ 2-21 วงจรการทดสอบที่ 1 ในการทดสอบหาอัตราส่วนของขดลวด

- ทำการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดช่วยเริ่มหมุน แรงดันที่วัดได้นี้แทนด้วย $\left(E_a^{/}\right)$

- เปลี่ยนการต่อวงจรดังรูปที่ 2-22 จ่ายแรงดันพิกัดให้กับมอเตอร์เช่นเดิมจนมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วใกล้เคียงความเร็วซิงโครนัสแล้วทำการตัดการจ่ายไฟขดลวดหลัก(ยังคงจ่ายแรงดันให้ขดลวดช่วยเริ่มหมุนอยู่)

- ทำการปรับแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดช่วยเริ่มหมุนให้มีค่าเป็น $1.18 \times E_a^{/}$ (แรงดันมากกว่า $E_a^{/}$ อยู่ 18 เปอร์เซนต์) กำหนดให้แรงดันที่จ่ายให้ในขั้นตอนนี้มีค่าเป็น E_a

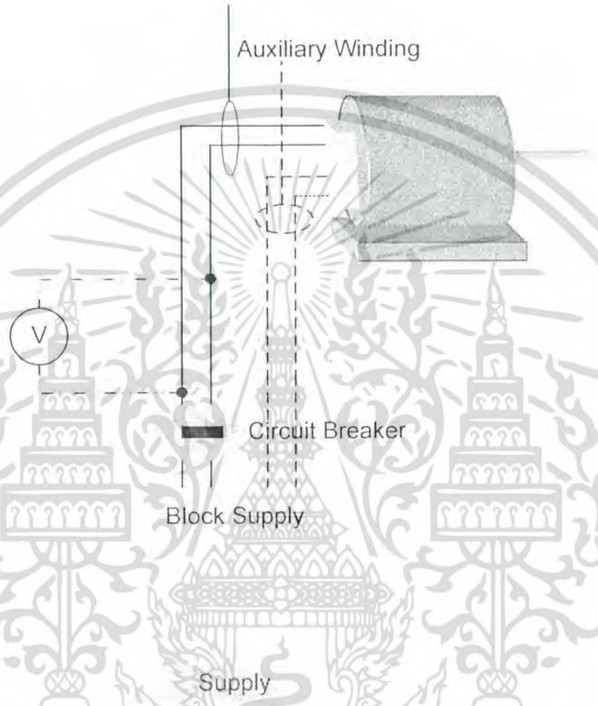
- ทำการวัดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดหลัก กำหนดให้แรงดันที่วัดได้นี้แทนด้วย $E_m^{/}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการคำนวณหาอัตราส่วนรอบจากสมการที่ 2.99

$$a=\sqrt{\frac{E_a^{\prime}E_a}{E_m^{\prime}E_m}} \tag{2.99}$$

(ข้อสังเกต ค่าที่ คำนวณได้จะเป็น a ไม่ใช่ a^2)



รูปที่ 2-22 วงจรที่ 2 ในการทดสอบหาอัตราส่วนของขดลวด

2.4.2.4.3 การทดสอบแบบล็อคโรเตอร์ (Lock-Rotor Test)

การทดสอบแบบล็อคโรเตอร์นี้เหมือนกับการทดสอบแบบล็อคโรเตอร์ของมอเตอร์แบบแยกเฟสในหัวข้อที่ 2.4.2.1.2 โดยจะทำการทดสอบที่ขดลวดหลักเท่านั้นและในระหว่างการทดสอบขดลวดช่วยเริ่มหมุนต้องไม่ต่ออยู่กับวงจรทดสอบ

การทดสอบมอเตอร์แบบล็อคโรเตอร์นี้ทำได้โดยทำการค่อยๆจ่ายไฟให้กับขดลวดชุดที่ทำการทดสอบเท่านั้น มอเตอร์จะไม่สามารถทำการออกตัวได้ ทำการค่อยๆจ่ายแรงดันเพิ่มขึ้นน้อยๆจนมอเตอร์ได้กระแสพิกัด ทำการอ่านและบันทึกค่าของ แรงดัน กระแส เพาเวอร์เฟคเตอร์ และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบล็อคโรเตอร์สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

ทำการทดสอบทางด้านขดลวดหลัก

$$Z_{lr} = \frac{V_{lr}}{I_{lr}} \tag{2.100}$$

$$X_{lr} = \frac{\sqrt{(V_{lr} I_{lr})^2 - P_{lr}^2}}{I_{lr}^2} \tag{2.101}$$

$$R_{lr} = R_1 + R_2 \tag{2.102}$$

$$X_{lr} = X_1 + X_2 \tag{2.103}$$

แต่จากการทดสอบความต้านทานขดลวดทำให้เราทราบค่าความต้านทานขดลวดหลัก (R_1)

$$R_2 = R_{lr} - R_1 \tag{2.104}$$

และมอเตอร์แบบเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุก็จะทำการกำหนดให้ค่าความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำของขดลวดหลักเท่ากับค่าความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำของโรเตอร์ $(X_1 = X_2)$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{lr}}{2} \tag{2.105}$$

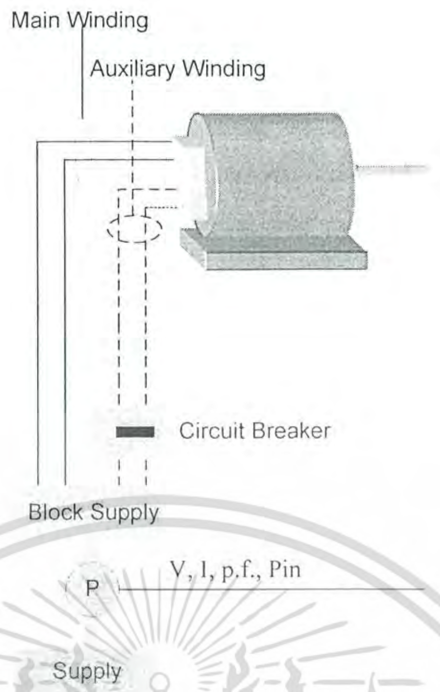
2.4.2.4.4 การทดสอบไร้ภาระ (No-Load Test)

การทดสอบแบบไร้ภาระของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุนั้น คล้ายกับการทดสอบไร้ภาระของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสในหัวข้อ 2.4.2.1.1 แตกต่างกันตรงที่จะต้องมีการต่ออุปกรณ์ตัดวงจรเข้าไปในวงจรทดสอบ เพื่อตัดขดลวดชุดที่ไม่ได้การทดสอบออกจากวงจร ปกติแล้วจะทำการทดสอบที่ขดลวดหลักเพียงชุดเดียว แต่ในหัวข้อนี้จะทำการอธิบายวิธีการทดสอบทางด้านขดลวดช่วยเริ่มหมุนด้วยเพื่อใช้ในวงจรสมมูลอีก 2 แบบในหัวข้อต่อไป

ทำการทดสอบที่ขดลวดหลัก

- ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 2-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจรที่ 2-23 วงจรทดสอบแบบไร้ภาระของขดลวดหลัก

- ทำการจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ด้วยแรงดันพิกัดของมอเตอร์

- เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วใกล้เคียงความเร็วซิงโครนัสทำการตัดขดลวดช่วยเริ่มหมุนออกจากวงจร

- ทำการอ่านบันทึกค่า แรงดัน, กระแส, เพาเวอร์เฟคเตอร์ และกำลังไฟฟ้า

- นำค่าที่อ่านได้มาคำนวณผลตามสมการข้างล่างดังต่อไปนี้

$$Z_{nlm} = \frac{V_{nlm}}{I_{nlm}} \tag{2.106}$$

$$X_{nlm} = \frac{\sqrt{(V_{nlm} I_{nlm})^2 - P_{nlm}^2}}{I^2{}_{nlm}} \tag{2.107}$$

เมื่อ X_{nlm} คือผลรวมของค่ารีแอกแต้นซ์ที่อนุกรมกันอยู่ในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{nlm} = X_1 + 0.5X_m + 0.5X_2 \tag{2.108}$$

เพราะฉะนั้น ค่าความต้านทานเหนี่ยวนำของแกนเหล็ก (X_m)

$$X_m = 2(X_{nlm} - X_1 - 0.5X_2) \tag{2.109}$$

เมื่อ Z_{nlm} = ค่าอิมพีแดนซ์จากการทดสอบแบบไร้ภาระที่ขดลวดหลัก

V_{nlm} = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในการทดสอบแบบไร้ภาระที่ขดลวดหลัก

I_{nlm} = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในการทดสอบแบบไร้ภาระที่ขดลวดหลัก

P_{nlm} = กำลังไฟฟ้าอินพุทในการทดสอบมอเตอร์แบบไร้ภาระที่ขดลวดหลัก

X_{nlm} = ผลรวมของความเหนี่ยวนำที่อนุกรมกันอยู่ในวงจรในการทดสอบแบบไร้ภาระที่ขดลวดหลัก

เมื่อทำการทดสอบที่ขดลวดช่วยเริ่มหมุน

การทดสอบมอเตอร์ขณะไร้ภาระที่ขดลวดช่วยเริ่มหมุนนี้จะใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุที่จะกล่าวในหัวข้อที่ 2.4.2.5 และ 2.4.2.6 ต่อไป โดยมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

- ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 2-24

- ทำการจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ด้วยแรงดันพิกัดของมอเตอร์

- เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วใกล้เคียงความเร็วซิงโครนัสทำการตัดขดลวดหลักออกจากวงจร

- ทำการอ่านบันทึกค่า แรงดัน, กระแส, เพาเวอร์เฟคเตอร์ และกำลังไฟฟ้า

- นำค่าที่อ่านได้มาคำนวณผลตามสมการข้างล่างดังต่อไปนี้

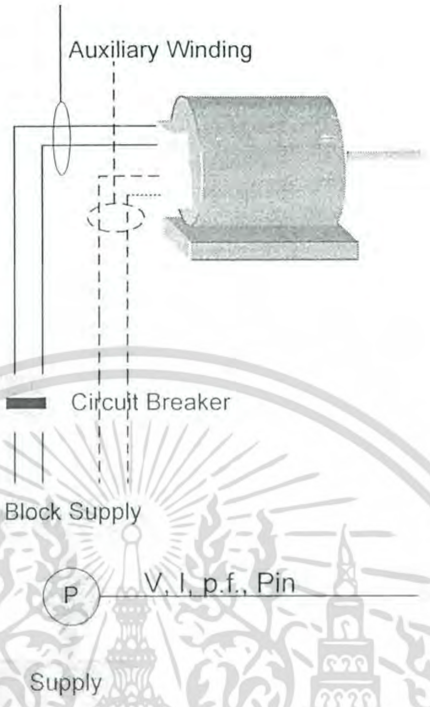
$$Z_{nla} = \frac{V_{nla}}{I_{nla}} \tag{2.110}$$

เมื่อ Z_{nla} = ค่าอิมพีแดนซ์จากการทดสอบแบบไร้ภาระที่ขดลวดช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{nla} = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในการทดสอบแบบไร้ภาระที่ขดลวดช่วย

I_{nla} = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในการทดสอบแบบไร้ภาระที่ขดลวดช่วย



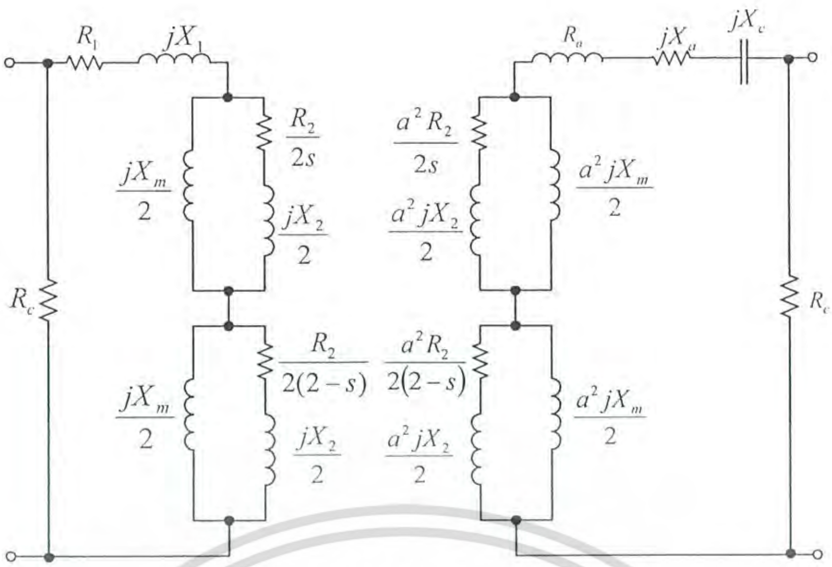
รูปที่ 2-24 วงจรทดสอบแบบไร้ภาระของขดลวดช่วยหมุน

2.4.2.5 วงจรสมมูลโมเดล EC1 สำหรับมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Equivalence Circuit Model EC1 for Two-Value Capacitor)

ถ้าเราพิจารณาวงจรสมมูลโมเดล T นั้น จะพบว่า ยังไม่มีการคิดรวมถึงการสูญเสียในแกนเหล็กเข้าไปในวงจรสมมูล จึงทำให้มีการค้นคว้าและนำเสนอวงจรสมมูลโมเดล EC1 นี้ขึ้นมาเพื่อที่จะเพิ่มค่าความแม่นยำของวงจรสมมูล

วงจรสมมูลโมเดล EC1 ตามรูปที่ 2-25 นี้ เป็นวงจรสมมูลที่นำเสนอเพื่อใช้กับมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ เป็นวงจรที่ได้มีพัฒนาขึ้นมาจากวงจรแรก มีการคิดรวมถึงการสูญเสียในแกนเหล็กรวมอยู่ในวงจร (R_c) การคำนวณกำลังเอาท์พุทนั้น สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-25 วงจรสมมูลโมเดล EC1 สำหรับมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

พิจารณาทางด้านขดลวดหลัก

$$Z_m = R_1 + jX_1 \tag{2.111}$$

$$Z_{fm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2} \right) \tag{2.112}$$

$$Z_{bm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2(s-s)} + \frac{jX_2}{2} \right) \tag{2.113}$$

จากสมการที่ 2.111 ถึง 2.113 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวมด้านขดลวดหลัก (Z_{tm})

$$Z_{tm} = R_c // \left(Z_m + Z_{fm} + Z_{bm} \right) \tag{2.114}$$

ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทางด้านขดลวดหลัก (I_{tm})

$$I_{tm} = \frac{V}{Z_{tm}} \tag{2.115}$$

กระแสที่ไหลผ่านขดลวดหลัก (I_{tm1})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{tm1} = \frac{V}{Z_m + Z_{fm} + Z_{bm}} \tag{2.116}$$

เมื่อ V คือแรงดันพิกัดที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังในส่วนของสนามแม่เหล็กบวกด้านขดลวดหลัก (I_{fm})

$$I_{fm} = \frac{I_{tm1} \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.117}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังหักล้างในสนามแม่เหล็กลบด้านขดลวดหลัก (I_{bm})

$$I_{bm} = \frac{I_{tm1} \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2(2-s)} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.118}$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศด้านขดลวดหลัก (P_{gm})

$$P_{gm} = \frac{I_{fm}^2 R_2}{2s} - \frac{I_{bm}^2 R_2}{2(2-s)} \tag{2.119}$$

พิจารณาทางด้านขดลวดช่วย

$$Z_a = R_a + jX_a - jX_c \tag{2.120}$$

$$Z_{fa} = \frac{a^2 jX_m}{2} \,//\, a^2 \cdot \left(\frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}\right) \tag{2.121}$$

$$Z_{ba} = \frac{a^2 jX_m}{2} \,//\, a^2 \left(\frac{R_2}{2(s-s)} + \frac{jX_2}{2}\right) \tag{2.122}$$

จากสมการที่ 2.120 ถึง 2.122 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวมด้านขดลวดช่วย (Z_{ta})

$$Z_{ta} = R_c \,//\, (Z_a + Z_{fa} + Z_{ba}) \tag{2.123}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทางด้านขดลวดช่วย (I_{ta})

$$I_{ta} = \frac{V}{Z_{ta}} \tag{2.124}$$

เมื่อ V คือแรงดันพิกัดที่จ่ายให้กับมอเตอร์

กระแสที่ไหลผ่านขดลวดช่วย (I_{ta1})

$$I_{ta1} = \frac{V}{Z_m + Z_{fm} + Z_{bm}} \tag{2.125}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังในส่วนของสนามแม่เหล็กบวกด้านขดลวดช่วย (I_{fa})

$$I_{fa} = \frac{I_{ta1} \cdot \frac{a^2 \cdot jX_m}{2}}{a^2 \cdot \left(\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}\right)} \tag{2.126}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังหักล้างในสนามแม่เหล็กลบด้านขดลวดช่วย (I_{ba})

$$I_{ba} = \frac{I_{ta1} \cdot \frac{a^2 \cdot jX_m}{2}}{a^2 \cdot \left(\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2(2-s)} + \frac{jX_2}{2}\right)} \tag{2.127}$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศด้านขดลวดช่วย (P_{ga})

$$P_{ga} = \frac{I_{fa}^2 \cdot a^2 R_2}{2s} - \frac{I_{ba}^2 \cdot a^2 R_2}{2(2-s)} \tag{2.128}$$

กระแสไฟฟ้ารวมที่ไหลเข้ามอเตอร์ (I_t)

$$I_t = I_{tm} + I_{ta} \tag{2.129}$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศ (P_g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_g = P_{gm} + P_{ga} \tag{2.130}$$

กำลังทางกลขาออก (P_o)

$$P_o = (1-s)P_g \tag{2.131}$$

2.4.2.6 วงจรสมมูลโมเดล EC2 สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

(Equivalence Circuit Model EC2 for Two-Value Capacitor)

ถ้าทำการพิจารณาวงจรสมมูลโมเดล EC1 จะพบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นไม่เป็นจริงตามทฤษฎี เนื่องจากโมเดล EC1 นั้น การสูญเสียที่แกนเหล็กนั้นเกิดพร้อมกับการสูญเสียในสเตเตอร์ ซึ่งขัดแย้งกับการไหลของกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์เหนี่ยวนำ จึงทำให้มีการค้นคว้าพัฒนาวงจรสมูลจนได้วงจรสมมูลดังรูป 2-26

ถ้าเราพิจารณาวงจรสมมูลโมเดล EC2 นี้ จะพบว่า ลำดับการสูญเสียกำลังไฟฟ้านั้นเป็นจริงตามทฤษฎีแล้ว โดยเราสามารถคำนวณหากำลังไฟฟ้าเอาท์พุทได้ตามสมการดังต่อไปนี้

พิจารณาที่ขดลวดหลัก

$$Z_m = R_1 + jX_1 \tag{2.132}$$

$$Z_{fm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2} \right) \tag{2.133}$$

$$Z_{bm} = \frac{jX_m}{2} // \left(\frac{R_2}{2(s-s)} + \frac{jX_2}{2} \right) \tag{2.134}$$

$$Z_{tm1} = R_c // (Z_{fm} + Z_{bm}) \tag{2.135}$$

จากสมการที่ 2.132 ถึง 2.135 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวมทางด้านขดลวดหลัก (Z_{tm})

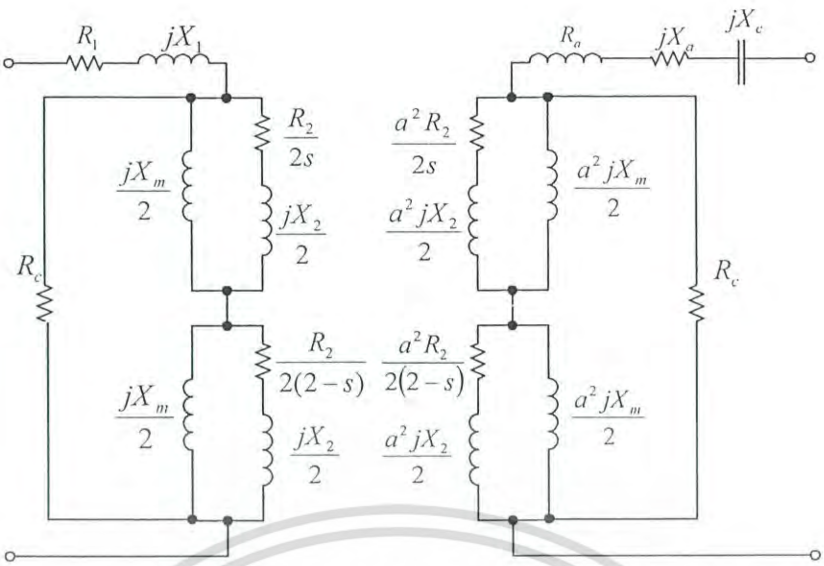
$$Z_{tm} = Z_m + Z_{tm1} \tag{2.136}$$

ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ ทางด้านขดลวดหลัก (I_{tm})

$$I_{tm} = \frac{V}{Z_{tm}} \tag{2.137}$$

เมื่อ V คือแรงดันพิกัดที่จ่ายให้กับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-26 วงจรสมมูลโมเดล EC2 สำหรับมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

กระแสที่ไหลไปยังส่วนของโรเตอร์ทางด้านขดลวดหลัก (I_{m1})

$$I_{m1} = \frac{I_{tm} \cdot R_c}{R_c + Z_{fm} + Z_{bm}} \tag{2.138}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังในส่วนของสนามแม่เหล็กบวกทางด้านขดลวดหลัก (I_{fm})

$$I_{fm} = \frac{I_{m1} \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.139}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังหักล้างในสนามแม่เหล็กลบทางด้านขดลวดหลัก (I_{bm})

$$I_{bm} = \frac{I_{m1} \cdot \frac{jX_m}{2}}{\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2(2-s)} + \frac{jX_2}{2}} \tag{2.140}$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศทางด้านขดลวดหลัก (P_{gm})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{gm} = \frac{I_{fm}^2 R_2}{2s} - \frac{I_{bm}^2 R_2}{2(2-s)} \quad (2.141)$$

พิจารณาทางด้านขดลวดช่วยเริ่มหมุน

$$Z_a = R_a + jX_a - jX_c \quad (2.142)$$

$$Z_{fa} = \frac{a^2 jX_m}{2} // \left(\frac{a^2 R_2}{2s} + \frac{a^2 jX_2}{2} \right) \quad (2.143)$$

$$Z_{ba} = \frac{a^2 jX_m}{2} // \left(\frac{a^2 R_2}{2(s-s)} + \frac{a^2 jX_2}{2} \right) \quad (2.144)$$

$$Z_{ta1} = R_c // (Z_{fa} + Z_{ba}) \quad (2.145)$$

จากสมการที่ 2.142 ถึง 2.145 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวมทางด้านขดลวดช่วยเริ่มหมุน (Z_{ta})

$$Z_{tm} = Z_m + Z_{ta1} \quad (2.146)$$

ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ ทางด้านขดลวดช่วยเริ่มหมุน (I_{ta})

$$I_{ta} = \frac{V}{Z_{ta}} \quad (2.147)$$

เมื่อ V คือแรงดันพิกัดที่จ่ายให้กับมอเตอร์

กระแสที่ไหลไปยังส่วนของโรเตอร์ทางด้านขดลวดช่วยเริ่มหมุน (I_{a1})

$$I_{a1} = \frac{I_{ta} \cdot R_c}{R_c + Z_{fm} + Z_{bm}} \quad (2.148)$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังในส่วนของสนามแม่เหล็กบวกทางด้านขดลวดช่วยเริ่มหมุน (I_{fa})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{fa} = \frac{I_{a1} \cdot \frac{a^2 jX_m}{2}}{a^2\left(\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}\right)} \tag{2.149}$$

ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังหักล้างในสนามแม่เหล็กลบทางด้านขดลวดช่วยเริ่มหมุน (I_{ba})

$$I_{ba} = \frac{I_{a1} \cdot \frac{a^2 jX_m}{2}}{a^2\left(\frac{jX_m}{2} + \frac{R_2}{2(2-s)} + \frac{jX_2}{2}\right)} \tag{2.150}$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศทางด้านขดลวดช่วยเริ่มหมุน (P_{ga})

$$P_{ga} = \frac{I_{fa}^2 a^2 R_2}{2s} - \frac{I_{ba}^2 a^2 R_2}{2(2-s)} \tag{2.151}$$

กระแสไฟฟ้ารวมที่ไหลเข้ามอเตอร์ (I_t)

$$I_t = I_{tm} + I_{ta} \tag{2.152}$$

กำลังไฟฟ้ารวมที่เกิดในช่องอากาศ (P_g)

$$P_g = P_{gm} + P_{ga} \tag{2.153}$$

กำลังทางกลขาออก (P_o)

$$P_o = (1-s)P_g \tag{2.154}$$

วงจรสมมูลทั้ง 6 แบบที่ได้นำเสนอไปนั้น เป็นวงจรสมมูลที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ และสำหรับวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุโมเดล EC1 และ EC2 นั้น ยังไม่ได้มีการคิดค้นหาวิธีทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งวงจรสมมูล แต่ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอขึ้นมาเพื่อที่จะนำมาใช้ร่วมกับบกระบวนการทางคณิตศาสตร์ดังที่ทำการอธิบายในบทต่อไป

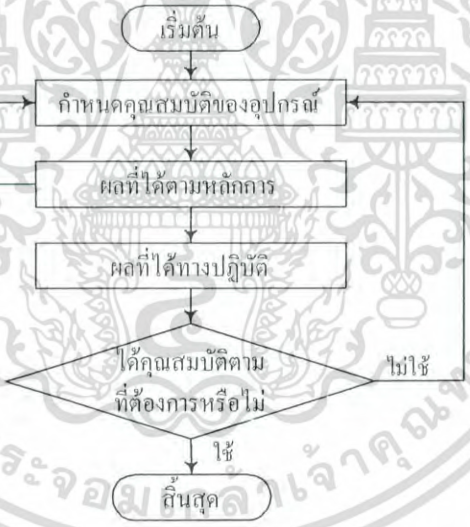
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

3.1 พื้นฐานการออกแบบที่เหมาะสม

การวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์มักจะเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ระบบ ณ ที่นี้หมายถึง สิ่งที่ต้องการทำการศึกษาหรืออาจจะกล่าวได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นจะถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของระบบที่ศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของระบบ โดยที่เราไม่ต้องทำการศึกษากับระบบจริง โดยทั่วไป แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มาจากหลักการหรือกฎทางธรรมชาติที่นักวิทยาศาสตร์ได้สังเกตและทำการศึกษาทดลองมาแล้ว เป็นต้นว่าหลักการอนุรักษ์พลังงาน หลักการอนุรักษ์มวลสาร กฎของนิวตันที่ใช้อธิบายกลศาสตร์ของสสาร กฎของโอห์ม เป็นต้น [11-12]



รูปที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม

แนวความคิดโดยทั่วไปของการออกแบบทางด้านวิศวกรรมจะมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังรูปที่ 3-1 ซึ่งประกอบด้วยการกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ต้องการออกแบบ (device specification) การพิจารณาผลที่ได้จากหลักการทางทฤษฎี (conceptual solution) การพิจารณาผลที่ได้ทางปฏิบัติ (practical solution) และการตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบแล้ว จะเห็นได้ว่าการออกแบบด้วยแนวความคิดนี้ผู้ออกแบบสามารถพิจารณาเปลี่ยนแปลงแก้ไขแนวทางการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ระหว่างการออกแบบจนทำให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ วิธีการออกแบบนี้จะเป็นการออกแบบโดยวิธีแก้ปัญหาโดยตรง ซึ่งวิธีการแก้ปัญหามี 2 ลักษณะคือ การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ

3.1.1 การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ

การแก้ปัญหาโดยตรง (direct problem solving) คือการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากระบบว่าจะเป็นอย่างไรเมื่อสิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3-2 เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจจะสมมติว่าระบบในรูปที่ 3-2 คือ $z = x + y$ จะเห็นว่า สิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบคือ x และ y ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้รับจากระบบคือ z ถ้าเรากำหนดให้ $x = 10$ และ $y = 20$ เราสามารถคำนวณหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ได้รับจากระบบคือ $z = 30$

รูปที่ 3-2 การแก้ปัญหาโดยตรง

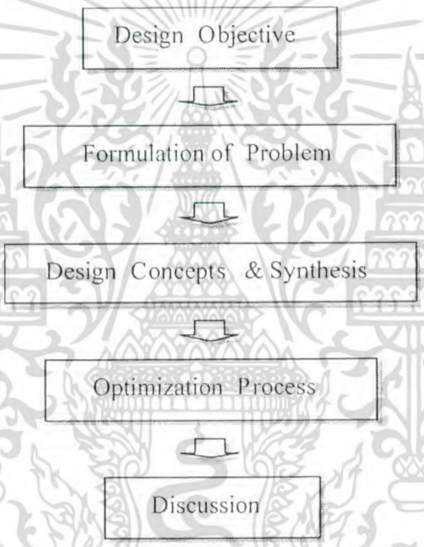
การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ (inverse problem solving) วิธีการแก้ปัญหาแบบนี้จะกำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการได้จากระบบ โดยคำถามคือจะต้องป้อนสิ่งใดเข้าสู่ระบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่กำหนด เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจให้พิจารณาจากรูปที่ 3-3 โดยสมมติอีกครั้งว่าถ้าระบบคือ $z = y + x$ ถ้าเรากำหนดให้ $z = 30$ เราจะมีคำถามว่า x และ y ควรจะเป็นอย่างไร ในกรณีนี้คำตอบที่เป็นไปได้มีมากกว่าหนึ่งคำตอบ ไม่ใช่เพียงคำตอบ $x = 10$ และ $y = 20$ เท่านั้นอาจจะเป็น $x = 15$ และ $y = 15$ ก็ได้ ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาลักษณะนี้อาจจะกำหนดเงื่อนไขของสิ่งที่ป้อนเข้าก็ได้เช่น $0 < x, y < 20$ แนวทางการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับนี้เป็นแนวของหลักการหาค่าที่เหมาะสม

รูปที่ 3-3 การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 หลักการออกแบบที่เหมาะสม

การออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ในงานวิศวกรรมจะมีการกำหนดเป้าหมายและเงื่อนไขขึ้นเพื่อให้ตรงกับความต้องการใช้งาน ซึ่งการออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนซึ่งจะทำให้การออกแบบด้วยแผนผังดังรูปที่ 3-1 จะเป็นไปด้วยความยุ่งยากและจำเป็นต้องใช้ความรู้และประสบการณ์ของผู้ออกแบบอย่างสูง ผลลัพธ์อาจเกิดจากการลองผิดลองถูกจนกระทั่งได้ค่าที่มีความเหมาะสมตามเป้าหมายที่ต้องการซึ่งต้องเสียเวลาในการออกแบบอีกทั้งโอกาสที่จะได้ค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ก็มีความเป็นไปได้น้อยและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบหรือราคาของวัสดุก็จำเป็นต้องทำการลองผิดลองถูกใหม่ซึ่งทำให้เสียเวลาและต้นทุนในการสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบ จากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้มีการนำเสนอหลักการออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมช่วยในการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างแสดงดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

จากแผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมตามรูปที่ 3-4 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนในการออกแบบเป็นดังนี้

3.1.2.1 กำหนดเป้าหมายการออกแบบ

การกำหนดเป้าหมายการออกแบบ (design objective) คือการกำหนดความต้องการที่จะให้ผลของการออกแบบนั้นมีลักษณะเป็นอย่างไรตามเงื่อนไขที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.2 กำหนดรูปแบบของปัญหา

กำหนดรูปแบบของปัญหา (formulation of problem) เป็นการศึกษาวิธีและขั้นตอนต่าง ๆ ของสิ่งที่ต้องการออกแบบ รวบรวมสมการที่ใช้ในการออกแบบในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเป้าหมายที่ต้องการให้ได้เพียงพอ ทั้งนี้เพราะจะช่วยนำไปสู่การกำหนดสมการเป้าหมายและเงื่อนไขที่ถูกต้อง

3.1.2.3 หลักการออกแบบและการสังเคราะห์

หลักการและการสังเคราะห์การออกแบบ (design concept and synthesis) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของสมการที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 จัดความสัมพันธ์ของสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกันเพื่อให้แสดงถึงสิ่งที่เป้าหมายต้องการ รวมทั้งการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและตัวแปรที่เลือกใช้

3.1.2.4 การหาค่าที่เหมาะสม

การหาค่าที่เหมาะสม (optimization process) เป็นวิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ ดิเทอมินิสติก (deterministic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของแกรเดียน และสโตชาสติก (stochastic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น

3.1.2.5 อภิปรายผลการออกแบบ

อภิปรายผลการออกแบบ (discussion) เป็นการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้หลังจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมว่ามีลักษณะเป็นตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งการที่ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการนั้นอาจเกิดจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ผิดพลาดหรือสาเหตุใดก็ตามที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นหลังการออกแบบจะต้องมีการนำผลลัพธ์มาอภิปรายเสมอเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเสมอ

3.1.3 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม

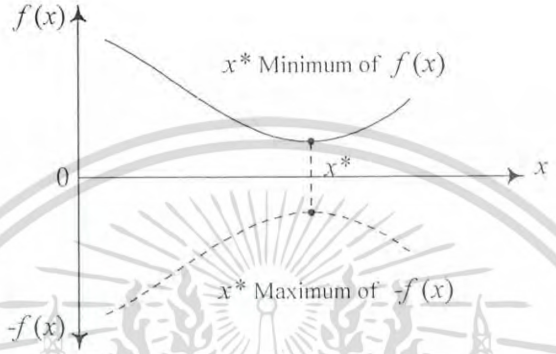
โดยทั่วไปการหาค่าที่เหมาะสมจะเป็นการหาค่าตัวแปรของฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) และเงื่อนไข (constraints function) ที่กำหนด ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขจะแสดงดังสมการที่ 3.1 - 3.4 ดังนี้

Minimize	$F(\mathbf{x})$		Objective Function	(3.1)
Subject to			constraints Function	
	$g_j(\mathbf{x}) \le 0$	$j = 1,...,l$	Inequality Constraint	(3.2)
	$h_k(\mathbf{x}) = 0$	$k = 1,...,m$	Equality Constraint	(3.3)
	$x_i^l \le x_i \le x_i^u$	$i = 1,...,n$	Side Constraint	(3.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\mathbf{x} = (x_1, ...x_n)$ เป็นเวคเตอร์ของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้

สมการที่ 3.1 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจเป็นการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันก็ได้ จากรูปที่ 3-5 จะเห็นได้ว่า x^* เป็นจุดต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ และเป็นจุดสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันจะมีความหมายเดียวกันกับการหาค่าสูงสุดของค่าลบของฟังก์ชันนั้น



รูปที่ 3-5 คำตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$

สมการที่ 3.2 แสดงฟังก์ชันเงื่อนไขที่น้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (inequality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด

สมการที่ 3.3 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันของเงื่อนไขที่เท่ากับศูนย์ (equality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนด

สมการที่ 3.4 เป็นสมการที่ใช้กำหนดช่วงของค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อป้องกันการได้ค่าคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ

โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

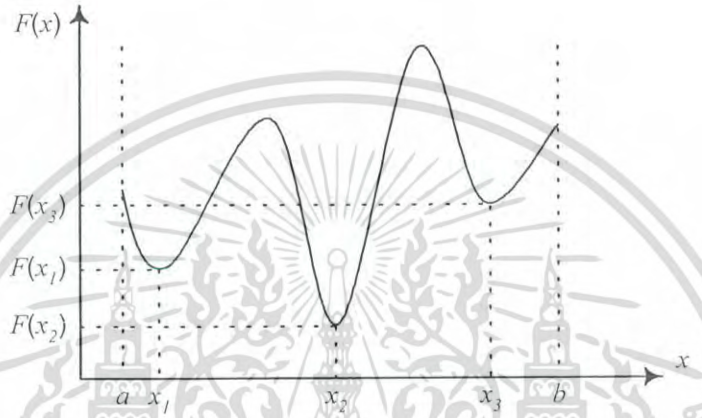
1. ดิเทอมินิสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของแกรเดียน
2. สโตชาสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น

3.1.3.1 จุดที่เหมาะสม (Optimal Point)

ความหมายของจุดที่เหมาะสมสามารถถูกกำหนดได้ดังนี้ สมมติว่ามีโดเมนที่กำลังพิจารณาของตัวแปร x โดยที่ x^* และ x^{**} เป็นจุดในโดเมน x นั้นด้วย จุด x^* จะถูกเรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นจุดที่เหมาะสมเฉพาะที่ (local optimal point) ถ้าไม่มีจุดใดเลยในย่านใกล้เคียงที่ดีกว่าจุด x^* ขณะที่จุด x^{**} จะถูกกล่าวว่าเป็นจุดเหมาะสมที่สุดของทั้งหมด (global optimal point) ถ้าไม่มีจุดใดเลยในโดเมน x นั้นที่ดีกว่า x^{**} พิจารณารูปที่ 3-6 ซึ่งแสดงค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x)$ บนโดเมน $x \in [a,b]$ เราจะเห็นว่า จุด x_1 x_2 และ x_3 ทุกจุดจะเรียกว่าเป็นจุดต่ำสุดเฉพาะที่เพราะเมื่อพิจารณาค่าของฟังก์ชันเป้าหมายรอบ ๆ จุดเหล่านี้แต่ละจุดแล้วจะมีค่าฟังก์ชันมากกว่าของจุดทั้งสามนั่นเอง ขณะที่จุด x_2 ก็ยังเป็นจุดต่ำสุดของทั้งหมดด้วย เพราะค่าของฟังก์ชันเป้าหมายที่มีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่จุด x_2 ในโดเมน x



รูปที่ 3-6 กราฟค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x)$ บนโดเมน x

3.1.3.2 การหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมินิสติก

กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมินิสติกจะอาศัยพื้นฐานของเกรเดียน [11-12] โดยเริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร $\mathbf{x}^{(0)}$ และใช้ค่าเริ่มต้นนี้หาค่าทิศทางและขนาดการลู่เข้าสู่คำตอบของฟังก์ชัน หลังจากนั้นจะมีการตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดว่าพอใจหรือไม่ หากไม่พอใจก็จะมีการหาค่าทิศทางและขนาดการลู่เข้าสู่คำตอบของฟังก์ชันซ้ำใหม่วนไปจนกว่าจะเป็นที่พอใจ ซึ่งสามารถกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้

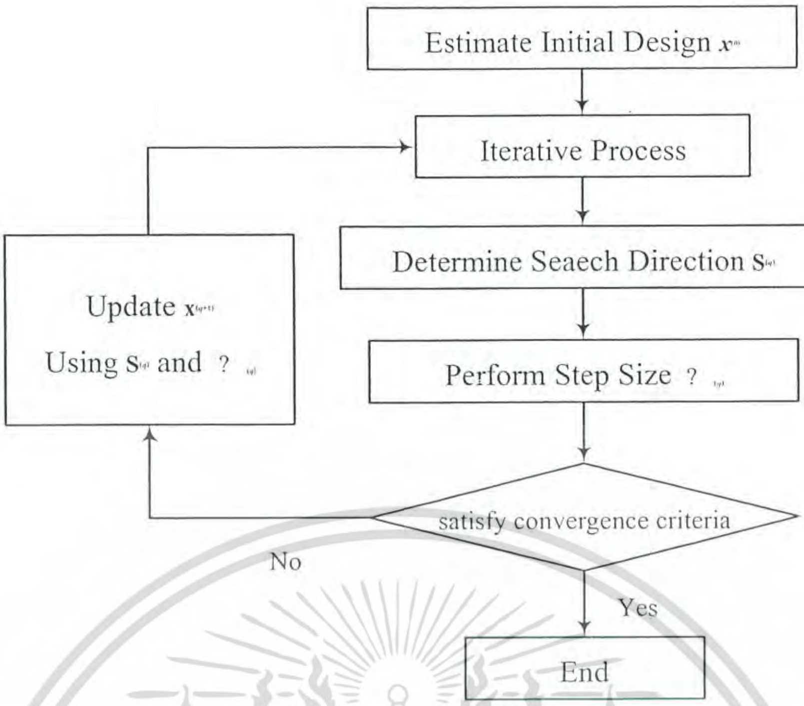
$$\mathbf{x}^{(q+1)} = \mathbf{x}^{(q)} + \alpha_q \mathbf{S}^{(q)} \tag{3.5}$$

เมื่อ q เป็นจำนวนของการทำซ้ำ

$\mathbf{S}$ เป็นเวกเตอร์ทิศทางที่ลู่เข้าสู่เป้าหมาย

α เป็นขนาดระยะในการเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของ $\mathbf{S}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-7 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมินิสติก

แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมินิสติกแสดงในรูปที่ 3-7 กระบวนการของการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีนี้ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การดำเนินการหาทิศทางของเวคเตอร์ **S** ในช่วงที่เป็นไปได้ของคำตอบ
2. กระทำการค้นหาระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไป (step size) ในทิศทางของเวคเตอร์ S
3. พิจารณาการสิ้นสุดกระบวนการเมื่อได้คำตอบที่ยอมรับได้ตามเงื่อนไข

3.2 จีเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithms)

จีเนติกอัลกอริธึม [13-16] คือ อัลกอริธึมที่ใช้ในการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (optimization) และปรับปรุงคำตอบโดยเลียนแบบพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ โดยมีวิธีการขยายพันธ์ทางธรรมชาติ (reproduction) การคัดเลือก โดยธรรมชาติ (natural selection) ตัวจีนีติกอัลกอริธึมจะดำเนินการในลักษณะของพันธุศาสตร์

จุดเริ่มแรกของพันธุศาสตร์เริ่มขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1859 เมื่อ ชาร์ล ดาวิน (Charles Darwin) ได้เสนอทฤษฎีซึ่งทำให้เกิดข้อถกเถียงอย่างมากในชื่อหนังสือ “พื้นฐานของสิ่งมีชีวิตโดยการคัดสรรทางธรรมชาติหรือการปรับตัวเพื่อรักษาเผ่าพันธุ์” (On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life) หรือที่รู้จักกันในชื่อ “พื้นฐานของสิ่งมีชีวิต” (The origin of species) ในหนังสือนั้นได้นำเสนอการค้นคว้าของเขาโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบระหว่างสิ่งมีชีวิตสายพันธ์เดียวกันแต่ถิ่นที่อยู่อาศัยคนละที่ มีผลให้เกิดการปรับตัวให้เหมาะสมกับการดำรงชีวิต

และในเวลาไล่เลี่ยกัน เกเกอร์ เมนเดล (Gregor Mendel) ได้ทำการค้นคว้าในเรื่องของลักษณะเฉพาะของตัวบุคคล โดยได้ทำการทดลองกับต้นถั่ว และได้ค้นพบยีน (Gene) แต่การค้นพบของไม่เมนเดลนั้นไม่เป็นที่แพร่หลายและไม่มีคนสนใจมากนัก แต่การค้นพบของเมนเดลนี้ก็เป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาพันธุศาสตร์ในเวลาต่อมา ภายหลังเมนเดลเสียชีวิตไปประมาณ 30 ปี วอลเตอร์ ซูทัน (Walter Sutton) ทำการทดลองและค้นพบว่ายีนนั้นเป็นส่วนประกอบของโครโมโซม (Chromosomes) ซึ่งโครโมโซมนั้นจะอยู่ในนิวเคลียส (Nucleus) อีกทีหนึ่ง โดยโครโมโซมนั้นจะเป็นตัวกำหมดรูปแบบลักษณะของสิ่งมีชีวิต

โครโมโซมนั้นประกอบตัวขึ้นเป็น DNA (Deoxyribonucleic Acid) โดยพันธะเคมีของ DNA นั้นจะเรียกว่านิวคลีโอไทด์ (Nucleotides) โดยประกอบขึ้นจากสาร 4 ชนิด อันได้แก่ อะดีนีน (Adenine : A) , กวานีน (Guanine : G) , ไซโตซีน (Cytosine : C) และ ไทมีน (thymine : T) โดยกระบวนการจับคู่กันแบบพันธะทางเคมีพบว่าการจับคู่กันของนิวคลีโอไทด์ 3 ตัวเรียกว่า โคดอน (Codon) และการที่โคดอนหลายๆตัวจับรวมกันเป็นสายเราเรียกว่า สายของโคดอนหรือยีน ขั้นต่อไปของกระบวนการคือการจับรวมกันเป็นสายของยีนเพื่อถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่เราเรียกว่า DNA

จีเนติก อัลกอริธึม นั้นถูกคิดค้นโดยจอห์น ฮอลแลนด์ (John Holland) ซึ่งสนใจในทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติในการกำเนิดประชากรของสิ่งมีชีวิตรุ่นต่อๆไป ซึ่งประกอบด้วยการคัดเลือกทางธรรมชาติ คือสิ่งมีชีวิตใดมีความแข็งแกร่งกว่าย่อมมีโอกาสในการอยู่รอดมากกว่า หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ยีนใดๆซึ่งประกอบตัวขึ้นจากโครโมโซมที่มีลักษณะดีกว่ายีนอื่นๆ ย่อมมีโอกาสอยู่รอดสูงกว่า และยีนที่สามารถอยู่รอดได้ก็จะสามารถถ่ายทอดลักษณะเด่นไปยังลูกหลานได้ จากที่กล่าวมานี้ จอห์น ฮอลแลนด์และคณะผู้ร่วมงานในมหาวิทยาลัยมิชิแกนได้ทดลองนำมาใช้กับการคำนวณทางคณิตศาสตร์จนเกิดเป็น จีเนติก อัลกอริธึม เมื่อปี ค.ศ. 1960 โดยเริ่มแรกนั้นถูกออกแบบให้เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติ (Computer Base Model for Natural Genetic) ซึ่งใช้ในทางชีววิทยา (Biological) ทุกวันนี้จีเนติก อัลกอริธึมกลายเป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์มากกว่าที่จะเป็นแบบจำลองทางชีววิทยา ต่อมาในปี ค.ศ. 1995 กอสรี่และเยน (Ghoshry & Yen) ได้เสนอวิธีที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นเรียกว่า MGA (Modified Genetic Algorithm) ซึ่งได้รับการพัฒนามาจากการผสมกันระหว่าง จีเนติกอัลกอริธึม แบบปกติ (Simple Genetic Algorithm : SGA) และ SA (Simulated Annealing) ขั้นตอนการคำนวณที่ได้เสนอมาทั้งหมดเป็นการทำงานแบบวิธิเชิงพันธุศาสตร์ แต่ได้พัฒนาเป็นฟังก์ชันชุดใหม่ ซึ่งใช้หลักของ SA ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า MGA มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดในรูปแบบต่าง ๆ ด้วยเวลาที่น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิม และผลที่ได้มีความถูกต้อง นอกจากนี้ ผลที่ได้ยังแสดงให้เห็นว่า MGA มีความคลุมเครือลดลง ต่อมาในปี ค.ศ. 1997 ชิโมได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระ (Shimodaira) ได้นำเสนอวิธีเชิงพันธุศาสตร์แบบใหม่ เรียกว่า DCGA (Deversity Control oriented Genetic Algorithm) ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดปัญหาการจับกลุ่มของผลลัพธ์ (Local Optimum Solution) โดยโครงสร้างประชากรรุ่นใหม่ในวิธี DCGA นั้นได้รับการคัดเลือกจากการรวมกันของประชากรในรุ่นก่อนและรุ่นต่อมาด้วยวิธีที่เรียกว่า CPSS (Crocss-generational Probabilistic Survival Selection) ซึ่งเป็นการคำนวณโดยใช้ระยะทาง ระหว่างโครงสร้างใหม่และโครงสร้างที่ดีที่สุด พบว่าการทำงานของ DCGA ดีกว่าวิธีเชิงพันธุศาสตร์แบบธรรมดาตรงในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Global Optimum Solution) แต่ว่าใช้เวลาในการคำนวณในขั้นตอนการคัดเลือกมากกว่า

การทำงานของของจีเนติก อัลกอริธึม นั้นจะมีตัวดำเนินการของจีเนติกอัลกอริธึม (operators of genetic algorithms) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่ลอกเลียนมาจากธรรมชาติดังนี้

1.การคัดเลือก (reproduction)

2.การสร้างโครโมโซม (crossover)

3.การกลายพันธ์ (mutation)

จีเนติกอัลกอริธึมเหมาะสำหรับการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่บางครั้งอาจไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องแม่นยำ (exact optimum) แต่มีนักวิจัยหลายคนได้ใช้จีเนติกอัลกอริธึมช่วยในการหาค่าให้ได้ค่าใกล้เคียงที่สุดแล้วจึงใช้วิธีการอื่นเพื่อเอาคำตอบที่ถูกต้องแม่นยำ

จีเนติกอัลกอริธึมแตกต่างจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (optimization) อื่นๆ ดังนี้

1. เป็นกระบวนการที่อาศัยข้อมูลทางสถิติ
2. เป็นการค้นหาคำตอบที่ละหลายๆชุดพร้อมกัน ไม่ใช่เพียงชุดเดียว
3. เป็นการหาคำตอบจากการแทนค่าลงไปในสมการเพื่อหาคำตอบ ไม่ใช่การแก้สมการเพื่อหาคำตอบ
4. ไม่ต้องการเทคนิคทางคณิตศาสตร์อื่นๆเข้ามาช่วย ต้องการเพียงฟังชั่นเป้าหมายและฟังชั่นความเหมาะสมในการหาคำตอบ

จีเนติกอัลกอริธึมมีการทำงานแบบเอากลุ่มตัวแปรมาทำเป็นรหัส โดยจะไม่รบกวนรูปแบบสมการฟังก์ชันและตัวแปรโดยตรง และยังมีการค้นหาคำตอบจากจำนวนโครโมโซมทั้งหมด โครโมโซมที่ผ่านการคัดเลือกแล้วเท่านั้นที่สามารถให้กำเนิดรุ่นต่อไปได้ โอกาสของการค้นหาคำตอบได้จะมีมากขึ้น เทคนิคการค้นหาคำตอบอื่นเช่น gradient techniques ต้องใช้ผลการคำนวณหรือผลจากการวิเคราะห์ที่ดัดแปลงแล้วเพื่อหาจุดอ้างอิงให้ช่วยค้นหาคำตอบต่อไปได้แต่จี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนติกอัลกอริธึมค้นหาคำตอบโดยการสุ่มตัวอย่างจากข้อมูลหรือค่าผลลัพธ์ที่ได้มาโดยไม่มีการดัดแปลงซึ่งเป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบต่อไป และนอกจากนี้จีเนติกอัลกอริธึมยังใช้กระบวนการเฟ้นสุ่มทางสถิติใช้เป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบด้วยเช่นกัน

3.2.1 ฟังก์ชันเป้าหมายและฟังชั่นค่าความเหมาะสม (Objective Function & Fitness Function)

การหาคำตอบที่ดีที่สุดของจีเนติก อัลกอริธึมนั้นมีพื้นฐานอยู่บนผลลัพธ์จากการหาคำตอบที่ผ่านมา วิธีการของจีเนติก อัลกอริธึมจะไม่พิจารณาจากขั้นตอนของการแก้สมการ แต่จะพิจารณาโดยตัดสินว่าคำตอบที่ได้รับนั้นดีพอหรือไม่ ดีขึ้นหรือแย่ลง หรือเป็นคำตอบที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการหรือไม่ โดยจะพิจารณาจากฟังชั่นเป้าหมาย (Objective Function : F) เนื่องจากแต่ละปัญหาสามารถกำหนดฟังชั่นเป้าหมายซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัว เงื่อนไข หรือข้อกำหนดต่างๆของปัญหานั้นๆได้ โดยสมการที่มีเงื่อนไขของตัวแปรหรือข้อกำหนดที่กล่าวมานั้นเรียกว่าฟังชั่นความเหมาะสม (Fitness Function : f) ซึ่งค่าความเหมาะสมนี้เปรียบเสมือนค่าความสามารถในการอยู่รอดของแต่ละโครโมโซม กล่าวอีกนัยหนึ่ง ฟังชั่นความเหมาะสมคือฟังชั่นที่แสดงถึงความใกล้เคียงของผลลัพธ์ที่ต้องการของแต่ละโครโมโซม เป็นตัวบ่งบอกว่าค่าชุดตัวแปรที่อยู่ในโครโมโซมนั้นๆส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการได้ขนาดไหน โดยทั่วไปแล้วเรามักใช้ฟังชั่นเป้าหมายที่ถูกปรับให้เหมาะสมกับการหาคำตอบของจีเนติก อัลกอริธึม เป็นฟังชั่นความเหมาะสม

ในปัญหาต่างๆทั่วไป ฟังชั่นเป้าหมายอาจเป็นการหาค่าสูงสุด-ต่ำสุดหรือไม่ก็ได้ ซึ่งฟังชั่นเป้าหมายนี้อาจมีค่าเป็นลบได้ในบางกรณี แต่ในแนวคิดของจีเนติก อัลกอริธึม ฟังชั่นความเหมาะสมซึ่งเป็นตัววัดสถานะของโครโมโซม จะต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงฟังชั่นเป้าหมายให้เป็นฟังชั่นความเหมาะสม

3.2.2 ตัวดำเนินการทางจีเนติกอัลกอริธึม (Operator of genetic algorithms)

แบบจำลองทางพันธุกรรมที่นำมาใช้ในจีเนติกอัลกอริธึมถูกเรียกว่าโครโมโซม (chromosome) ในโครโมโซมประกอบด้วยบิทจำนวน n บิท ค่าของบิทในของแต่ละโครโมโซมที่นิยมใช้มี 3 แบบคือ

1. บิท 0 หรือบิท 1 (binary coding)
2. บิทจำนวนเต็ม (integer coding)
3. บิทจำนวนจริง (real number coding)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าบิทในแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานค่าบิท 0 หรือบิท 1 เป็นทฤษฎีที่ยอมรับและถูกออกแบบมานานแล้ว ข้อดีแบบิท 0 หรือ บิท 1 คือลดขนาดช่วงการหาค่าที่เหมาะสม (optimization space) ลงแต่การใช้งานในบางอย่างทำให้เกิดการสูญเสียค่าความระเอียดของผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งถ้าค่าบิทเป็นจำนวนเต็มหรือจำนวนจริง ขนาดช่วงการหาค่าที่เหมาะสม (optimization space) จะมีขนาดใหญ่กว่าและมีความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้มากกว่า

บิทในโครโมโซมของจีเนติอัลกอริธึมนั้นคือค่าของชุดตัวแปรที่จะนำไปทดลองแทนในสมการเพื่อดูผลลัพธ์ที่ได้ โดยนิยามว่าถูกเรียงกันอยู่ในแนวนอน

ความมีประสิทธิภาพของจีเนติกอัลกอริธึมขึ้นอยู่กับตัวดำเนินการทางจีเนติกอัลกอริธึม ซึ่งตัวดำเนินการจีเนติกอัลกอริธึมประกอบด้วย

1. การคัดเลือก
2. การสร้างโครโมโซมลูก
3. การกลายพันธ์
4. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึม

3.2.2.1 การคัดเลือก (reproduction or selection)

การคัดเลือกเป็นกระบวนการที่จะตัดสินว่าโครโมโซมใดจะคงอยู่ในรุ่น (generation) เพื่อนำไปคัดเลือกต่อไป โดยจะตัดสินจากค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมโดยค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมนั้นหาได้จากการฟังชั่นความเหมาะสม โดยโครโมโซมที่มีค่าตัวแปรที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ได้ใกล้เคียงกับฟังชั่นความเหมาะสมมาก ก็จะมีค่าความเหมาะสมสูง และมีโอกาศที่จะถูกคัดเลือกสูง ในบางกรณีฟังชั่นเป้าหมายและฟังชั่นความเหมาะสมอาจเป็นฟังชั่นเดียวกัน โดยโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกนั้นแทนด้วย $P_{select(i)}$ หาได้จากสมการที่ (3.6)

$$P_{select(i)} = \frac{f_1}{\sum_{i=1}^{k} f_i} \tag{3.6}$$

โดยที่ f_i คือค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม

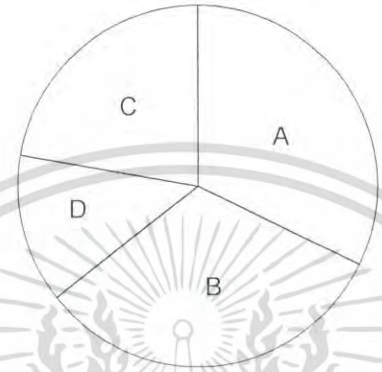
ส่วนจำนวนโครโมโซมที่ถูกคัดเลือก (num_i) เพื่อนำไปจับคู่และสร้างโครโมโซมลูกสามารถหาได้จากสมการที่ (3.7)

$$num_i = N * P_{select}(i) \tag{3.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ N คือจำนวนโครโมโซมทั้งหมด (population size)

กระบวนการที่ตัดสินว่าโครโมโซมใดจะยังอยู่เพื่อนำไปคัดเลือกในรุ่นต่อไปโดยตัดสินจากความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซม ถ้าเป็นบิทแบบไบนารี่จะใช้เทคนิควงล้อรูเล็ดและบิทเป็นจำนวนจริงหรือจำนวนเต็มจะใช้ normalized geometric การคัดเลือกโครโมโซมโดยเทคนิควงล้อรูเล็ทแสดงดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 การคัดเลือกโครโมโซมโดยเทคนิควงล้อลูเล็ท

เทคนิคของวงล้อรูเล็ทนี้เป็นวิธีการคัดเลือกตามอัตราส่วน โดยพิจารณาค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว โดยจะทำการแบ่งพื้นที่วงล้อตามสัดส่วนของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว โดยให้ผลรวมของวงล้อรูเล็ทคือผลรวมของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมทั้งหมด จากนั้นจะทำการสุ่มค่าตั้งแต่ 0 ถึง ค่าผลรวมความเหมาะสม ถ้าตัวเลขที่สุ่มไปหยุดบนพื้นที่ของโครโมโซมใด โครโมโซมตัวนั้นจะถูกเลือกดังนั้น โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมสูง ย่อมมีโอกาศถูกเลือกมากกว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำ

ตัวอย่างการทำงานของวงล้อรูเล็ท สมมุติให้โครโมโซมที่เข้าสู่กระบวนการคัดเลือกมี 4 โครโมโซม อันได้แก่ A, B, C และ D ดังรูปที่ 3-8 โดยโครโมโซมแต่ละโครโมโซมมีค่าความเหมาะสมดังนี้

A = 0.9926, B = 0.9214, C = 0.7352 และ D = 0.3463

ผลรวมของค่าความเหมาะสมทั้งหมด (Sum of Fitness) = 2.9955 เมื่อนำมาจัดอัตราส่วนแล้ว ค่า A จะมีพื้นที่ในวงกลม 33% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 0 ถึง 0.9926, ค่า B จะมีพื้นที่ในวงกลม 30.75% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 0.9927 ถึง 1.914, ค่า D จะมีพื้นที่ในวงกลม 11.56% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 1.915 ถึง 2.2603 และ ค่า D จะมีพื้นที่ในวงกลม 24.54% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 2.2603 ถึง 2.9955

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้น จะทำการสุ่มค่าคงที่ขึ้นมา 1 ค่า โดยค่าคงที่นั้นมีค่าอยู่ระหว่างอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2.9955 ถ้าค่าคงที่ที่สุ่มขึ้นมามีค่าเท่ากับค่าภายในพื้นที่ของโครโมโซมใด โครโมโซมนั้นจะถูกเลือก

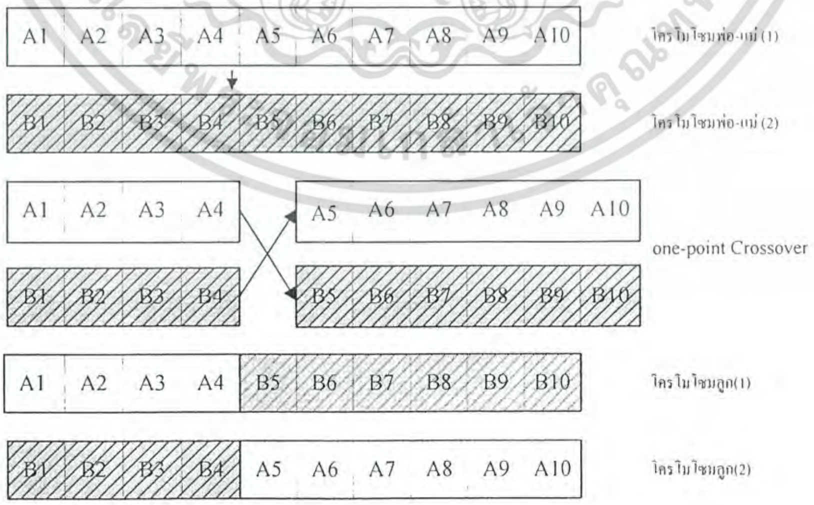
ในกระบวนการของการคัดเลือกนี้บางครั้งอาจมีวิธีการบางส่วนที่แตกต่างกันไป เช่น จำนวนโครโมโซมที่ถูกการคัดเลือก (num_i) ซึ่งในงานวิจัยของเรนดี้ (Randy L.Haupt) ได้ใช้วิธีการคัดเอา 50% ของจำนวนโครโมโซมจากโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุดของทั้งหมดมาเป็นโครโมโซมพ่อ-แม่ ส่วนงานวิจัยของโคจิ,ยาซูฮิซะและโทชิโอะ (Koji Shimojima , Yasuhisa Hasegawa & Toshio Fukuda) โดยใช้วิธีการคัดเอาโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันสูงกว่าค่าฟังก์ชันที่กำหนดไว้เท่านั้น แล้วจึงทำการสุ่มคัดเอาเพื่อเป็นโครโมโซมพ่อแม่ เป็นต้น

3.2.2.2 การสร้างโครโมโซมลูก (crossover)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการพื้นฐานขั้นต่อมาของจีเนติก อัลกอริธึม หลังจากกระบวนการคัดเลือกได้โคโมโซม พ่อ-แม่แล้วขั้นตอนต่อมาคือการสร้างโครโมโซมลูก หรือการ (crossover) โดยโครโมโซมลูกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะของโครโมโซมพ่อและแม่ปะปนกันอยู่ กระบวนการขั้นต่อไปซึ่งโดยทั่วไปมี 3 วิธี อันได้แก่ one-point crossover, two-point crossover และ uniform crossover

วิธีของ one-point crossover คือการสุ่มค่าตั้งแต่ 1 ถึง n-1 เพื่อหาตำแหน่งในการ crossover โดยที่ n คือค่าจำนวนบิททั้งหมดในโครโมโซมดังตัวอย่างรูปที่ 3-9

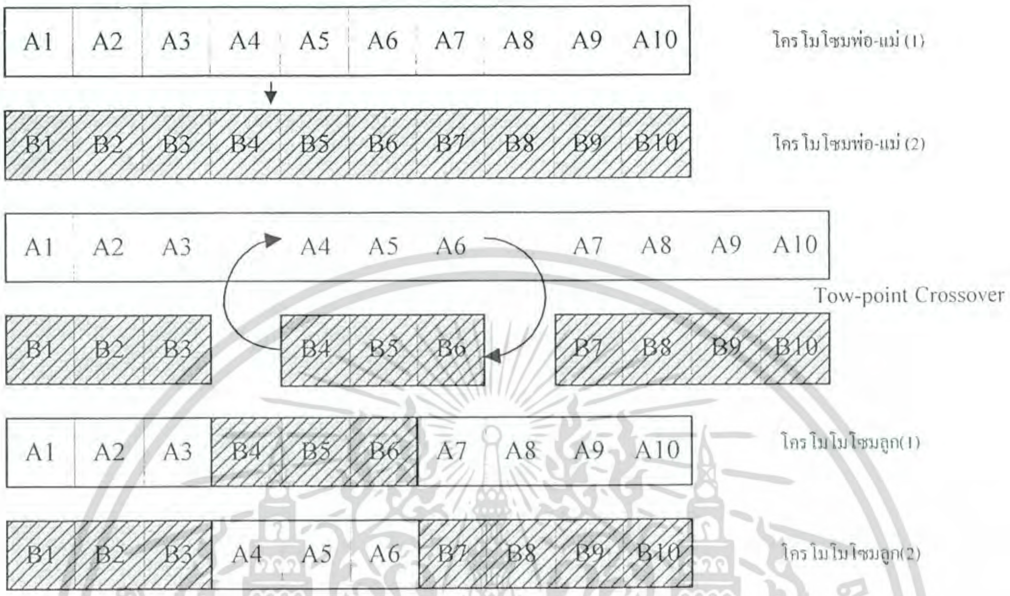
จากรูปที่ 3-9 โครโมโซม พ่อ-แม่ (1) และโครโมโซม พ่อ-แม่ (2) นำมาสร้างโครโมโซมลูกแบบ one-point crossover โดยมีตำแหน่งสำหรับการครอสโอเวอร์ที่สุ่มได้คือ 4 ทำให้โครโมโซมลูก 2 โครโมโซมที่มีการสลับกันของโครโมโซม พ่อ-แม่ ณ ตำแหน่งบิทที่ 4



รูปที่ 3-9 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ one-point crossover

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี two-point crossover คือการสุ่มค่า 2 ค่า ตั้งแต่ 1 ถึง n-1 เพื่อตำแหน่ง 2 ตำแหน่งในการครอสโอเวอร์แล้วทำการสลับบิท โดยการเอาบิทที่อยู่ระหว่างค่าตำแหน่งบิทที่สุ่มได้ 2 ตำแหน่งมาสลับกันระหว่างโครโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2) เพื่อให้ได้โคโมโซมลูก 2 ดังรูปที่ 3-10



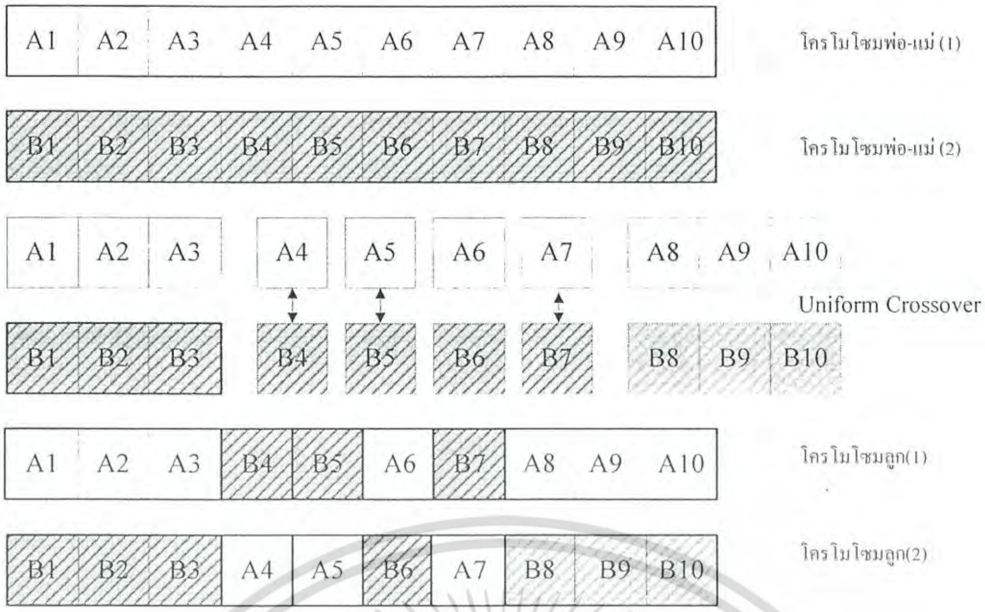
รูปที่ 3-10 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ two-point crossover

จากตัวอย่างรูปที่ 3-10 เป็นการสร้างโครโมโซมลูกแบบ two-point crossover ค่าตำแหน่งบิทที่สุ่มได้คือ 3 และ 6 โดยการสลับค่าบิทที่อยู่ระหว่าง 3 กับ 6 ของโครโมโซม พ่อ-แม่ ทั้ง 2 โครโมโซมจะได้โครโมโซมลูก 2 โครโมโซม

วิธี uniform crossover คือกำหนดจำนวนบิทที่ต้องการแลกเปลี่ยนกันระหว่างโคโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2) แล้วสุ่มจำนวนบิทที่ได้โดยทั่วไปจำนวนบิทที่แลกเปลี่ยนกันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0% ถึง 5 % ดังตัวอย่างรูปที่ 3-11

จากรูปที่ 3-11 กำหนดให้จำนวนบิทที่ต้องการแลกเปลี่ยนมีค่าเท่ากับ 30% ดังนั้น 30% ของจำนวนบิททั้งหมดคือ 10 บิท มีค่าเท่ากับ 3 บิท แล้วสุ่มตำแหน่งบิทที่ 3 ตำแหน่งโดยมีค่าที่สุ่มได้คือ 4, 5, 7 ดังนั้น โครโมโซมลูกที่ได้จะมีการแลกเปลี่ยนกบิทกันระหว่างบิทที่ 4, 5, 7 ของโคโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2)

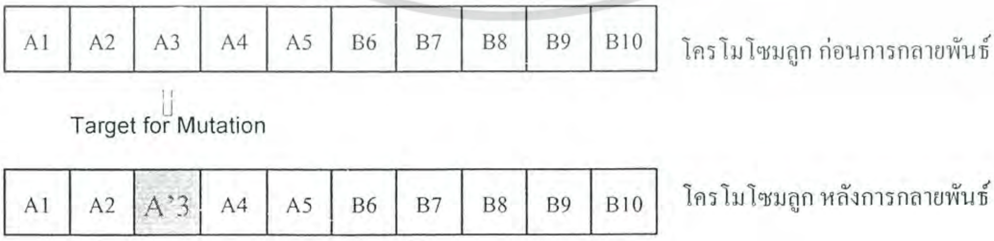
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-11 การสร้างโคโมโซมลูกแบบ uniform crossover

3.2.2.3 การกลายพันธุ์(mutation)

ในธรรมชาติ กระบวนการกลายพันธ์นั้นเกิดจากการที่สาร 4 สารที่ประกอบตัวขึ้นเป็น DNA นั้น เกิดการแทนที่กันผิดตำแหน่ง ทำให้เกิดโครงสร้างทางพันธุกรรมแบบใหม่ขึ้นมา ซึ่งสายพันธ์ใหม่ที่เกิดขึ้นนี้อาจจะดีขึ้นหรือแย่ลงก็ได้ และในจีเนติกอัลกอริธึม จะกำหนดให้มีกระบวนการกลายพันธ์ขึ้นมา เพื่อเพิ่มความหลากหลายของโครโมโซม แต่จะกำหนดอัตราของการกลายพันธ์ไว้ต่ำ โดยมีวิธีการคือ ทำการสุ่มโครโมโซมลูกแล้วสุ่มตำแหน่งบิทในโครโมโซมนั้นเพื่อเปลี่ยนค่าของบิทในโครโมโซมดังกล่าวเนื่องจากโครโมโซมลูกที่ได้จากการครอสโอเวอร์ของโครโมโซม พ่อ-แม่นั้น มีส่วนประกอบของพันธุกรรมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง การกลายพันธุ์จึงสามารถป้องกันข้อบกพร่องดังกล่าวได้ วิธีการกลายพันธุ์ของโครโมโซมลูกแสดงตัวอย่างดังรูป 3.12



รูปที่ 3-12 การกลายพันธุ์(mutation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3-12 ตำแหน่งที่ถูกสุ่มให้มีการกลายพันธุ์คือตำแหน่งที่ 3 โดยมีค่าบิทเปลี่ยนจาก A3 เป็น A'3 โดยที่ค่าของบิทโครโมโซมที่ใช้เป็นแบบบิท 0 หรือ 1 ค่าของ B'3เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 หรือ 0 เป็น 1ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าของ A3 แต่สำหรับค่าบิทที่เป็นแบบจำนวนเต็มหรือจำนวนจริง ค่าของ A'3 จะเป็นค่าที่เกิดจากการสุ่มค่าจำนวนเต็มสำหรับโครโมโซมมีค่าบิทเป็นจำนวนเต็มและจำนวนจริงสำหรับโครโมโซมที่มีค่าบิทเป็นจำนวนจริง

3.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึม

ในการใช้จีเนติกอัลกอริธึม ซึ่งประกอบด้วยตัวดำเนินการต่างๆตามที่ได้อธิบายมาแล้วตัวดำเนินการที่ถือว่าเป็นตัวดำเนินการหลักของจีเนติกอัลกอริธึมได้แก่ตัวดำเนิน ครอสโอเวอร์ และตัวดำเนินการกลายพันธุ์ เนื่องจากการครอสโอเวอร์ เป็นการสร้างโครโมโซมขึ้นใหม่ โดยจากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกแล้วส่วนการกลายพันธุ์เป็นการเพิ่มโอกาสในเปลี่ยนค่าของบิท ดังนั้นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดผลการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมได้แก่จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (population size, $Popsize$), ความน่าจะเป็นจากการสร้างโครโมโซมลูก (crossover rate or crossover probability, P_c) และ ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (mutation rate or mutation probability, P_m)

3.2.3.1 จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (population size, $Popsize$)

จำนวนโครโมโซมหรือ $Popsize$ คือค่าจำนวนโครโมโซมทั้งหมดที่กำหนดขึ้นในกระบวนการของจีเนติกอัลกอริธึมยิ่งมีค่า $Popsize$ มากจะทำให้มีตัวเลือกมากขึ้นด้วยแต่ทั้งนี้การกำหนดค่า $Popsize$ ขึ้นอยู่กับค่าที่กำหนดผู้ใช้เองหรือความซับซ้อนของงานที่จะนำมาค้นหาคำตอบ (optimization)

3.2.3.2 ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูก (crossover probability, P_c)

ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูกหรือค่า P_c คือค่าความน่าจะเป็นที่จะทำให้เกิดการครอสโอเวอร์ของโครโมโซม พ่อ-แม่ โดยทั่วไปจะกำหนดให้ P_c มีค่าอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 0.95 ได้มีการเสนอแนะการหาจำนวนโครโมโซมที่จะถูกครอสโอเวอร์ ไว้ดังสมการที่ (3.8)

$$N_x = P_c * Popsize \tag{3.8}$$

โดยที่ N_x คือจำนวนโครโมโซมที่จะถูกครอสโอเวอร์
$Popsize$ คือจำนวนโครโมโซมทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรืออีกวิธีหนึ่งของการคัดเลือกโครโมโซมที่ใช้ค่า P_c เป็นแนวทางโดยในแต่ละโครโมโซมจะสุ่มค่า r โดยที่ r มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีเงื่อนไขว่า $r \langle P_c$ โครโมโซมนั้นจะถูกครอสโอเวอร์แล้วทำการจับคู่โครโมโซมแบบสุ่มเพื่อทำการครอสโอเวอร์

3.2.3.3 ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (mutation probability, P_m)

ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์หรือค่า P_m เป็นปัจจัยอีกค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ซึ่งทุกบิทในโครโมโซมลูกจะมีโอกาสในการกลายพันธุ์โดยทั่วไปจะกำหนดให้ P_m มีค่าอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.01 และค่า P_m มักจะกำหนดให้มีค่าน้อยๆเพื่อให้โครโมโซมที่ดีมีโอกาสถูกทำลายน้อยลง Dejiong ได้เสนอแนะว่าค่า P_m ควรมีค่าแปรผกผันกับ *Popsize* และ H essner และ Manner ได้เสนอแนวทางการหาค่า P_m โดยประมาณดังสมการที่ (3.9) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกค่า P_m

$$P_m = \frac{1}{Popsize \times \sqrt{m}} \tag{3.9}$$

โดยที่ m คือจำนวนบิทใน 1 โครโมโซม

นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะในจำนวนบิทที่จะถูกกลายพันธุ์ดังสมการที่ (3.10)

$$N_m = P_m \times m \times Popsize \tag{3.10}$$

โดยที่ N_m คือจำนวนบิททั้งหมดที่ถูกกลายพันธุ์ m คือจำนวนบิทใน 1 โครโมโซม

เมื่อได้ค่า P_m แล้วในแต่ละโครโมโซมจะถูกสุ่มค่า r โดยที่ r มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีเงื่อนไขว่าถ้า $r \langle P_m$ โครโมโซมนั้นจะถูกเลือกให้มีบิทที่ถูกกลายพันธุ์

จากที่กล่าวมาแล้วว่า ตัวดำเนินการครอสโอเวอร์เป็นตัวดำเนินการหลักของจีเนติกอัลกอริธึมการ ครอสโอเวอร์ จึงถือเป็นกระบวนการหลักที่ทำให้จีเนติกอัลกอริธึมเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง ดังนั้น ค่า P_c จึงมักถูกกำหนดให้มีค่าสูงแต่วิธีการครอสโอเวอร์ จะนำเอาโครโมโซมพ่อ-แม่ ที่อยู่ติดกันมาครอสโอเวอร์กัน หรือจะกระทำโดยการสุ่มเอาโครโมโซมพ่อ-แม่มาครอสโอเวอร์ กันก็ได้และเช่นเดียวกันกับการกลายพันธุ์ ผู้ใช้อาจสุ่มเอาโครโมโซมลูกขึ้นมาเพื่อทำการกลายพันธุ์ หรือสุ่มจากค่า r ของแต่ละโครโมโซมเพื่อเปรียบเทียบกับค่า P_m ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดผู้ใช้เอง L.Haupt ได้เสนอแนะการใช้จีเนติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริธึมเพื่อให้เกิดการลู่เข้าสู่คำตอบ (algorithms convergence) อย่างได้ผลมากขึ้นโดยได้มีข้อเสนอแนะดังนี้คือ

1. เพิ่มจำนวนการกลายพันธุ์

2. เพิ่มจำนวนโครโมโซม (*Popsize*)

3. เพิ่มเติมเงื่อนไขหรือบังคับ (constrains) ของปัญหาที่ต้องวิเคราะห์

จากข้อเสนอแนะนำดังกล่าวอาจช่วยให้สามารถหาคำตอบได้ดีขึ้นหรือรวดเร็ว แต่ Randy L. Haupt ได้กล่าวถึงปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการลู่เข้าสู่คำตอบ convergence เช่นจำนวนบิทโครโมโซม ถ้ายิ่งจำนวนบิทมากค่าความถูกต้องแม่นยำ (accuracy) ของคำตอบจะมีค่ามากการหาค่าที่เหมาะสม(optimization) จะมีตัวเลือกเพื่อให้ใกล้คำตอบมากขึ้นแต่จะทำให้แต่ถ้าเกิดการลู่เข้าสู้คำตอบ convergence จะช้า และต้องใช้หน่วยความจำในการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมดังกล่าวมาก

3.2.4 การทำงานของจีเนติกอัลกอริธึม

ขั้นตอนการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมมีดังนี้คือ

1.การสร้างจำนวนโครโมโซมและจำนวนบิท (initialization)

2.การหาค่าฟังก์ชัน (cost function)

3.การคัดเลือก (reproduction or selection)

4.การสร้างโครโมโซมลูก (crossover)

5.การกลายพันธุ์ (mutation)

การทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมพันธุ์เริ่มต้นจากโครโมโซมจำนวน k โครโมโซมซึ่งในแต่ละโครโมโซมประกอบด้วยจำนวน n บิท โครโมโซมดังกล่าวเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังสมการที่ (3.11)

$$\text{โครโมโซม } (k) = \{ \text{ บิท1 , บิท2 ,...,บิท n } \} \tag{3.11}$$

โดยที่ค่า k มีค่าตั้งแต่ 1 ถึงจำนวนโครโมโซมที่ต้องการ

คำนวนหาค่าของแต่ละฟังก์ชันของแต่ละโครโมโซม ซึ่งค่าฟังก์ชันที่ได้แต่ละโครโมโซมจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าของบิทในแต่ละ โครโมโซมมีค่าแบบสุ่ม (randomly) จากนั้นทำการคัดเลือกโครโมโซมเพื่อเรียงลำดับโครโมโซมใหม่โดยการคัดเลือกโครโมโซมจะคัดเลือกค่าฟังก์ชันแต่ละโครโมโซม โดยเรียงลำดับจากโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุดไปยังค่าที่น้อยที่สุด แล้วทำการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุด ณ รุ่น (generation) นั้นซึ่งเรียกโครโมโซมเหล่านี้ว่าโครโมโซมพ่อ-แม่ (parent) จากโครโมโซมพ่อ-แม่ที่ได้สามารถสร้างโครโมโซมลูก (offspring) ได้โดยการ crosser การสร้างโครโมโซมลูกกระทำด้วยวิธีใดก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ หลังจากได้โครโมโซมลูกแล้ว ทำการกลายพันธุ์ หรือ mutation กับโครโมโซมลูกดังกล่าวแล้วหาฟังก์ชันใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุดไปยังค่าที่การน้อยสุด ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ,3 , 4 และ 5 จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ

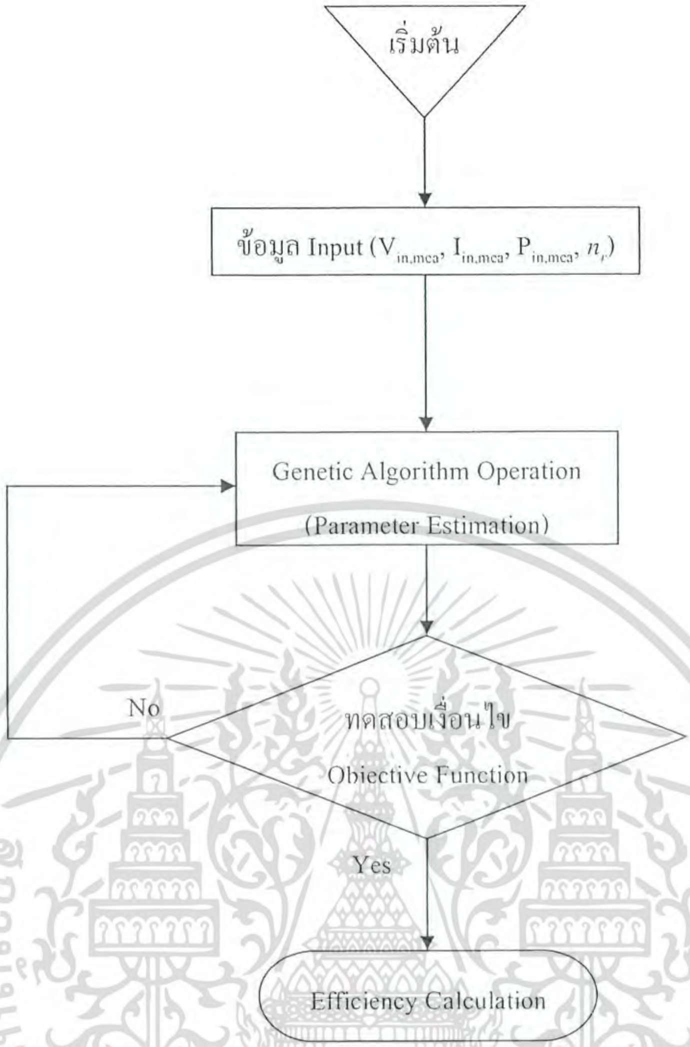
3.3 เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพที่โหลดหนึ่งๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสขณะใช้งานจริงโดยหลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจีนีติกอัลกอริธึม

ในปัจจุบันนั้นมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ถ้าเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กันตามบ้านเรือนโดยมากแล้วจะใช้ไปกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสเป็นส่วนมาก ถ้าเราต้องการทราบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสตัวนั้นๆว่าหลังจากที่ใช้งานเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว ค่าประสิทธิภาพจะคงเหลืออยู่เท่าไร ถ้าเราต้องการที่จะทราบค่าประสิทธิภาพนั้น ก่อนอื่นเราต้องทราบกำลังทางกลขาออกก่อน แล้วจึงสามารถหาค่าประสิทธิภาพได้จากสมการที่ 2.23 วิธีการที่จะทราบกำลังทางกลขาออกที่แม่นยำที่สุดแม่นยำที่สุดคือ วิธรการ Load Test (ศึกษาได้ในหัวข้อ 2.4.1) แต่วิธีการนั้นก็มีความยุ่งยากเนื่องจากจำเป็นที่จะต้องทำการถอดมอเตอร์ออกจากระบบเพื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ อีกวิธีการหนึ่งคือการใช้พารามิเตอร์ของวงจรสมมูล (ศึกษาได้ในหัวข้อ 2.4.2) วิธีการนี้ก็มีความยุ่งยากเนื่องจากจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบมอเตอร์แบบไร้ภาระทางกลและการทดสอบแบบล็อกโรเตอร์ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทำการถอดมอเตอร์ออกจากระบบ จากที่กล่าวมาแล้วนั้นจะพบว่า การได้มาซึ่งค่าประสิทธิภาพนั้นค่อนค้างที่จะมีความยุ่งยากและไม่สะดวกมากนัก

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการที่เราจะทราบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้น ค่อนข้างที่จะยุ่งยาก จึงทำให้เราเกิดแนวความคิดที่ว่า น่าจะมีวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่มีความสะดวก มีความแม่นยำ เชื่อถือได้ และมีความรวดเร็ว จึงเป็นที่มาของ เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพที่โหลดหนึ่งหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสขณะใช้งานจริงโดยหลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจีนีติกอัลกอริธึม จากนี้ไปจะขอเรียกว่า OPT (One Point Test) ซึ่งวิธีการนี้จะอยู่บนพื้นฐานของวงจรมมูลแบบสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนาม (หัวข้อ 2.2.1) โดยเราจะนำจีนีติกอัลกอริธึม มาทำการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลก่อน แล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นไปทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพต่อไปโดยมีขั้นตอนและกระบวนการต่างๆดังรูปที่ 3-13 [17-18]

รูปที่ 3-13 นั้นแสดงขั้นตอนและกระบวนการทำงานของเทคนิค OPT นี้ โดยลำดับขั้นตอยจะเป็นไปในลักษณะของการวนลูปจนกว่าจะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าของฟังชั่นเป้าหมายที่เราได้ทำการตั้งเอาไว้

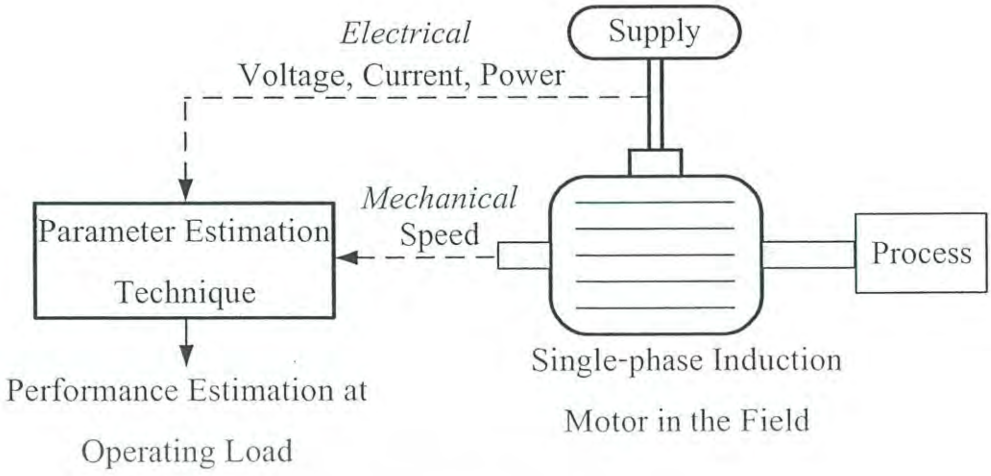
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-13 ขั้นตอนการทำงานของ OPT

ในการทำงานของกระบวนการนี้นั้น ข้อมูลอินพุทที่เราทำการป้อนให้กับตัวจีนีติกอัลกอริธึม ได้แก่ แรงดัน, กระแส, กำลังไฟฟ้าอินพุท ซึ่ง 3 ค่านั้นนั้นเป็นตัวแทนทางไฟฟ้า ในขณะเดียวกัน เราก็ต้องการตัวแทนทางกลด้วย ซึ่งจะใช้ความเร็วรอบเป็นตัวแทนทางกล ซึ่งค่าเหล่านี้นั้นจะเป็น ค่าที่ได้จากการวัดค่าเมื่อมอเตอร์ทำงานจริงอยู่ในระบบ เราต้องการขัดจังหวะการทำงานของ มอเตอร์ซักระยะหนึ่งเพื่อที่จะทำการติดตั้งเครื่องมือวัดเข้าไป แล้วจึงนำค่าที่ทำการวัดได้เข้าสู่ กระบวนการ ดังรูปที่ 3-14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-14 การใช้งานเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพที่โหลดหนึ่งหนึ่ง ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสขณะใช้งานจริง

และจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ในการทำงานของจีนีติกอัลกอริธึมนั้น เราจำเป็นที่จะต้องมีฟังชั้นเป้าหมาย ซึ่งฟังชั่นเป้าหมายของเราในที่นี้แสดงไว้ดังสมการที่ 3.12

$$F_{objective} = \left|\frac{I_{input,cal}}{I_{input,mea}} - 1\right|^2 + \left|\frac{P_{input,cal}}{P_{input,mea}} - 1\right|^2 \tag{3.12}$$

เมื่อ $I_{input,cal}$ = ค่ากระแสไหลเข้ามอเตอร์ที่ได้การคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากจีนีติกอัลกอริธึม

$I_{input,mea}$ = ค่ากระแสไหลเข้ามอเตอร์ได้จากการวัดจริงหน้างาน

$P_{input,cal}$ = ค่ากำลังไฟฟ้าไหลเข้ามอเตอร์ที่การคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากจีนีติกอัลกอริธึม

$P_{input,mea}$ = ค่ากำลังไฟฟ้าไหลเข้ามอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงหน้างาน

ค่า $I_{input,cal}$ และ $P_{input,cal}$ นั้นสามารถศึกษาได้ในหัวข้อ 2.4.2

ถ้าเราทำการพิจารณาสมการที่ 3.12 จะพบว่า เป็นไปในลักษณะสมการเปรียบเทียบกัน โดยจะนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริง พิจารณาเทอมหน้าซึ่งเป็นเทอมของกระแส ถ้าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากจีนีติกนั้นทำให้เกิดค่ากระแสไหลเข้ามอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด สมการในส่วนของเทอมกระแสก็จะมีค่าเข้าใกล้ 0 ค่าพารามิเตอร์ชุดนั้นก็จะถูกนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าไหลเข้ามอเตอร์ ถ้าค่าพารามิเตอร์ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นไม่สามารถทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าจากการคำนวณที่ใกล้เคียงกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจริง ก็จะพบว่าสมการในส่วนเทอมของกำลังไฟฟ้านั้นไม่เข้าใกล้ศูนย์ พารามิเตอร์ชุดนั้นก็ไม่สามารถใช้งานได้ จีนีติกอัลกอริธึมจะทำการค้นหาพารามิเตอร์ชุดใหม่จนกระทั่งได้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ได้จากการวัด กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัด นั้นคือ สมการ 3.12 ทั้งส่วนของกระแสและกำลังไฟฟ้านั้นเข้าใกล้ 0 มากๆ นั้นคือค่าพารามิเตอร์ชุดที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดแล้ว

หลังจากที่ได้ค่าพารามิเตร์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุดแล้ว ก็จะนำพารามิเตอร์เหล่านั้นมาคำนวณหาค่ากำลังทางกลขาออกโดยใช้วงจรสมมูลรูปแบบต่างๆ สำหรับการคำนวณหากำลังทางกลขาออกโดยอาศัยหลักการของวงจรสมมูลและวงจรสมมูลรูปแบบต่างๆที่จะนำใช้งานควบคู่กันกับวิธีการนี้นั้นได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.4.2 แล้ว ต่างกันเพียงเราจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการการหาค่าที่เหมาะสมแบบจีนีติกอัลกอริธึมแทนการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์แบบต่างๆ

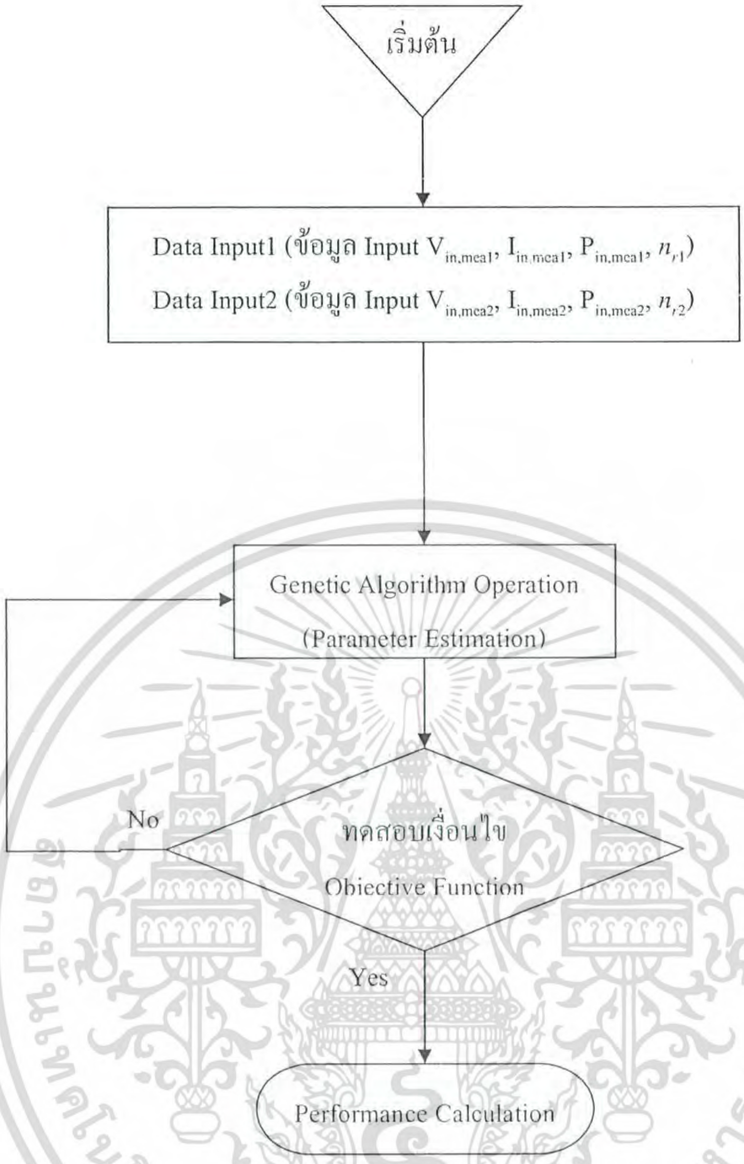
หลักจากทราบกำลังทางกลขาออกแล้วจึงทำการหาค่าประสิทธิภาพตามสมการที่ 2.23

3.4 เทคนิคการประมาณค่าสมรรถนะตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสขณะใช้งานจริงโดยหลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจีนีติกอัลกอริธึม

ในหัวข้อที่ 3.3 นั้นเป็นเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่ภาระหนึ่งๆ แต่ในกรณีที่มอเตอร์ตัวนั้นๆทำงานที่ภาระมากกว่า 1 ค่า นั้นคือ เราจะมีข้อมูลอินพุทเข้าสู่กระบวนการของเรามากกว่า 1 ชุด เราสามารถนำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าสมรรถนะตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสได้ ตั้งแต่นี้ไปจะขอเรียกว่าวิธี TPT (Two Point Test) โดยมีกระบวนการทำงานดังรูปที่ 3-15 [17-18]

จากรูปที่ 3-15 จะพบว่าขั้นตอนการทำงานนั้นคล้ายกันกับวิธีการ OPT มาก แต่ส่วนที่ต่างกันคือส่วนของฟังชั่นเป้าหมาย จะมีการทดสอบที่มากกว่าอยู่ 1 ชุด และค่าพารามิเตอร์ที่ออกจากกระบวนการนี้นั้นจะเป็นค่าเฉลี่ยตลอดย่านการทำงาน ไม่ใช่ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับจุดใดจุดหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-15 กระบวนการทำงานของ TPT

โดยในกระบวนการทำงานของ TPT นั้น ค่าฟังชั่นเป้าหมายจะแตกต่างไปจาก OPT โดยค่าฟังชั่นเป้าหมายของ TPT ดังสมการที่ 3.13

$$F_{objective} = \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{I_{input(i),cal}}{I_{input(i),mea}} - 1 \right|^2 + \left| \frac{P_{input(i),cal}}{P_{input(i),mea}} - 1 \right|^2 \qquad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.13 จะพบว่าก็เป็นไปในลักษณะสมการเปรียบเทียบอีกเช่นกัน โดย n ในสมการที่ 3.13 นั้น คือภาระที่มอเตอร์ทำการขับว่ามีกี่ภาระ ถ้ามอเตอร์ทำการขับโหลดที่ภาระ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาระ n จะมีค่าเป็น 2 การเปรียบเทียบค่าของสมการที่ 3.13 นั้น จะเป็นการเปรียบเทียบภายในของข้อมูลแต่ละชุด ยกตัวอย่างเช่น สมมุติว่ามอเตอร์ทำการขับภาระด้วยความเร็วรอบ Nr_1 และ Nr_2 นั้นคือเราจะมีข้อมูลอินพุทของกระแสและกำลังไฟฟ้าไหลเข้ามอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงเป็นชุดข้อมูล D_1 และ D_2 ข้อมูลวัดจริงชุด D_1 นั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากคำนวณของพารามิเตอร์ที่ความเร็วรอบ Nr_1 ข้อมูลวัดจริงชุด D_2 นั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากคำนวณของพารามิเตอร์ที่ความเร็วรอบ Nr_2 เช่นกัน โดยที่ค่าพารามิเตอร์นั้นเป็นค่าพารามิเตอร์ชุดเดียวกันที่ได้มากจากกระบวนการจีนีติกอัลกอริธึม นั่นคือค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากจีนีติกอัลกอริธึมในวิธีการ TPT นี้ ต้องทำให้เกิดค่าที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าที่จากการวัดจริงทั้ง 2 ชุดถึงจะถือว่าเป็นค่าพารามิเตอร์ที่นำไปใช้งานได้

วงจรสมมูลที่ใช้ในการประมาณค่าประสิทธิภาพแบบ TPT นี้ก็เป็นวงจรสมมูลเช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 2.4.2 แต่ต่างกันตรงที่ค่าพารามิเตอร์นั้นมาจากกระบวนการการหาค่าที่เหมาะสม ไม่ได้มาจากการทดสอบมอเตอร์แบบต่างๆ

หลังจากที่ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนการทำงานตลอดย่านของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสแล้ว ก็จะทำนายสมรรถนะตลอดย่านการทำงานโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบที่ใช้ในการคำนวณตั้งแต่ค่าที่ความเร็วรอบสูง (ภาระต่ำ) จนถึงความเร็วรอบที่พิกัด (ภาระสูง) เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดสอบมอเตอร์และผลที่ได้จากงานวิจัย

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะแสดงผลการทดสอบการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยวิธีการ Load Test การหาประสิทธิภาพโดยใช้วงจรสมมูล การหาประสิทธิภาพโดยการใช้เทคนิค OPT และการหาประสิทธิภาพโดยการใช้เทคนิค TPT ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส แบบแยกเฟส (200 W และ 400 W) และมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (400 W และ 750 W) ผลที่ได้นั้นจะนำมาเปรียบเทียบกันโดยยึดถือค่าที่ได้จากวิธีการLoad Test เป็นหลัก (ค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด) สัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในบทนี้จะเหมือนกันหมดทุกตาราง โดยมีความหมายและหน่วยดังนี้

V_{in}	หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์	หน่วยเป็น V
I_{in}	หมายถึง กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์	หน่วยเป็น A
$p.f.$	หมายถึง ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	
P_{in}	หมายถึง กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์	หน่วยเป็น W
P_o	หมายถึง กำลังทางกลที่ได้จากมอเตอร์	หน่วยเป็น W
T_o	หมายถึง แรงบิดทางกลของมอเตอร์	หน่วยเป็น N-m
n_r	หมายถึง ความเร็วรอบของมอเตอร์	หน่วยเป็น r/min
Load	หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของภาระกำลังทางกลพิกัดที่มอเตอร์	หน่วยเป็น %
Eff	หมายถึง ประสิทธิภาพของมอเตอร์	หน่วยเป็น %

4.2 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส โดยมอเตอร์ที่นำมาทดสอบนั้นมี 2 ขนาด ได้แก่ 200W และ 400W โดยมีการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพ 4 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ Load Test การหาค่าประสิทธิภาพโดยการใช้วงจรสมมูล การหาค่าประสิทธิภาพโดยการใช้เทคนิค OPT และการหาค่าประสิทธิภาพโดยการใช้เทคนิค TPT

4.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสตัวที่ 1

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสที่นำมาใช้ทดสอบนี้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสของ MITSUBISHI ขนาด 200 W โดยมีข้อมูลป้ายพิกัด (Nameplate) ดังตารางที่ 4-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลป้ายพิกัดของมอเตอร์ตัวที่ 1 ที่นำมาทดสอบ

1/4 h.p. (0.2 kW)	Type : SP-KR
220 V	Frame: A71
2.8 A	Rating : CON
4 pole	INS Class : E
50 Hz	AMB temp: 40
1450 r/min	MITSUBISHI Electric

4.2.1.1 การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W โดยวิธีการ Load Test

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบ Load Test ค่าที่ได้จากการทดสอบนี้จะถือเป็นค่าหลักที่ในงานวิจัยนี้จะให้ความเชื่อถือสูงที่สุด ซึ่งจะเป็นค่าที่ถูกนำไปใช้เปรียบเทียบเพื่อพิจารณาถึงค่าความแม่นยำของวิธีการหาค่าประสิทธิภาพแบบอื่น ๆ ผลการทดสอบนั้นแสดงไว้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W โดยวิธี Load Test

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
118.9	220.1	2.881	0.6295	399.2	1420	1.6	237.9	59.60
111.8	219.9	2.827	0.6109	379.8	1423	1.5	223.5	58.85
104.5	219.9	2.79	0.5968	366.2	1425	1.4	208.9	57.05
97.5	219.9	2.735	0.5741	345.3	1432	1.3	194.9	56.46
90.3	220.1	2.691	0.5527	327.3	1437	1.2	180.6	55.17
83.3	220.0	2.648	0.5245	305.6	1446	1.1	166.6	54.51
75.9	220.1	2.616	0.5019	289	1449	1.0	151.7	52.50
68.6	220.1	2.585	0.4729	269	1455	0.9	137.1	50.98

4.2.1.2 การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W โดยใช้วงจรสมมูล

การทดสอบเพื่อหาค่าวงจรสมมูลนั้นได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.4.2 สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสนั้นประกอบไปด้วยการทดสอบ 3 ขั้นตอนอันได้แก่ การทดสอบหาค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานสเตเตอร์ การทดสอบแบบไร้ภาระทางกล และการทดสอบแบบล็อคโรเตอร์ ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W เพื่อหาวงจรสมมูล

การทดสอบแบบไร้ภาระทางกล				
V_{in}	I_{in}	P_{in}	$p.f.$	n_r
220.07	2.507	125.4	1495	0.2272
การทดสอบแบบล็อคโรเตอร์				
V_{in}	I_{in}	P_{in}	$p.f.$	-
70.70	2.803	144.5	70.70	-

จากผลการทดสอบแบบไร้ภาระทางกลตามตารางที่ 4-3 เราจะได้ค่าอิมพีแดนขณะไร้ภาระทางกล $Z_{nl} = 19.95 + j85.48\ \Omega$ และจากผลการทดสอบแบบล็อคโรเตอร์ตามตารางที่4-3 เราจะได้ค่าอิมพีแดนขณะล็อคโรเตอร์ $Z_{lr} = 18.39 + j17.25\Omega$

ค่าอิมพีแดนขณะไร้ภาระทางกลและอิมพีแดนขณะล็อคโรเตอร์นั้นจะถูกนำมาคิดเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล โดยวงจรสมมูลที่จะนำเสนอนั้นมีอยู่ 3 วงจรตามหัวข้อที่ 2.4.2 โดและค่าแรงดันที่ใช้ในการคำนวณนั้น อยู่ที่ 220 V เท่ากันตลอดจึงจะไม่ขอกล่าวถึงอีกค่าพารามิเตอร์และและผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ค่าพารามิเตอร์และผลการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 200 W เมื่อใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2

Model T						
$R_1\ (\Omega)$	$R_2\ (\Omega)$	$X_1 = X_2\ (\Omega)$	$X_m\ (\Omega)$			
8.207	11.432	8.631	145.08			
n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
1455	71.7	2.642	241.1	0.94	143.4	59.46
1448	82.2	2.684	266.7	1.08	164.4	61.63
1442	90.8	2.725	288.4	1.20	181.6	62.97
1436	99.0	2.770	309.8	1.32	198.1	63.94
1429	108.2	2.828	334.4	1.45	216.4	64.71
1420	119.3	2.907	365.6	1.61	238.6	65.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

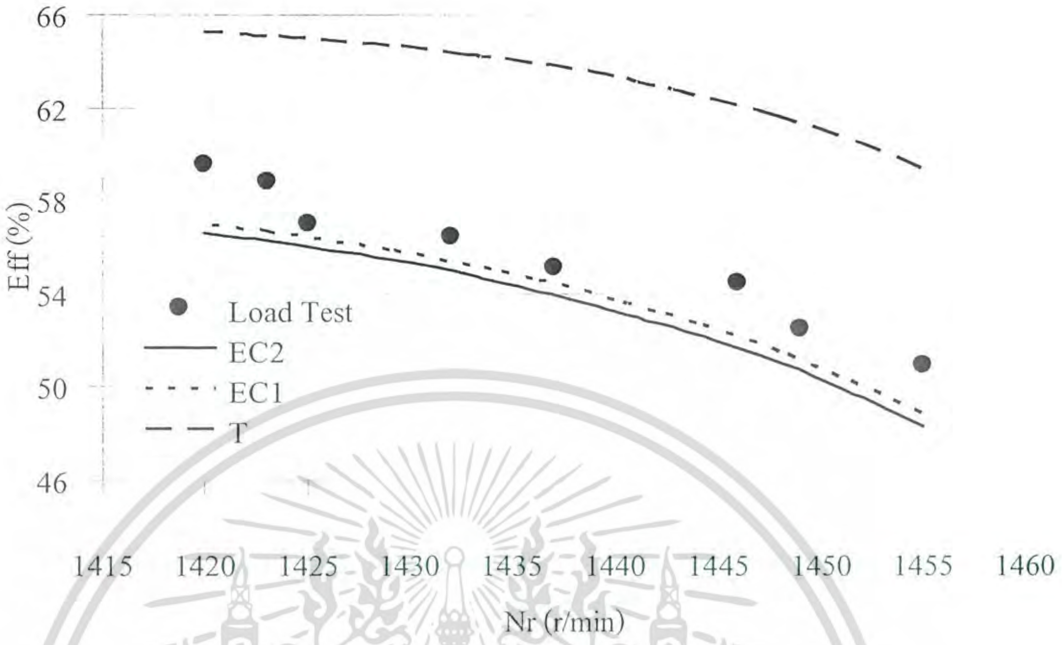
ตารางที่ 4-4(ต่อ)

Model EC1						
$R_1\ (\Omega)$	$R_2\ (\Omega)$	$X_1 = X_2\ (\Omega)$	$R_c\ (\Omega)$	$X_m\ (\Omega)$		
8.207	11.51661	8.895114	830.9858	150.8197		
n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
1455	71.9	2.679	294.2	0.94	143.7	48.86
1448	82.3	2.733	319.6	1.09	164.6	51.50
1442	90.9	2.782	341.2	1.20	181.7	53.26
1436	99.1	2.836	362.5	1.32	198.1	54.65
1429	108.2	2.902	387.1	1.45	216.4	55.89
1420	119.2	2.992	418.1	1.60	238.4	57.02

Model EC2						
$R_1\ (\Omega)$	$R_2\ (\Omega)$	$X_1 = X_2\ (\Omega)$	$R_c\ (\Omega)$	$X_m\ (\Omega)$		
8.207	11.50613	8.619107	677.1062	148.4795		
n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
1455	70.6	2.687	292.0	0.93	141.1	48.33
1448	80.9	2.740	317.2	1.07	161.7	50.99
1442	89.3	2.790	338.4	1.18	178.6	52.77
1436	97.4	2.843	359.5	1.30	194.8	54.18
1429	106.4	2.909	383.6	1.42	212.7	55.45
1420	117.3	2.998	414.2	1.58	234.5	56.62

ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้วงจรสมมูลจะถูกจะมาเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test โดยยึดถือค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test นั้นเป็นหลัก ผลที่ได้นั้นแสดงดังรูปที่ 4-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-1 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบวงจรสมมูลโมเดลแบบต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 200 W

จากผลการทดสอบการหาค่าประสิทธิภาพโดยใช้วงจรสมมูล ซึ่งผลที่ได้นั้นดังรูปที่ 4-1 ถ้าทำการพิจารณาจะพบว่า ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวงจรสมมูลโมเดล EC1 และ โมเดล EC2 นั้นใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test มากกว่าวงจรสมมูลโมเดล T

4.2.1.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200W ด้วยเทคนิค OPT

การประมาณค่าประสิทธิภาพที่โหลดหนึ่งๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสนั้น ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3 ในบทนี้จะเป็นผลการประมาณค่าประสิทธิภาพเทียบกับค่าที่ได้จาก Load Test ผลการทดสอบนั้นแสดงไว้ดังตารางที่ 4-5 โดยในตารางจะมีชุดข้อมูลอินพุท ค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการประมาณค่าด้วยเทคนิค OPT ของวงจรสมมูลทั้ง 3 แบบ และความคลาดเคลื่อนของค่าประสิทธิภาพเมื่อยึดถือค่าที่ได้จาก Load Test เป็นหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-5 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ด้วย OPT โดยใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2

Input Data	n_r	1455	1446	1432	1425	1423
	V_{in}	220.1	220.0	219.9	219.9	219.9
	I_{in}	2.585	2.648	2.735	2.790	2.827
	P_{in}	269.0	305.6	345.3	366.2	379.8
	$p.f.$	0.4729	0.5245	0.5741	0.5968	0.6109
Load Test	*Eff*	50.95	54.47	56.42	57.02	58.82
Model T	*Eff*	58.73	56.52	59.23	60.04	60.08
	Error	7.78	2.05	2.81	3.02	1.26
Model EC1	*Eff*	50.24	55.39	56.79	57.66	57.73
	Error	0.71	0.92	0.37	0.64	1.09
Model EC2	*Eff*	50.29	55.48	57.20	57.98	57.54
	Error	0.66	1.01	0.78	0.96	1.28

จากผลการทดสอบการประมาณค่าประสิทธิภาพด้วยเทคนิค OPT ในตารางที่ 4-5 นั้น พบว่า ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้วงจรสมมูลโมเดล EC1 และ EC2 นั้น จะมีความใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test มากกว่าวงจรสมมูลโมเดล T

4.2.1.4 การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200W ด้วยเทคนิค TPT

ในหัวข้อนี้นั้นจะเป็นการประมาณค่าประสิทธิภาพตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์โดยการใช้เทคนิค TPT ซึ่งจะมีชุดข้อมูลอินพุท 2 ชุดที่เข้าสู่กระบวนการประมาณค่า มีวงจรสมมูลที่ใช้ในการประมาณค่าอยู่ 3 แบบเช่นเดียวกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้ทดลองจับคู่ชุดข้อมูลอินพุทหลาย ๆ ค่าเพื่อดูความแตกต่างของผลลัพธ์ โดยจะมีชุดข้อมูลที่ทำการจับคู่กันดังนี้

ก. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1455 และ 1425

ข. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1455 และ 1423

ค. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1455 และ 1420

ง. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1446 และ 1423

จ. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1446 และ 1420

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1455 และ 1425

ตารางที่ 4-6 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ที่ความเร็ว 1455 และ 1425

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.0	2.585	0.4729	269.0	1455
219.9	2.790	0.5968	366.2	1425

ตารางที่ 4-7 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส

ขนาด 200 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1455 และ 1425

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1455	69.3	2.596	267.8	0.91	138.7	51.78
	1448	79.2	2.628	292.1	1.05	158.4	54.23
	1442	87.2	2.660	312.6	1.16	174.4	55.79
	1436	94.8	2.695	332.9	1.26	189.6	56.96
	1429	103.2	2.741	356.2	1.38	206.4	57.94
	1420	113.2	2.807	385.7	1.52	226.5	58.72

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1455	66.4	2.586	268.8	0.87	132.9	49.42
	1448	75.8	2.625	292.3	1.00	151.6	51.89
	1442	83.4	2.662	312.1	1.11	166.9	53.48
	1436	90.7	2.704	331.6	1.21	181.3	54.69
	1429	98.6	2.755	354.0	1.32	197.2	55.72
	1420	108.1	2.828	382.3	1.45	216.2	56.57

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1455	66.2	2.587	268.8	0.87	132.4	49.26
	1448	75.6	2.625	292.2	1.00	151.3	51.76
	1442	83.3	2.662	312.0	1.10	166.6	53.38
	1436	90.6	2.703	331.6	1.21	181.1	54.62
	1429	98.6	2.754	354.0	1.32	197.1	55.69
	1420	108.2	2.824	382.3	1.46	216.3	56.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1455 และ 1423

ตารางที่ 4-8 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ที่ความเร็วรอบ 1455 และ 1423

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.1	2.585	0.4729	269.0	1455
219.9	2.827	0.6109	379.8	1423

ตารางที่ 4-9 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 200 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1455 และ 1423

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1455	73.3	2.585	268.5	0.96	146.6	54.62
	1448	83.3	2.629	293.9	1.10	166.6	56.67
	1442	91.3	2.671	315.3	1.21	182.6	57.91
	1436	98.9	2.718	336.4	1.32	197.8	58.78
	1429	107.2	2.777	360.6	1.43	214.3	59.44
	1420	117.0	2.858	390.9	1.57	233.9	59.84

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1455	71.1	2.583	269.2	0.93	142.1	52.79
	1448	80.9	2.628	294.0	1.07	161.7	55.00
	1442	88.8	2.671	315.0	1.18	177.6	56.38
	1436	96.3	2.718	335.6	1.28	192.6	57.39
	1429	104.5	2.778	359.2	1.40	209.0	58.19
	1420	114.3	2.860	388.9	1.54	228.6	58.78

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1455	71.4	2.583	269.1	0.94	142.8	53.06
	1448	81.2	2.628	294.0	1.07	162.4	55.23
	1442	89.1	2.671	315.0	1.18	178.2	56.58
	1436	96.6	2.719	335.7	1.29	193.2	57.55
	1429	104.8	2.778	359.4	1.40	209.6	58.32
	1420	114.5	2.860	389.1	1.54	229.0	58.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1455 และ 1420

ตารางที่ 4-10 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ที่ความเร็วรอบ 1455 และ 1420

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.1	2.585	0.4729	269.0	1455
220.1	2.881	0.6295	399.2	1420

ตารางที่ 4-11 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 200 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1455 และ 1420

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1455	70.9	2.590	267.9	0.93	141.8	52.94
	1448	80.8	2.626	292.6	1.07	161.7	55.24
	1442	88.9	2.662	313.6	1.18	177.7	56.68
	1436	96.5	2.701	334.2	1.28	193.0	57.74
	1429	104.9	2.752	357.9	1.40	209.7	58.60
	1420	114.8	2.824	387.8	1.55	229.7	59.24

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1455	67.8	2.587	268.8	0.89	135.6	50.44
	1448	77.4	2.625	292.6	1.02	154.7	52.87
	1442	85.1	2.662	312.8	1.13	170.3	54.43
	1436	92.5	2.703	332.7	1.23	185.0	55.61
	1429	100.6	2.755	355.5	1.35	201.2	56.60
	1420	110.3	2.827	384.4	1.48	220.6	57.40

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1455	68.0	2.585	268.8	0.89	136.0	50.59
	1448	77.5	2.625	292.7	1.02	154.9	52.94
	1442	85.1	2.663	312.8	1.13	170.2	54.43
	1436	92.4	2.705	332.6	1.23	184.8	55.54
	1429	100.3	2.759	355.4	1.34	200.7	56.47
	1420	109.8	2.833	384.0	1.48	219.6	57.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1446 และ 1423

ตารางที่ 4-12 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ที่ความเร็วรอบ 1446 และ 1423

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.0	2.648	0.5245	305.6	1446
219.9	2.827	0.6109	379.8	1423

ตารางที่ 4-13 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 200 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1446 และ 1423

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1455	71.5	2.610	272.2	0.94	143.1	52.57
	1448	81.6	2.645	297.1	1.08	163.2	54.92
	1442	89.7	2.679	318.2	1.19	179.5	56.41
	1436	97.5	2.718	339.0	1.30	195.0	57.51
	1429	106.0	2.767	362.9	1.42	212.0	58.41
	1420	116.2	2.836	393.1	1.56	232.3	59.10

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1455	67.0	2.598	275.3	0.88	134.0	48.65
	1448	76.4	2.638	298.9	1.01	152.8	51.12
	1442	84.0	2.677	318.8	1.11	168.1	52.72
	1436	91.3	2.719	338.4	1.21	182.6	53.94
	1429	99.2	2.772	361.0	1.33	198.5	54.98
	1420	108.7	2.846	389.4	1.46	217.5	55.86

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1455	67.7	2.596	275.0	0.89	135.3	49.20
	1448	77.1	2.637	298.7	1.02	154.1	51.59
	1442	84.7	2.676	318.8	1.12	169.3	53.12
	1436	91.9	2.720	338.5	1.22	183.7	54.28
	1429	99.8	2.774	361.1	1.33	199.5	55.25
	1420	109.2	2.850	389.6	1.47	218.3	56.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1446 และ 1420

ตารางที่ 4-14 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ที่ความเร็วรอบ 1446 และ 1420

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.0	2.648	0.5245	305.6	1446
220.1	2.881	0.6295	399.2	1420

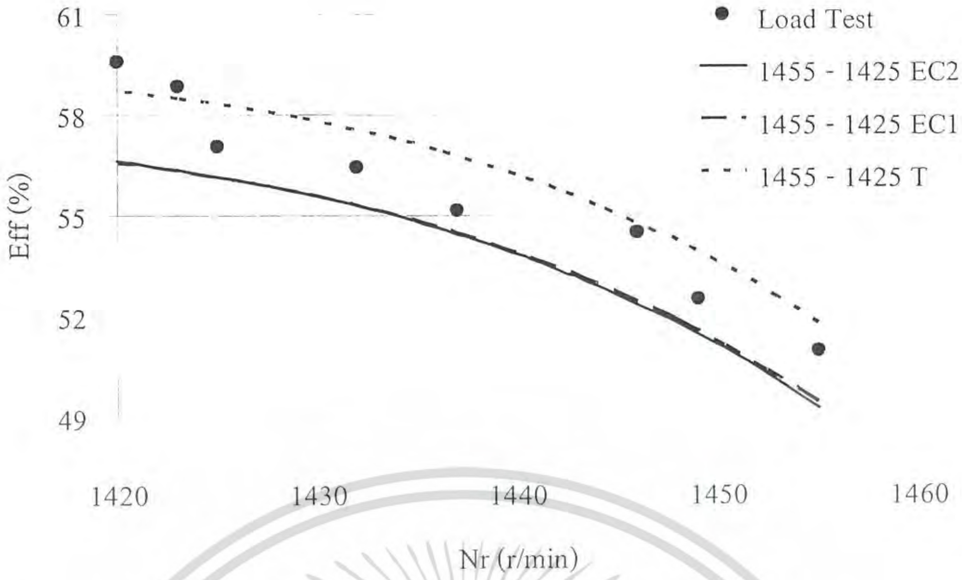
ตารางที่ 4-15 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 200 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1446 และ 1420

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1455	77.1	2.585	271.3	1.01	154.3	56.87
	1448	87.6	2.633	297.9	1.16	175.1	58.79
	1442	96.0	2.680	320.4	1.27	192.0	59.92
	1436	103.9	2.730	342.5	1.38	207.9	60.70
	1429	112.6	2.794	367.8	1.51	225.3	61.25
	1420	122.9	2.881	399.6	1.65	245.9	61.54

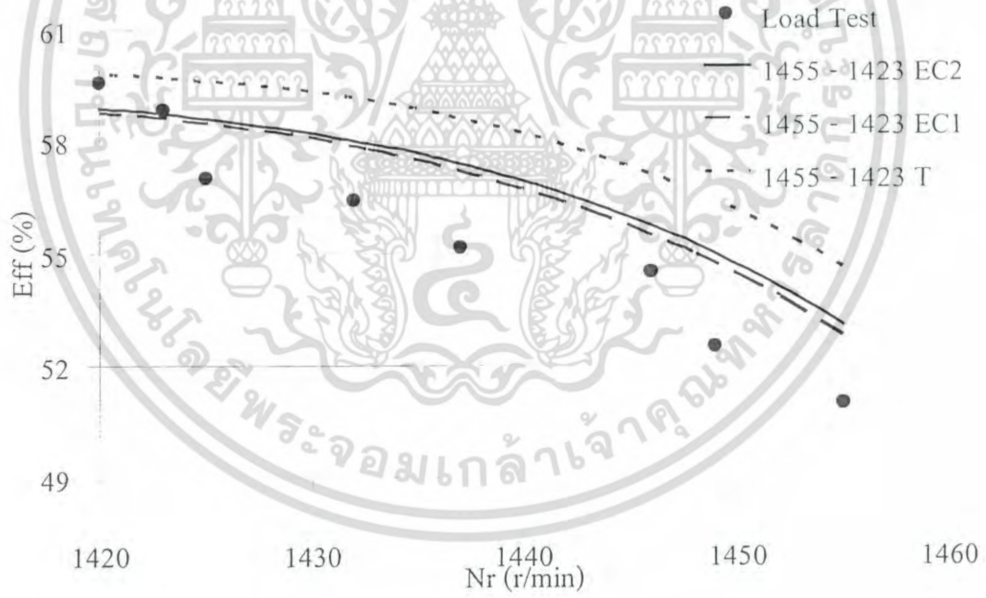
	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1455	74.8	2.579	273.1	0.98	149.6	54.78
	1448	84.9	2.630	298.9	1.12	169.8	56.80
	1442	93.0	2.678	320.7	1.23	186.1	58.02
	1436	100.7	2.731	342.2	1.34	201.5	58.88
	1429	109.1	2.797	366.7	1.46	218.3	59.52
	1420	119.1	2.887	397.4	1.60	238.1	59.92

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1455	74.8	2.583	272.9	0.98	149.5	54.80
	1448	85.0	2.632	298.8	1.12	169.9	56.86
	1442	93.2	2.679	320.7	1.23	186.4	58.11
	1436	101.0	2.730	342.2	1.34	201.9	59.00
	1429	109.5	2.793	366.9	1.46	218.9	59.68
	1420	119.6	2.881	397.8	1.61	239.2	60.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

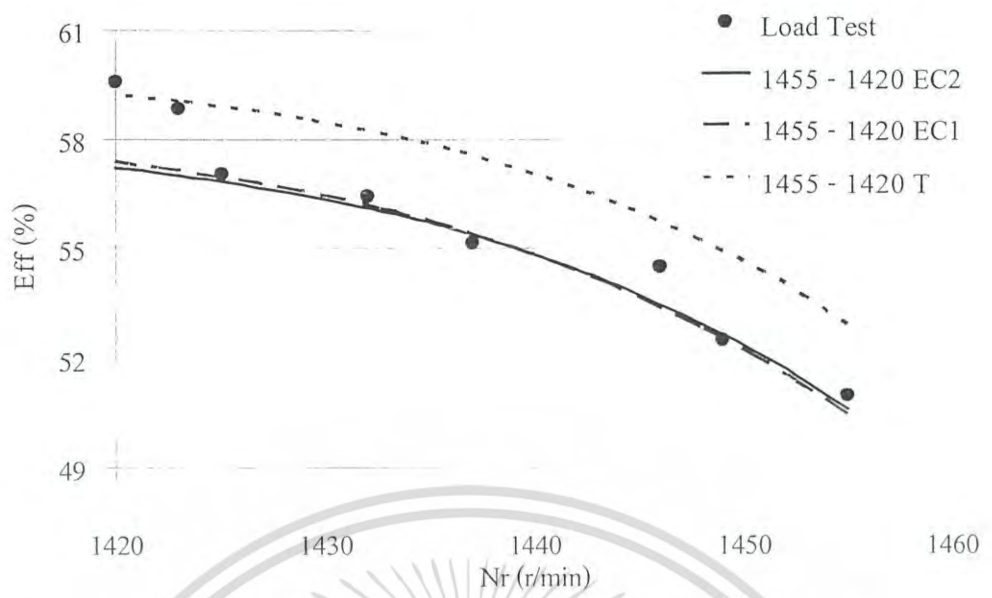


รูปที่ 4-2 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1455 – 1425 r/min

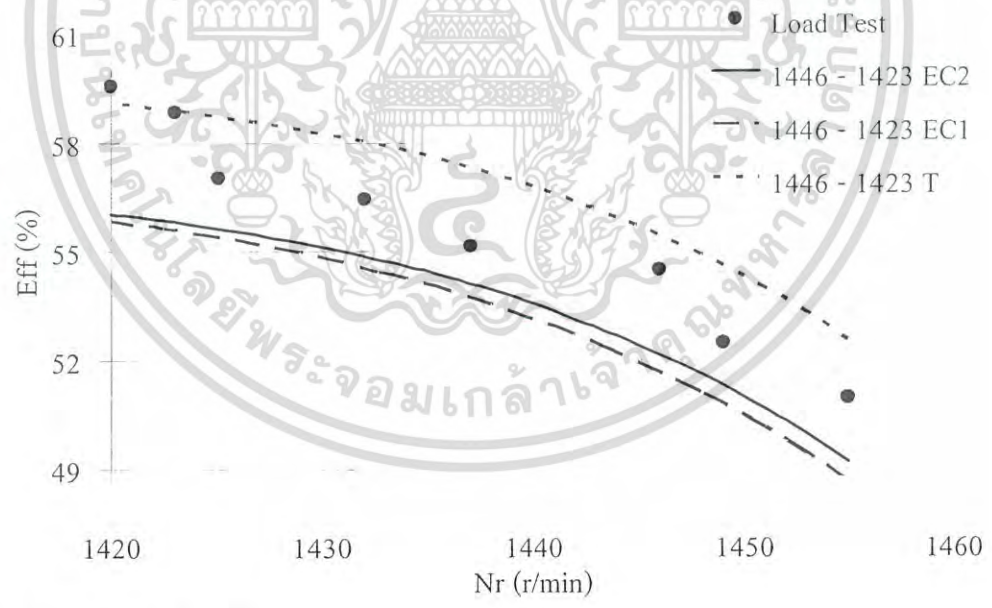


รูปที่ 4-3 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1455 – 1423 r/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

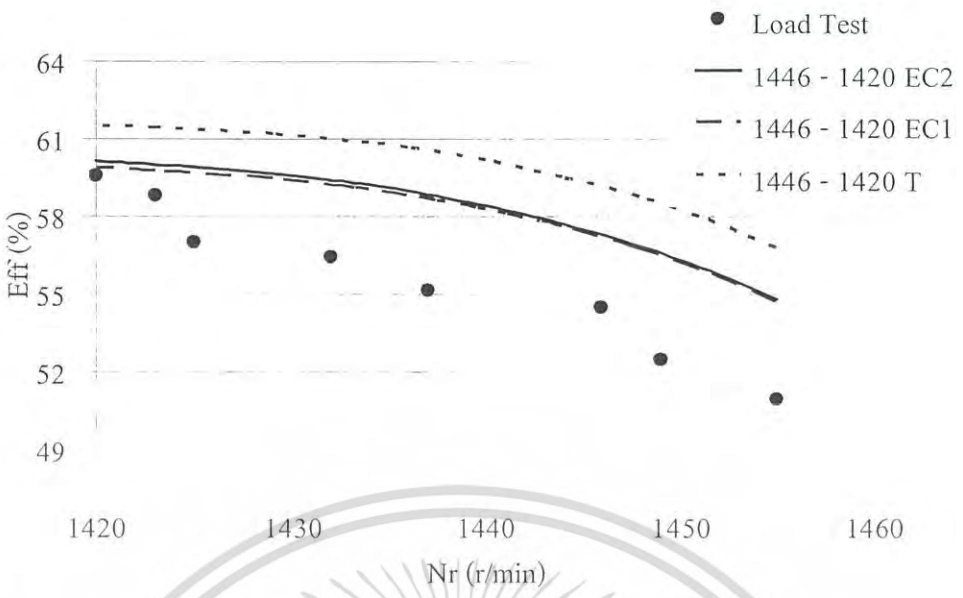


รูปที่ 4-4 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1455 – 1420 r/min



รูปที่ 4-5 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1446 – 1423 r/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-6 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1446 – 1420 r/min

จากผลการทดสอบเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการ TPT นั้นผลที่ได้นั้นเมื่อนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test แล้ว ก็จะได้กราฟดังรูปที่ 4-2 ถึง 4-6 จากรูปที่ 4-2 ถึง 4-6 นั้น จะพบว่าค่าประสิทธิภาพที่เราประมาณได้นั้น โดยเฉลี่ยแล้ว มีความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จาก Load Test

4.2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสตัวที่ 2

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสตัวที่ 2 นี้เป็นมอเตอร์ของ MITSUBISHI ขนาด 400 W โดยมีข้อมูลป้ายพิกัด ดังตารางที่ 4-16

ตารางที่ 4-16 ข้อมูลป้ายพิกัดของมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่นำมาทดสอบ

1/2 h.p. (0.4 kW)	Type : SP-KR
220 V	Frame: 80M
4.8 A	Rating : CON
4 pole	INS Class : E
50 Hz	AMB temp: 40
1440 r/min	MITSUBISHI Electric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.1 การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W โดยวิธีการ Load Test

ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 400 W นั้น แสดงไว้ดังตารางที่ 4-17

ตารางที่ 4-17 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400W โดยวิธี Load Test

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
102.4	219.9	4.524	0.5914	588.4	1448	2.7	409.4	69.58
98.7	220.0	4.486	0.5822	574.6	1450	2.6	394.8	68.71
91.4	220.1	4.375	0.5606	539.8	1455	2.4	365.7	67.74
84.0	220.1	4.270	0.5296	497.7	1458	2.2	335.9	67.49
76.5	220.1	4.206	0.5126	474.5	1461	2.0	306.0	64.49
69.0	220.1	4.109	0.4771	431.4	1465	1.8	276.1	64.01
61.5	220.1	4.038	0.442	394.8	1469	1.6	246.1	62.34
53.9	220.1	3.992	0.4176	366.9	1471	1.4	215.7	58.78
46.4	220.1	3.920	0.3777	325.9	1478	1.2	185.7	56.99
38.7	220.0	3.885	0.3481	297.4	1479	1.0	154.9	52.08
31.1	220.1	3.850	0.3247	275.1	1483	0.8	124.2	45.16

4.2.2.2 การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W โดยใช้วงจรสมมูล

ผลการทดสอบแบบไร้ภาระทางกลและการทดสอบล็อคโรเตอร์เพื่อหาวงจรสมมูลแสดงไว้ในตารางที่ 4-18

ตารางที่ 4-18 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W เพื่อหาวงจรสมมูล

การทดสอบแบบไร้ภาระทางกล				
V_{in}	I_{in}	P_{in}	$p.f.$	n_r
220.1	3.812	127.8	0.1523	1499
การทดสอบล็อคโรเตอร์				
V_{in}	I_{in}	P_{in}	$p.f.$	-
65.9	4.808	188.6	0.5970	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบแบบไร้ภาระทางกลตามตารางที่ 4-18 เราจะได้ค่าอิมพีแดนขณะไร้ภาระทางกล $Z_{nl} = 8.8 + j57.03\Omega$ จากผลการทดสอบล็อคโรเตอร์ตามตารางที่ 4-18 เราจะได้ค่าอิมพีแดนขณะล็อคโรเตอร์ $Z_{lr} = 8.188 + j11\Omega$ โดยค่าพารามิเตอร์และและผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4-19

ตารางที่ 4-19 ค่าพารามิเตอร์และผลการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 400 W เมื่อใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2

Model T						
$R_1\,(\Omega)$	$R_2\,(\Omega)$	$X_1 = X_2\,(\Omega)$	$X_m\,(\Omega)$			
3.72	4.953	5.513	97.54			
n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
1479	42.9	3.927	265.7	1.11	171.5	64.54
1473	55.1	4.000	319.9	1.43	220.6	68.95
1469	63.0	4.059	355.7	1.64	252.2	70.90
1461	78.2	4.200	426.3	2.04	312.7	73.35
1455	88.9	4.324	478.3	2.34	355.7	74.36
1450	97.5	4.437	521.0	2.57	390.0	74.84

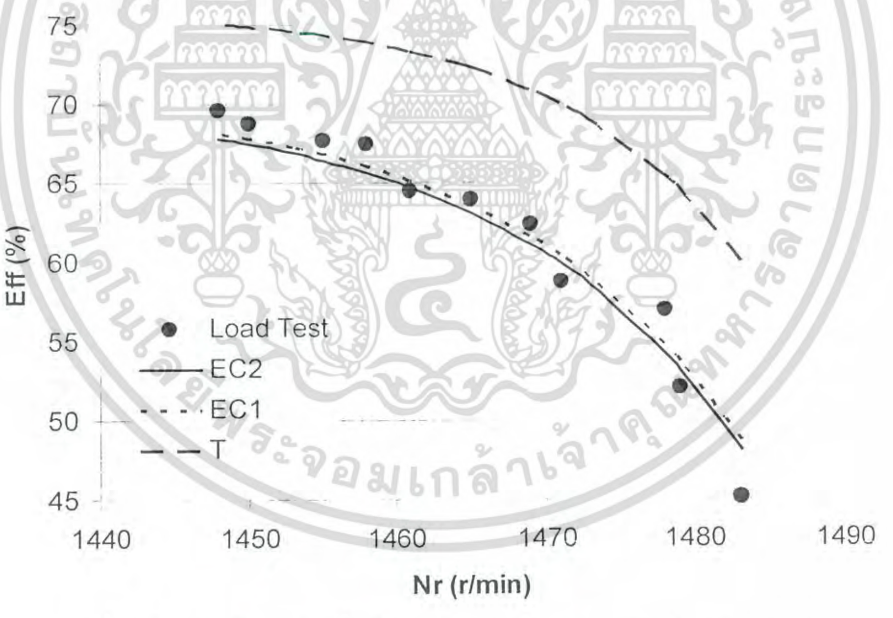
Model EC1						
$R_1\,(\Omega)$	$R_2\,(\Omega)$	$X_1 = X_2\,(\Omega)$	$R_c\,(\Omega)$	$X_m\,(\Omega)$		
3.72	4.930217	5.656853	847.0087	98.93854		
n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
1479	43.1	3.959	320.9	1.11	172.3	53.69
1473	55.4	4.049	375.2	1.44	221.5	59.02
1469	63.3	4.118	411.1	1.65	253.1	61.57
1461	78.4	4.279	481.7	2.05	313.6	65.09
1455	89.1	4.416	533.8	2.34	356.5	66.79
1450	97.7	4.539	576.5	2.57	390.8	67.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-19(ต่อ)

Model EC2						
$R_1\ (\Omega)$	$R_2\ (\Omega)$	$X_1 = X_2\ (\Omega)$	$R_c\ (\Omega)$	$X_m\ (\Omega)$		
3.72	4.98532	5.5779	695.1746	98.26595		
n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	*Eff*
1479	42.2	3.964	317.6	1.09	168.7	53.13
1473	54.3	4.053	371.0	1.41	217.0	58.51
1469	62.0	4.122	406.2	1.61	248.1	61.09
1461	76.9	4.280	475.6	2.01	307.6	64.68
1455	87.5	4.414	526.7	2.30	349.9	66.43
1450	95.9	4.535	568.7	2.53	383.6	67.46

ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวงจรสมมูลนำ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test ผลที่ได้นั้นดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบวงจรสมมูลโมเดลแบบต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 400 W

จากผลการทดสอบการหาค่าประสิทธิภาพ โดยใช้วงจรสมมูล ซึ่งผลที่ได้นั้นดังรูปที่ 4-7 ถ้าทำการพิจารณารูปจะพบว่า ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวงจรสมมูลโมเดล EC1 และ โมเดล EC2 นั้นใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test มากกว่าวงจรสมมูลโมเดล T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400W ด้วยเทคนิค OPT

ในหัวข้อนี้จะเป็นผลการทดสอบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบโดยเทียบกับวิธี Load Test ผลการทดสอบนั้นแสดงไว้ดังตารางที่ 4-20

ตารางที่ 4-20 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ด้วย OPT โดยใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2

Input Data	n_r	1465	1458	1455	1450
	V_{in}	220.1	220.1	220.1	220.0
	I_{in}	4.109	4.27	4.375	4.486
	P_{in}	431.4	497.7	539.8	574.6
	$p.f.$	0.4771	0.5296	0.5606	0.5822
Load Test	Eff	63.98	67.46	67.71	68.67
Model T	Eff	62.64	69.68	68.76	68.81
	Error	1.34	2.23	1.05	0.14
Model EC1	Eff	65.46	66.09	67.11	66.82
	Error	1.48	1.36	0.59	1.84
Model EC2	Eff	63.04	66.27	68.47	68.64
	Error	0.93	1.18	0.77	0.03

จากตารางที่ 4-20 นั้นพบว่า ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้วงจรสมมูลโมเดล EC1 และ EC2 นั้น จะมีความใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test มากกว่าวงจรสมมูลโมเดล T

4.2.2.4 การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400W ด้วยเทคนิค TPT

ก. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1479 และ 1450

ข. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1479 และ 1458 (ภาคผนวก ข.1)

ค. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1479 และ 1455 (ภาคผนวก ข.1)

ง. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1471 และ 1455 (ภาคผนวก ข.1)

จ. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1471 และ 1450 (ภาคผนวก ข.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1479 และ 1450

ตารางที่ 4-21 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1479 และ 1450

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.0	3.885	0.3481	297.4	1479
220.0	4.486	0.5822	574.6	1450

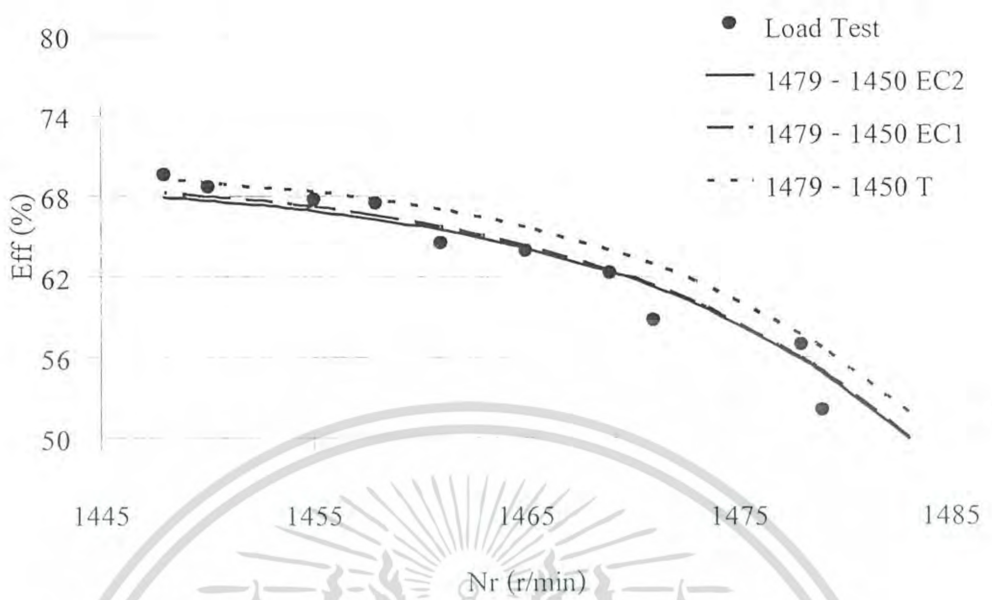
ตารางที่ 4-22 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 400 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1479 และ 1450

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1479	42.2	3.893	297.1	1.09	168.6	56.75
	1473	54.0	3.951	350.1	1.40	216.2	61.75
	1469	61.6	4.000	385.0	1.60	246.6	64.05
	1461	76.1	4.119	453.8	1.99	304.2	67.05
	1455	86.2	4.225	504.4	2.26	344.8	68.37
	1450	94.2	4.323	545.9	2.48	377.0	69.06

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1479	40.9	3.892	297.6	1.06	163.6	54.97
	1473	52.5	3.950	349.3	1.36	210.1	60.14
	1469	60.0	3.999	383.4	1.56	239.8	62.55
	1461	74.1	4.117	450.5	1.94	296.3	65.77
	1455	84.0	4.222	499.9	2.21	336.1	67.24
	1450	91.9	4.318	540.5	2.42	367.7	68.03

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1479	40.8	3.891	297.7	1.05	163.3	54.84
	1473	52.3	3.952	349.2	1.36	209.3	59.95
	1469	59.7	4.004	383.0	1.55	238.8	62.33
	1461	73.6	4.127	449.7	1.93	294.5	65.49
	1455	83.4	4.236	498.8	2.19	333.7	66.91
	1450	91.2	4.336	539.0	2.40	364.8	67.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-8 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1479 – 1450 r/min

จากผลการทดสอบเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการ TPT นั้นผลที่ได้นั้นเมื่อนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test แล้ว ก็จะได้กราฟดังรูปที่ 4-8 จะพบว่าค่าประสิทธิภาพที่เราประมาณได้นั้น โดยเฉลี่ยแล้ว มีความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการ Load Test

4.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

ในหัวข้อนี้นั้นจะเป็นการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ โดยมอเตอร์ที่นำมาทดสอบนั้น มี 2 ขนาด ได้แก่ 400W และ 750W โดยมีการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพ 3 ขั้นตอนหลักๆ อันได้แก่ การทดสอบ Load Test การหาค่าประสิทธิภาพโดยการใช้เทคนิค OPT และการหาค่าประสิทธิภาพโดยการใช้เทคนิค TPT

4.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุตัวที่ 1

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ทดสอบนี้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสของ Venz ขนาด 400 W โดยมีข้อมูลป้ายพิกัด ดังตารางที่ 4-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-23 ข้อมูลป้ายพิกัดของมอเตอร์ตัวที่ 3 ที่นำมาทดสอบ

½ h.p. (0.4KW)	Type : SP-1/2
220 V	Frame: -
4.5 A	Rating : CON
4 pole	INS Class : F
50 Hz	AMB temp: 40
1425 r/min	Venz

4.3.1.1 การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W โดยวิธีการ Load Test

ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุตัวที่ 1 นั้น ผลดังตารางที่ 4-24

ตารางที่ 4-24 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W โดยวิธี Load Test

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
99.4	220.0	3.012	0.809	536.2	1460	2.6	397.5	74.14
95.8	220.0	2.885	0.7982	506.6	1463	2.5	383.0	75.60
88.4	219.9	2.760	0.7845	476.1	1468	2.3	353.6	74.27
80.8	220.1	2.659	0.7683	449.7	1469	2.1	323.1	71.84
73.3	220.1	2.505	0.7472	411.9	1473	1.9	293.1	71.15
65.6	220.1	2.380	0.7233	378.8	1474	1.7	262.4	69.27
58.0	220.0	2.274	0.6994	349.9	1477	1.5	232.0	66.31
50.4	220.1	2.119	0.6778	328.1	1482	1.3	201.8	61.49
42.7	220.1	2.090	0.6395	294.1	1483	1.1	170.8	58.09
35.0	220.1	2.056	0.6172	279.2	1485	0.9	140.0	50.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.2 การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ ขนาด 400 W โดยใช้วงจรสมมูล

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 การหาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุนั้น มีความยุ่งยากกว่ามาก จะต้องมีการทดสอบ ถึง 5 ขั้นตอนเพื่อให้ได้มาซึ่งวงจรสมมูล และยังมีเฉพาะวงจรสมมูลโมเดล T เท่านั้นซึ่งผลการทดสอบนั้น ดังตารางที่ 4-25

ตารางที่ 4-25 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ ขนาด 400 W เพื่อหาวงจรสมมูล

การทดสอบหาอัตราส่วนรอบ				
V_{mo}	220.74	-	-	-
E_a	226.70	-	-	-
V_{ao}	267.65	-	-	-
E_m	119.20	-	-	-
การทดสอบแบบไร้ภาระทางกล แบบไม่มีขดลวดช่วยเริ่มหมุน				
V_{in}	I_{in}	P_{in}	$p.f.$	n_r
220.0	3.264	133.9	0.1864	1499
การทดสอบแบบไร้ภาระทางกล แบบไม่มีขดลวดหลัก				
V_{in}	I_{in}	P_{in}	$p.f.$	n_r
220.0	1.261	57.5	0.2072	1499
การทดสอบล็อคโรเตอร์ ไม่มีขดลวดช่วยเริ่มหมุน				
V_{in}	I_{in}	P_{in}	$p.f.$	-
68.70	4.005	138.6	0.5036	-

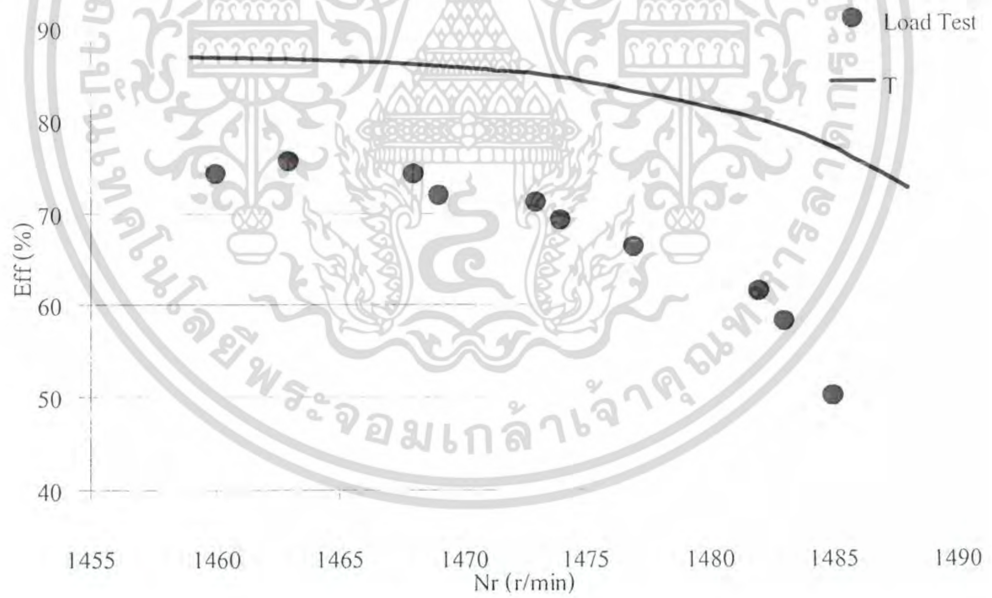
จากผลการทดสอบในตารางที่ 4-25 เราจะได้ค่าอัตราส่วนรอบ $a = 1.52$ ค่าอิมพีแดนซ์ขณะไร้ภาระทางกลแบบไม่มีขดลวดช่วยเริ่มหมุน $Z_{nl,m} = 12.57 + j66.225\Omega$ ค่าอิมพีแดนซ์ขณะไร้ภาระทางกลแบบไม่มีขดลวดหลัก $Z_{nl,a} = 36.14 + j170\Omega$ และค่าอิมพีแดนซ์ขณะล็อคโรเตอร์แบบไม่มีขดลวดช่วยเริ่มหมุน $Z_{lr,m} = 8.532 + j14.636\Omega$ เมื่อนำมาหาค่าประสิทธิภาพโดยใช้วงจรสมมูลโมเดล T จะได้ผลดังตารางที่ 4-26 สำหรับวงจรสมมูลโมเดล EC1 และ EC2 นั้น ยังไม่มีการนำเสนอวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล 2 แบบนี้แต่อย่างใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-26 ค่าพารามิเตอร์และผลการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W เมื่อใช้วงจรสมมูลโมเดล T

Model T						
$R_1\ (\Omega)$	$R_2\ (\Omega)$	$X_1 = X_2\ (\Omega)$	$X_m\ (\Omega)$	$R_a\ (\Omega)$	$X_a\ (\Omega)$	a
4.16	4.481	7.409	109.81	18.86	20.38	1.52
n_r	Load	I_m	P_m	T_o	P_o	Eff
1483	51.8575	1.764	261.700	1.33	207.43	79.26
1475	74.145	2.090	351.920	1.92	296.58	84.27
1471	84.64	2.264	395.860	2.19	338.56	85.52
1467	94.705	2.443	438.950	2.46	378.82	86.30
1463	104.34	2.625	481.170	2.72	417.36	86.74
1459	113.5475	2.808	522.470	2.97	454.19	86.93

ผลที่ได้จากตารางที่ 4- 26 นั้น เมื่อนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test นั้น ผลที่ได้ดังรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบวงจรสมมูลโมเดล T ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W

จากรูปที่ 4-9 พบว่า ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้วงจรสมมูลนั้น ค่อนข้างแตกต่างกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W ด้วยเทคนิค OPT

ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W นั้น ผลดังตารางที่ 4-27

ตารางที่ 4-27 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ด้วย OPT โดยใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2

Input Data	n_r	1473	1469	1468	1463
	V_m	220.07	220.13	219.93	220
	I_m	2.505	2.659	2.76	2.885
	P_m	411.9	449.7	476.1	506.6
	$p.f.$	0.7472	0.7683	0.7845	0.7982
Load Test	Eff	71.12	71.77	74.23	75.57
Model T	Eff	69.43	71.90	71.48	75.80
	Error	1.68	0.14	2.75	0.24
Model EC1	Eff	69.00	70.46	72.27	74.47
	Error	2.11	1.31	1.95	1.09
Model EC2	Eff	70.29	69.88	72.96	74.40
	Error	0.83	1.88	1.26	1.16

จากผลการทดสอบเทคนิค OPT ในตารางที่ 4-27 พบว่า วงจรสมมูลโมเดล EC1 และ EC2 นั้น ประมาณค่าประสิทธิภาพได้ใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test มากกว่าวงจรสมมูลโมเดล T

4.3.1.4 การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 Wโดยใช้เทคนิค TPT

ในหัวข้อนี้นั้นจะเป็นการประมาณค่าประสิทธิภาพตลอดย่านการทำงานโดนการใช้เทคนิค TPT โดยจะมีชุดข้อมูลที่ทำการจับคู่กันดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1483 และ 1468

ตารางที่ 4-28 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1483 และ 1468

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.1	2.09	0.6395	294.1	1483
219.9	2.76	0.7845	476.1	1468

ตารางที่ 4-29 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1483และ1468

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1483	50.4	2.115	307.1	1.30	201.5	65.62
	1477	66.0	2.361	373.1	1.71	264.2	70.81
	1473	75.6	2.528	414.8	1.96	302.6	72.95
	1468	86.8	2.735	464.8	2.26	347.3	74.72
	1460	103.1	3.064	541.2	2.70	412.3	76.19
	1457	108.7	3.186	568.8	2.85	434.9	76.46

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1483	46.9	2.128	312.4	1.21	187.6	60.04
	1477	61.7	2.363	374.5	1.60	246.7	65.88
	1473	70.8	2.521	413.8	1.84	283.0	68.40
	1468	81.3	2.718	460.9	2.12	325.3	70.58
	1460	96.7	3.030	532.5	2.53	386.7	72.62
	1457	102.0	3.145	558.4	2.68	408.0	73.07

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1483	49.8	2.114	309.5	1.28	199.0	64.31
	1477	64.9	2.364	373.5	1.68	259.8	69.56
	1473	74.2	2.533	413.8	1.93	296.8	71.73
	1468	84.9	2.742	462.0	2.21	339.7	73.51
	1460	100.3	3.072	535.1	2.63	401.4	75.01
	1457	105.6	3.194	561.3	2.77	422.6	75.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1483 และ 1460

ตารางที่ 4-30 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1483 และ 1460

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.1	2.090	0.6395	294.1	1483
220.0	3.012	0.809	536.2	1460

ตารางที่ 4-31 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1483และ1460

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1483	49.1	2.089	300.9	1.26	196.3	65.26
	1477	64.3	2.331	365.1	1.66	257.4	70.49
	1473	73.7	2.494	405.7	1.91	294.7	72.65
	1468	84.5	2.698	454.3	2.20	338.2	74.44
	1460	100.3	3.020	528.3	2.63	401.2	75.94
	1457	105.8	3.140	555.0	2.77	423.0	76.22

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1483	46.7	2.100	307.7	1.20	186.6	60.65
	1477	61.1	2.339	368.5	1.58	244.3	66.30
	1473	69.9	2.499	406.8	1.81	279.5	68.71
	1468	80.0	2.698	452.4	2.08	320.1	70.76
	1460	94.6	3.011	521.3	2.48	378.6	72.62
	1457	99.7	3.127	546.0	2.61	398.6	73.01

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1483	47.8	2.099	304.2	1.23	191.1	62.82
	1477	62.7	2.336	366.7	1.62	250.7	68.37
	1473	71.8	2.496	406.2	1.86	287.2	70.71
	1468	82.4	2.695	453.5	2.15	329.7	72.70
	1460	97.8	3.011	525.6	2.56	391.3	74.46
	1457	103.2	3.128	551.6	2.71	412.7	74.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1483 และ 1457

ตารางที่ 4-32 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1483 และ 1457

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.1	2.090	0.6395	294.1	1483
220.0	3.154	0.823	571.2	1457

ตารางที่ 4-33 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1483และ1457

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	*Eff*
Model T	1483	49.8	2.093	303.3	1.28	199.3	65.71
	1477	65.2	2.340	368.2	1.69	260.9	70.85
	1473	74.6	2.505	409.1	1.94	298.6	72.97
	1468	85.6	2.712	458.2	2.23	342.3	74.70
	1460	101.4	3.039	532.9	2.65	405.7	76.13
	1457	106.9	3.161	559.8	2.80	427.6	76.39

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	*Eff*
Model EC1	1483	46.6	2.116	310.9	1.20	186.4	59.96
	1477	61.3	2.350	372.6	1.59	245.1	65.80
	1473	70.3	2.507	411.5	1.82	281.2	68.33
	1468	80.8	2.703	458.2	2.10	323.1	70.52
	1460	96.0	3.013	529.2	2.51	384.0	72.56
	1457	101.3	3.128	554.9	2.66	405.1	73.02

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	*Eff*
Model EC2	1483	47.4	2.117	307.7	1.22	189.5	61.60
	1477	62.5	2.347	370.7	1.62	250.0	67.44
	1473	71.8	2.502	410.7	1.86	287.3	69.95
	1468	82.7	2.695	458.9	2.15	330.9	72.12
	1460	98.7	3.003	532.6	2.58	394.8	74.13
	1457	104.3	3.118	559.4	2.74	417.2	74.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1477 และ 1460

ตารางที่ 4-34 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1477 และ 1460

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.0	2.274	0.6994	349.9	1477
220.0	3.012	0.809	536.2	1460

ตารางที่ 4-35 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1477และ1460

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1483	48.7	2.063	299.5	1.25	194.8	65.04
	1477	63.9	2.304	363.2	1.65	255.5	70.34
	1473	73.2	2.465	403.5	1.90	292.7	72.54
	1468	84.0	2.667	451.7	2.19	336.0	74.37
	1460	99.7	2.986	525.2	2.61	398.8	75.93
	1457	105.1	3.104	551.7	2.76	420.6	76.23

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1483	47.0	2.065	307.5	1.21	188.0	61.13
	1477	61.4	2.308	368.2	1.59	245.6	66.71
	1473	70.2	2.470	406.3	1.82	280.7	69.09
	1468	80.3	2.670	451.7	2.09	321.2	71.11
	1460	94.8	2.985	520.1	2.48	379.2	72.92
	1457	99.8	3.102	544.6	2.62	399.1	73.29

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1483	48.5	2.056	303.5	1.25	193.9	63.90
	1477	63.3	2.302	365.6	1.64	253.2	69.23
	1473	72.3	2.467	404.7	1.88	289.2	71.46
	1468	82.7	2.671	451.4	2.15	330.9	73.30
	1460	97.7	2.992	522.1	2.56	390.9	74.87
	1457	102.9	3.111	547.5	2.70	411.5	75.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1477 และ 1457

ตารางที่ 4-36 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1477 และ 1457

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.0	2.274	0.6994	349.9	1477
220.0	3.154	0.823	571.2	1457

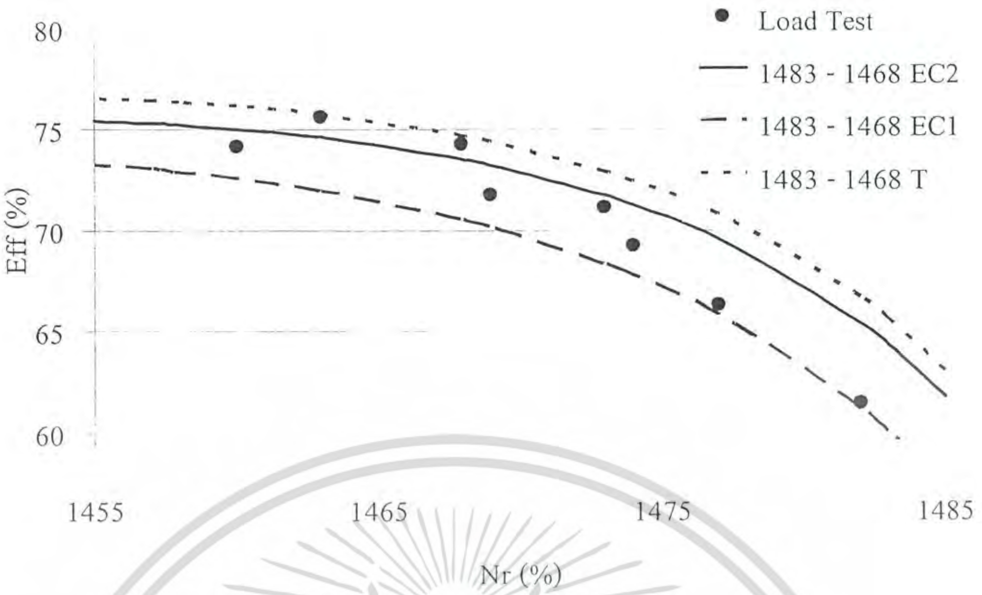
ตารางที่ 4-37 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1477และ1457

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1483	49.8	2.057	302.0	1.28	199.3	65.97
	1477	65.1	2.306	366.4	1.68	260.5	71.08
	1473	74.5	2.473	407.0	1.93	297.8	73.18
	1468	85.3	2.680	455.6	2.22	341.1	74.88
	1460	101.0	3.006	529.3	2.64	403.8	76.29
	1457	106.4	3.128	555.9	2.79	425.5	76.53

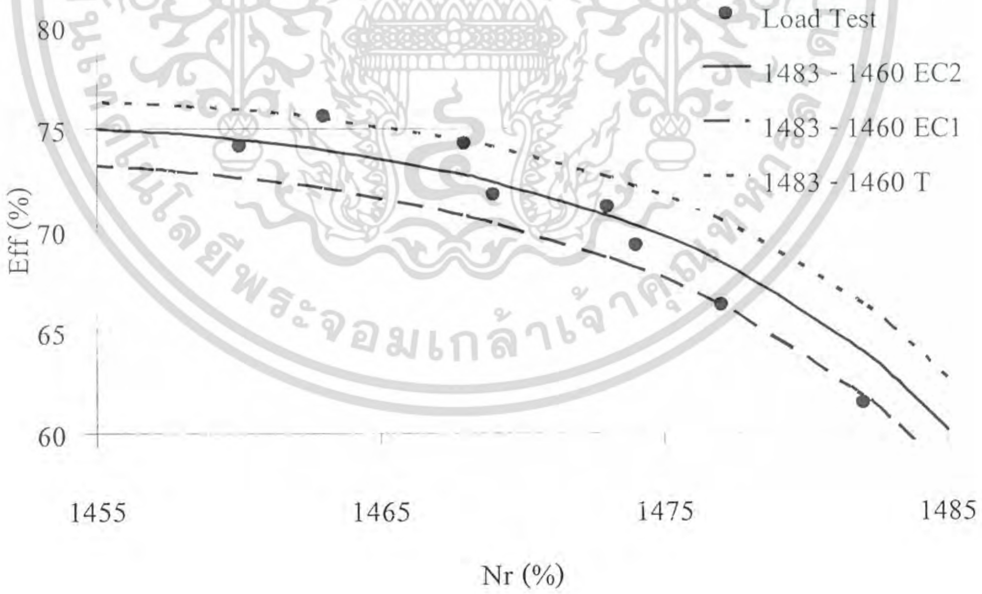
	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1483	47.7	2.071	310.3	1.23	190.7	61.44
	1477	62.3	2.317	371.8	1.61	249.0	66.99
	1473	71.1	2.481	410.3	1.85	284.5	69.34
	1468	81.4	2.683	456.3	2.12	325.5	71.34
	1460	96.1	3.002	525.7	2.52	384.4	73.12
	1457	101.1	3.120	550.5	2.65	404.5	73.48

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1483	47.6	2.090	306.0	1.23	190.2	62.16
	1477	62.6	2.324	368.7	1.62	250.3	67.88
	1473	71.8	2.481	408.4	1.86	287.2	70.33
	1468	82.6	2.677	456.1	2.15	330.3	72.43
	1460	98.3	2.988	529.0	2.57	393.3	74.35
	1457	103.8	3.103	555.4	2.72	415.2	74.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

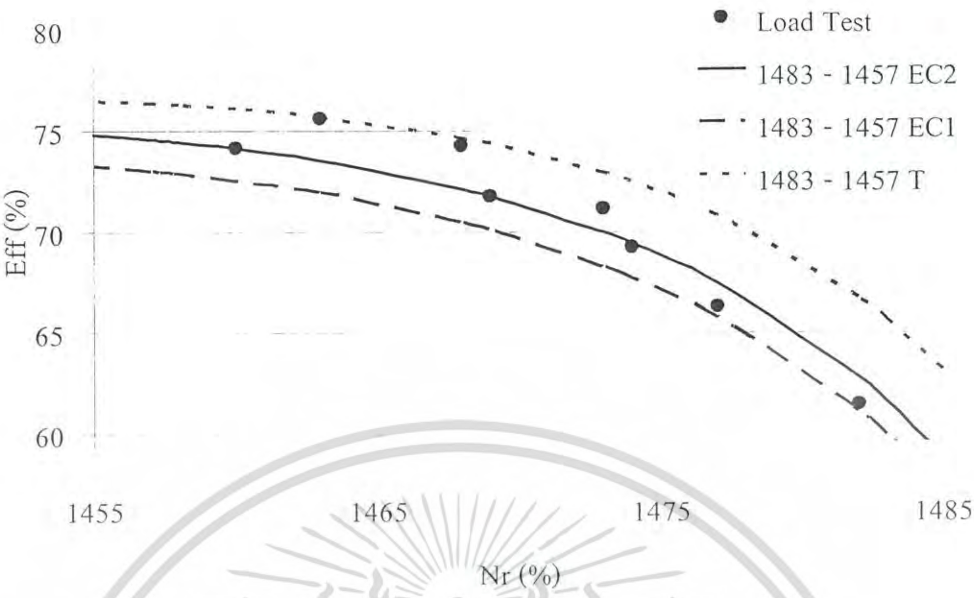


รูปที่ 4-10 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1483 – 1468 r/min

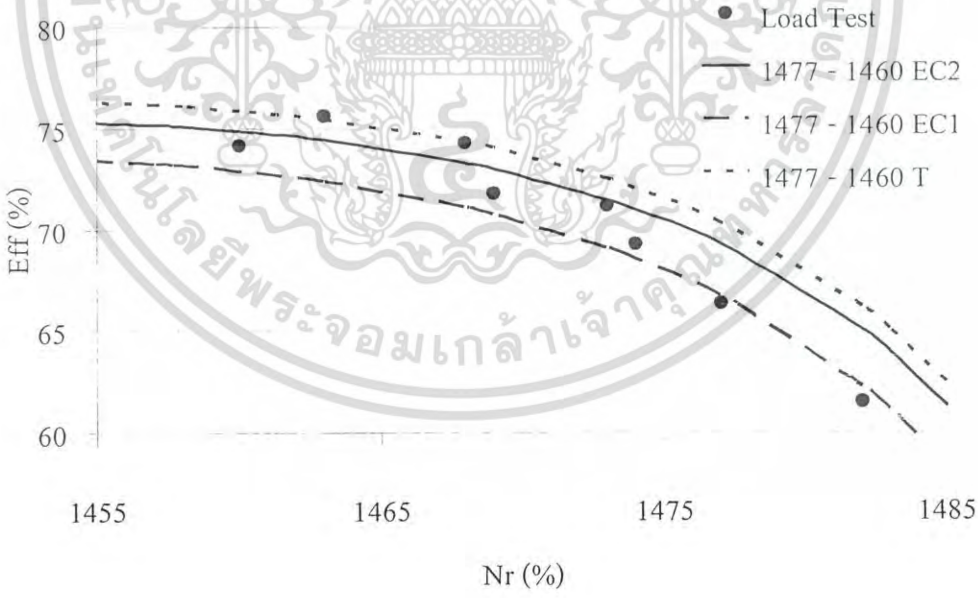


รูปที่ 4-11 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1483 – 1460 r/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

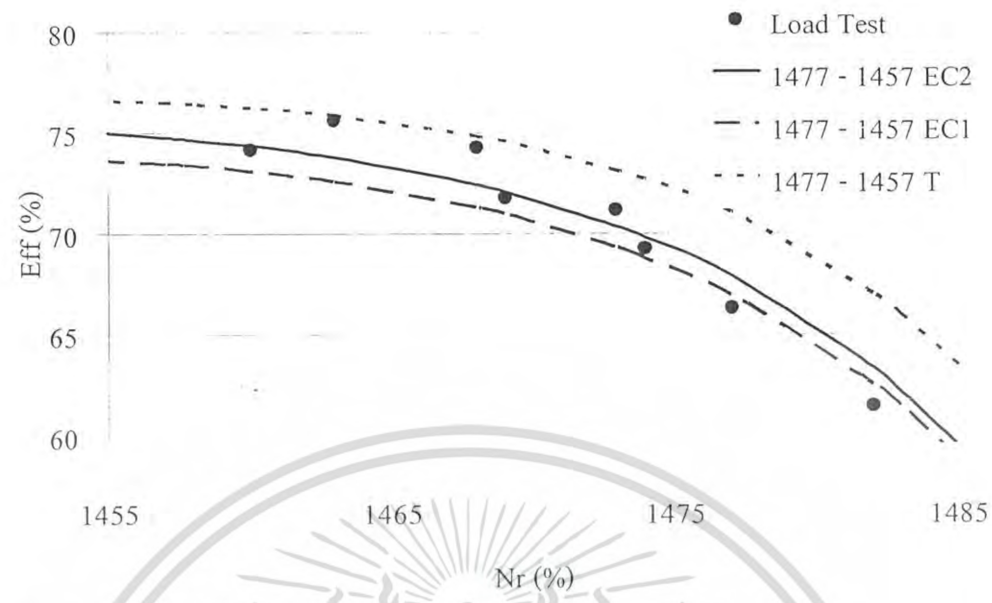


รูปที่ 4-12 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1483 – 1457 r/min



รูปที่ 4-13 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1477 – 1460 r/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-14 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1477 – 1457 r/min

จากผลการทดสอบเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการ TPT นั้นผลที่ได้นั้นเมื่อนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test แล้ว ก็จะได้กราฟดังรูปที่ 4-10 ถึง 4-14 จะพบว่าค่าประสิทธิภาพที่เราประมาณได้นั้น โดยเฉลี่ยแล้ว มีความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ Load Test

4.3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุตัวที่ 2

มอเตอร์ที่นำมาใช้ทดสอบนี้เป็นมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุของ MITSUBISHI ขนาด 750 W ซึ่งจะนำมาทำการทดสอบทั้ง 4 แบบเช่นกัน อันได้แก่ การทดสอบ Load Test การทดสอบหาวงจรสมมูล การหาค่าประสิทธิภาพโดยการใช้เทคนิค OPT และการหาค่าประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิค TPT ทั้งนี้ มอเตอร์ตัวนี้มีข้อมูลป้ายพิกัด ดังตารางที่ 4-38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-38 ข้อมูลป้ายพิกัดของมอเตอร์ตัวที่ 4 ที่นำมาทดสอบ

1 h.p. (0.75KW)	Type : SP-1/2
220 V	Frame: 90
5.2 A	Rating : CON
4 pole	INS Class : B
50 Hz	AMB temp: 40
1430 r/min	MITSUBISHI Electric

4.3.1.3 การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ ขนาด 750 W โดยวิธีการ Load Test

ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ ขนาด 750 W นั้น ผลดังตารางที่ 4-39

ตารางที่ 4-39 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750W ด้วยการวัดแรงบิดทางกลโดยตรง

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
104.7	220.0	5.201	0.8843	1011.9	1442	5.2	785.2	77.60
100.9	220.0	5.067	0.8788	979.8	1445	5.0	756.6	77.22
91.2	220.1	4.696	0.861	889.8	1452	4.5	684.2	76.90
81.3	220.1	4.379	0.8402	809.7	1456	4.0	609.9	75.32
71.5	220.1	4.063	0.8127	726.6	1464	3.5	536.6	73.85
61.5	220.0	3.773	0.7746	643.1	1468	3.0	461.2	71.71
51.5	220.1	3.490	0.7396	568.1	1474	2.5	385.9	67.93
41.2	220.1	3.331	0.686	502.5	1477	2.0	309.3	61.56
31.1	220.1	3.106	0.6184	422.7	1484	1.5	233.1	55.15
20.8	220.0	2.988	0.5369	352.9	1487	1.0	155.7	44.13
104.7	220.0	5.201	0.8843	1011.9	1442	5.2	785.2	77.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.2 การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ ขนาด 750W โดยใช้วงจรสมมูล

ผลการทดสอบเพื่อหาค่าวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุนั้น แสดงผลในตารางที่ตารางที่ 4-40

ตารางที่ 4-40 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ ขนาด 750 W เพื่อหาวงจรสมมูล

การทดสอบหาอัตราส่วนรอบ				
V_{mo}	140.0	-	-	-
E_a	168.0	-	-	-
V_{ao}	198.5	-	-	-
E_m	124.8	-	-	-
การทดสอบแบบไร้ภาระทางกล แบบไม่มีขดลวดช่วยเริ่มหมุน				
V_{in}	I_{in}	P_{in}	$p.f.$	n_r
220.0	5.060	196.5	0.1765	1499
การทดสอบแบบไร้ภาระทางกล แบบไม่มีขดลวดหลัก				
V_{in}	I_{in}	P_{in}	$p.f.$	n_r
220.0	2.154	109.9	0.2315	1499
การทดสอบล็อคโรเตอร์ไม่มีขดลวดช่วยเริ่มหมุน				
V_{in}	I_{in}	P_{in}	$p.f.$	-
72.41	5.245	170.6	0.4491	-

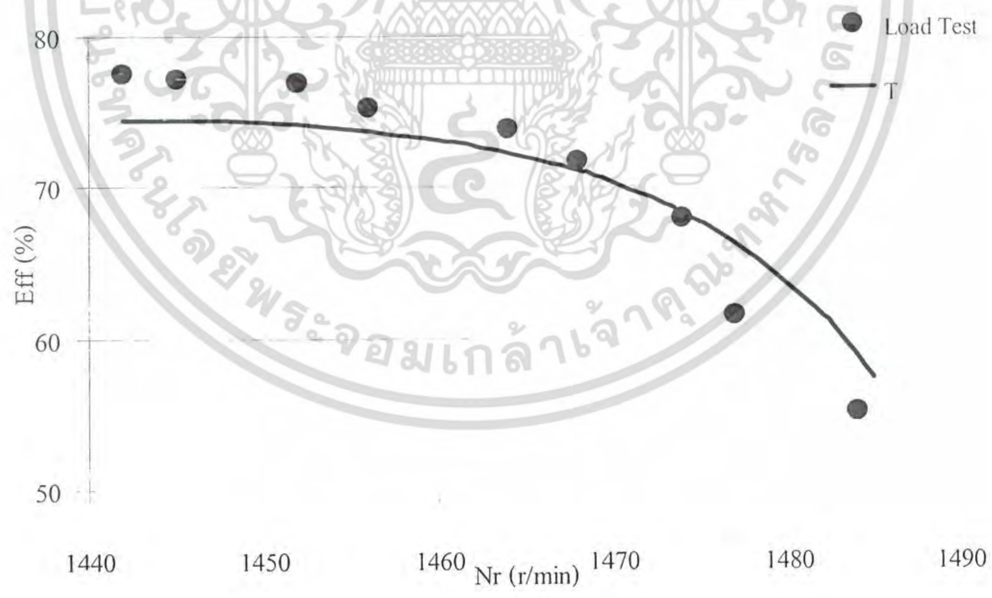
จากผลการทดสอบในตารางที่ 4-40 เราจะได้ค่าอัตราส่วนรอบ $a=1.38$ ค่าอิมพีแดนซ์ขณะไร้ภาระทางกลแบบไม่มีขดลวดช่วยเริ่มหมุน $Z_{nl,m}=7.67+j42.80\,\Omega$ แบบไม่มีขดลวดหลัก $Z_{nl,a}=23.70+j99.58\,\Omega$ และค่าอิมพีแดนซ์ขณะล็อคโรเตอร์แบบไม่มีขดลวดช่วยเริ่มหมุน $Z_{lr,m}=6.2+j12.334\,\Omega$ เมื่อนำมาหาค่า จะได้ผลดังตารางที่ 4-41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-41 ค่าพารามิเตอร์และผลการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W เมื่อใช้วงจรสมมูลโมเดล T

Model T						
$R_1\,(\Omega)$	$R_2\,(\Omega)$	$X_1 = X_2\,(\Omega)$	$X_m\,(\Omega)$	$R_a\,(\Omega)$	$X_a\,(\Omega)$	$a\,(\Omega)$
2.9	3.3	6.332	72.136	11.22	21.59	1.38
n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
1483	30.4	3.472	378.5	1.47	228.0	60.22
1474	44.9	3.849	493.9	2.19	337.1	68.26
1469	52.1	4.069	553.2	2.54	391.1	70.69
1463	60.1	4.336	620.9	2.94	450.4	72.55
1460	63.7	4.470	653.4	3.13	478.1	73.17
1452	72.8	4.827	736.6	3.59	546.1	74.14

ผลที่ได้จากตารางที่ 4- 41 นั้น เมื่อนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test นั้น ผลที่ได้ดังรูปที่ 4-15



รูปที่ 4-15 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบวงจรสมมูลโมเดล T ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-15 พบว่า ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้วงจรสมมูลนั้น ค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test ซึ่งแตกต่างกับวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ที่มีความห่างกันของค่าประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ผลเหล่านี้อาจแสดงให้เราเห็นว่าวิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุนั้น ยังมีความไม่แน่นอนอยู่ อาจจะยังไม่เหมาะสมพอที่จะนำมาใช้ในงานจริง

4.3.2.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W โดยใช้เทคนิค OPT

หัวข้อนี้ก็เป็นการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W โดยการใช้เทคนิค TPT ผลที่นั้น แสดงในตารางที่ 4-42

ตารางที่ 4-42 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ด้วย OPT โดยใช้วงจรสมมูลโมเดล T, EC1 และ EC2

Input Data	n_r	1464	1456	1452	1445
	V_m	220.1	220.1	220.0	220.1
	I_m	4.063	4.379	4.696	5.067
	P_m	726.6	809.7	889.8	979.8
	$p.f.$	0.8127	0.8402	0.861	0.8788
Load Test	*Eff*	73.81	75.28	76.86	77.18
Model T	*Eff*	76.34	77.90	78.10	78.11
	Error	2.53	2.62	1.24	0.93
Model EC1	*Eff*	75.46	74.65	76.73	76.17
	Error	1.65	0.63	0.13	1.01
Model EC2	*Eff*	74.64	76.83	77.30	77.29
	Error	0.83	1.55	0.44	0.11

จากผลการทดสอบเทคนิค OPT ในตารางที่ 4-42 พบว่า วงจรสมมูลโมเดล EC1 และ EC2 นั้น ประมาณค่าประสิทธิภาพได้ใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จาก Load Test มากกว่าวงจรสมมูลโมเดล T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.4 การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W โดยใช้เทคนิค TPT

ก. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1490 และ 1442

ข. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1490 และ 1464 (ภาคผนวก ข.2)

ค. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1490 และ 1452 (ภาคผนวก ข.2)

ง. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1484 และ 1452 (ภาคผนวก ข.2)

จ. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1484 และ 1442 (ภาคผนวก ข.2)

ค่าประสิทธิภาพตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ที่ได้จากการจับข้อมูลอินพุทชุดต่างๆ นั้น ดังนี้

ก. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1490 และ 1442

ตารางที่ 4-43 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ที่ความเร็วรอบ 1490 และ 1442

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
219.9	2.941	0.5183	335.9	1490
220.0	5.201	0.8843	1011.9	1442

ตารางที่ 4-44 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1490และ1442

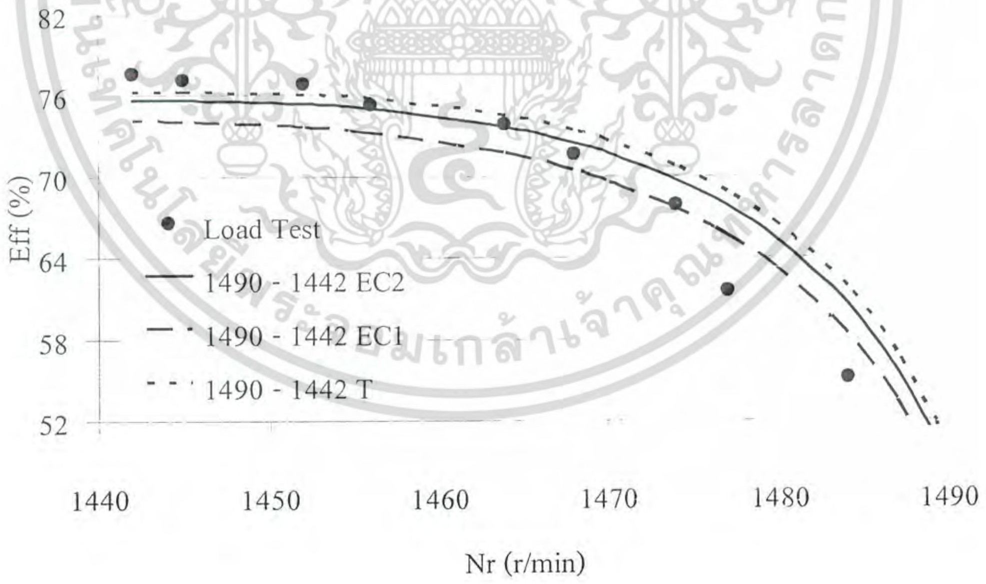
	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1487	29.4	3.068	387.9	1.42	220.9	56.94
	1480	44.4	3.425	501.7	2.15	333.2	66.42
	1474	55.8	3.732	590.8	2.71	418.3	70.81
	1468	66.0	4.032	674.2	3.22	495.0	73.42
	1456	84.0	4.612	830.3	4.13	629.8	75.85
	1445	98.4	5.131	966.3	4.88	737.8	76.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-44(ต่อ)

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1487	27.5	3.058	386.1	1.33	206.4	53.45
	1480	41.8	3.381	497.2	2.02	313.6	63.08
	1474	52.9	3.674	586.2	2.57	396.8	67.69
	1468	63.1	3.969	670.7	3.08	473.0	70.52
	1456	81.2	4.557	830.3	4.00	608.8	73.33
	1445	95.8	5.093	969.5	4.75	718.6	74.12

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1487	28.7	3.066	387.3	1.38	215.4	55.61
	1480	43.4	3.405	499.0	2.10	325.4	65.21
	1474	54.6	3.702	587.6	2.66	409.7	69.73
	1468	64.9	3.997	671.3	3.17	486.4	72.46
	1456	83.0	4.577	829.4	4.08	622.5	75.05
	1445	97.6	5.104	967.7	4.84	732.2	75.66



รูปที่ 4-16 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1490 – 1442 r/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการ TPT นั้นผลที่ได้เมื่อนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบ Load Test แล้ว ก็จะได้กราฟดังรูปที่ 4-16 จะพบว่าค่าประสิทธิภาพที่เราประมาณได้นั้น โดยเฉลี่ยแล้ว มีความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ Load Test

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 บทนำ

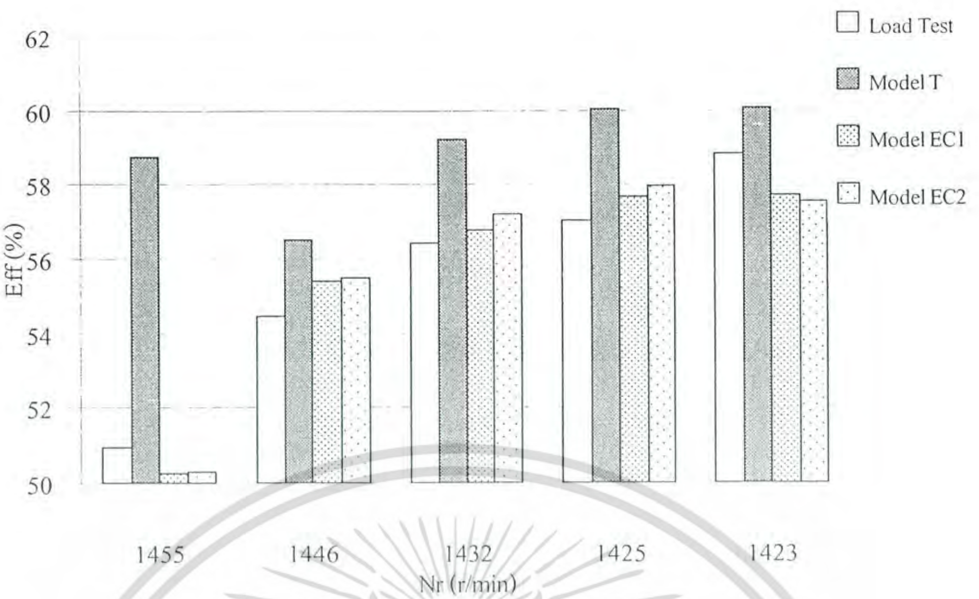
การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟสทั้งแบบแยกเฟส และแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุนั้น โดยทั่วไปแล้วมีวิธีการอยู่ 2 วิธี อันได้แก่ Load Test และการใช้วงจรสมมูล แต่ถ้าในกรณีที่มอเตอร์ตัวที่ต้องการทราบค่าประสิทธิภาพนั้นต่ออยู่ในระบบ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการถอดมอเตอร์ออกจากระบบเพื่อนำหาทดสอบ จะเห็นได้ว่าการที่เราต้องการทราบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ตัวที่ทำงานจริงอยู่นั้นมีความยุ่งยากและไม่สะดวกหลายประการ จึงทำให้เกิดแนวความคิดในการหาวิธีการหาประสิทธิภาพแนวใหม่ที่มีความสะดวก มีความแม่นยำ และรวดเร็ว

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟสโดยอาศัยหลักการของกระบวนการการหาค่าที่เหมาะสมแบบจีนีติกอัลกอริธึม เมื่อเทียบระยะเวลา ค่าใช้จ่าย และการรบกวนระบบการทำงานของมอเตอร์แล้ว วิธีการนี้มีความสะดวกสูงกว่าการที่จะนำมอเตอร์ไปทำการณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการณ์ ซึ่งผู้ทำการวิจัยคาดหวังว่าวิธีการนี้นั้นจะเป็นทางเลือกอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ และจากผลการวิจัยที่ได้ทำให้สรุปผลได้ดังนี้

5.2 สรุปผล OPT

จากผลการทดลองการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสด้วยวิธี OPT ผลว่า ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวิธี OPT ของมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวนั้น ใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการวัดแรงบิดทางกลโดยตรง นั่นคือวิธีการ OPT นั้น มีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปใช้งานจริงได้ แต่ถ้าพิจารณาผลการวิจัยจะพบว่า ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวงจรสมมูลโมเดล EC1 และ EC2 นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบวัดแรงบิดทางกลโดยตรงมากกว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวงจรสมมูลโมเดล T ทั้งนี้ก็เป็นไปตามสมมติฐานของงานวิจัยที่ว่า วงจรสมมูลโมเดล EC1 และ EC2 นั้น น่าจะมีความแม่นยำกว่าวงจรสมมูลโมเดล T ผลที่ได้จากการทดสอบในบทที่ 4 นั้นแสดงในรูปที่ 5-1 ถึง 5-4

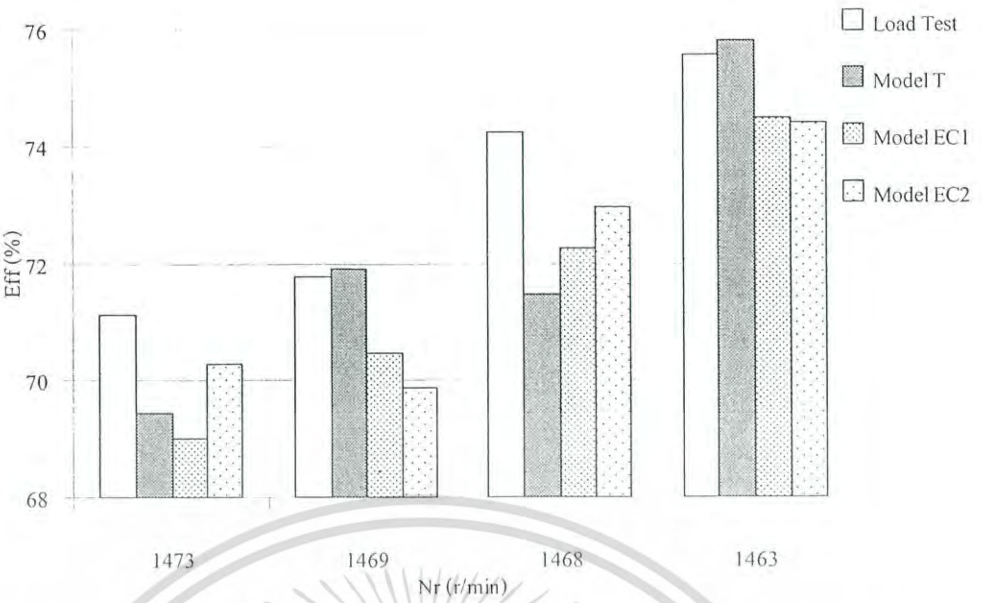
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



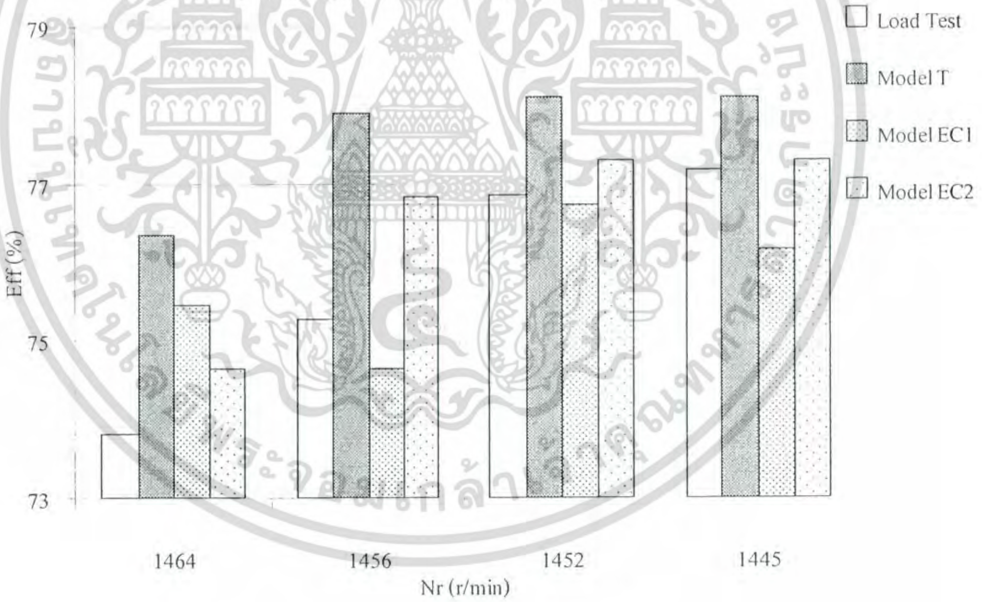
รูปที่ 5-1 ผลการประมาณค่าประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 200 W ด้วยเทคนิค OPT

รูปที่ 5-2 ผลการประมาณค่าประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ด้วยเทคนิค OPT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-3 ผลการประมาณค่าประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ด้วยเทคนิค OPT



รูปที่ 5-4 ผลการประมาณค่าประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ด้วยเทคนิค OPT

จากรูปที่ 5-1 ถึง 5-4 ถ้าทำการพิจารณาจะพบว่า วงจรสมมูลโมเดล EC1 และ EC2 นั้นประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก Load Test มากกว่าวงจรสมมูลโมเดล T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการ OPT นั้นมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริงอันเนื่องมาจากมีการหยุดการทำงานของมอเตอร์ไม่มากนักเพื่อทำการติดตั้งเครื่องมือวัด โดยต้องการข้อมูลอินพุทเพียง 1 ชุดอันได้แก่ แรงดัน, กระแส, กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์ และสามารถที่จะประมาณค่าประสิทธิภาพได้อย่างรวดเร็ว มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องถอดมอเตอร์ออกจากตำแหน่งติดตั้งเดิมเพื่อทำการทดสอบแต่อย่างใด

แต่วิธีการ OPT นั้นสามารถประมาณค่าประสิทธิภาพได้เฉพาะตำแหน่งภาระที่มอเตอร์ทำงานอยู่เท่านั้น ไม่สามารถนำไปประมาณค่าที่ตำแหน่งอื่นๆได้ ทั้งนี้อันเนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลนั้นเป็นค่าชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับค่าภาระหนึ่งๆของมอเตอร์เท่านั้น ไม่ใช่ค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ แต่โดยมากแล้ว วิธีการนี้จึงสามารถที่จะนำไปใช้หาค่าประสิทธิภาพโดยประมาณที่ภาระหนึ่งๆ ของมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว

5.3 สรุปผล TPT

จากผลการทดลองการประมาณค่าประสิทธิภาพตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ด้วยวิธีการ TPT นั้น พบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการประมาณค่าโดยวิธีการ TPT นั้น มีความใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบวัดแรงบิดทางกลโดยตรง นั่นคือวิธีการประมาณค่าประสิทธิภาพการทำงานตลอดย่านแบบ TPT นั้น มีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปใช้งานจริงได้ และถ้าทำการพิจารณาผลการทดลองจะพบว่า ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวงจรสมมูลโมเดล EC1 และ EC2 นั้น มีความใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบการวัดแรงบิดทางกลขาออกโดยตรงมากกว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวงจรสมมูลโมเดล T ก็เป็นไปตามที่ได้ทำการคาดการณ์ไว้ที่ว่า วงจรสมมูลโมเดล EC1 และ EC2 นั้น น่าจะดีกว่าวงจรสมมูลโมเดล T

วิธีการประมาณค่าประสิทธิภาพตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ด้วยเทคนิค TPT นั้น มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน อันเนื่องมาจากถ้าเทียบกับวิธีการวัดแรงบิดทางกลโดยตรงแล้ว เทคนิค TPT นั้น จะมีความสะดวกกว่าตรงที่ ไม่จำเป็นที่จะต้องถอดมอเตอร์ออกจากระบบเพื่อทำการหาค่าประสิทธิภาพ ใช้ระยะเวลาไม่นาน ค่าประสิทธิภาพที่ได้นั้นมีความน่าเชื่อถือ สิ่งที่เทคนิค TPT ต้องการนั้นมีเพียงชุดข้อมูลอินพุทอันได้แก่ แรงดัน, กระแส, กำลังไฟฟ้าอินพุท และความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 2 ตำแหน่งภาระเท่านั้น

แต่วิธีการ TPT นั้นก็มีข้อด้วยตรงที่โอกาสที่จะนำไปใช้งาน อันเนื่องมาจากโดยมากแล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้น นิยมที่จะใช้งานที่ค่าภาระเพียง 1 ค่า จึงทำให้มีโอกาสที่จะใช้งานเทคนิคนี้นั้นค่อนข้างน้อย อีกทั้งจากผลการวิจัยพบว่า ชุดข้อมูล 2 ชุดที่ทำการป้อนเข้าสู่กระบวนการณ์หาค่าประสิทธิภาพแบบ TPT นั้นต้องมีค่าภาระที่ห่างกันอยู่พอสมควรเพื่อที่จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยที่ใช้ในการประมาณค่าประสิทธิภาพตลอดย่าน จากการวิจัยพบว่าควรห่างกันอยู่ประมาณ 30% จากค่าภาระพิกัด

5.4 การนำเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสไปใช้งานจริง

ในหัวข้อนี้นั้น จะเป็นการนำเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ไปใช้งานจริงโดยเลือกใช้วงจรสมมูลโมเดล EC2 ทำการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสตัวที่จะทำการประมาณค่าประสิทธิภาพนี้เป็นมอเตอร์ของบริษัท Toshiba เป็นมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ ขนาด 1 แรงม้ามีข้อมูลป้ายพิกัดดังตารางที่ 5-1 และข้อมูลที่วัดได้ขณะมอเตอร์ทำงานที่ภาระต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-1 ข้อมูลป้ายพิกัดของมอเตอร์ที่นำมาประมาณค่าประสิทธิภาพ

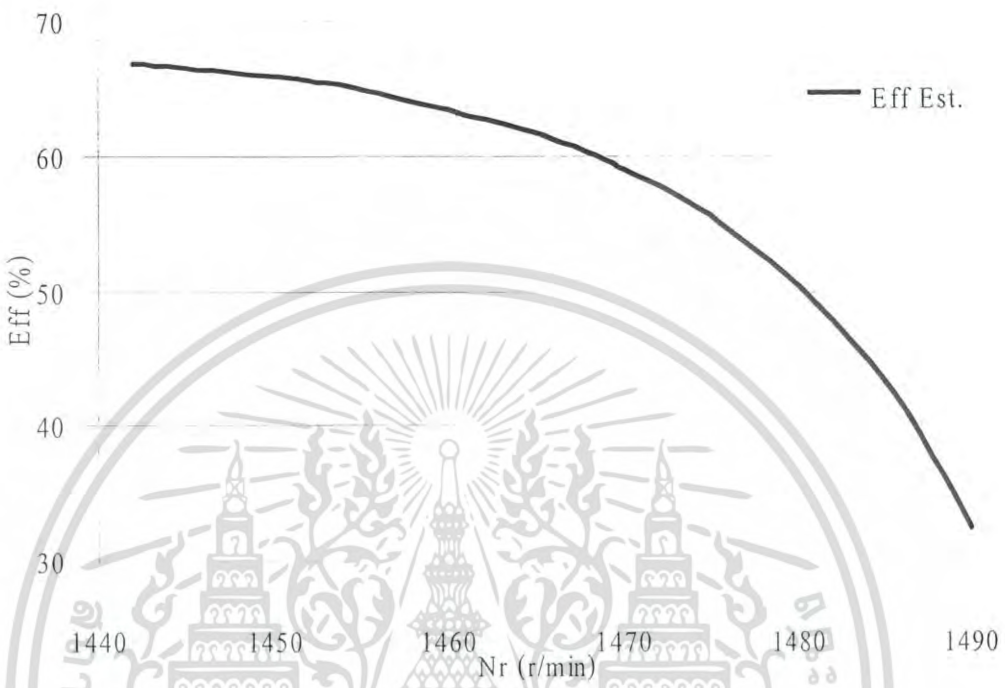
1 Hp. 4 Poles	TYPE – Form
220 V	COME H
50 Hz	SPEC JIS C4004
5.8 A	INS Class E
1440 rpm	Rating CONT
C-Start 315 μF	BRGL. S. 6204
C-Run 40 μF	BRGD. S. 6203

ตารางที่ 5-2 ข้อมูลอินพุทของมอเตอร์ที่นำมาประมาณค่าประสิทธิภาพ

V_{in}	I_{in}	P_{in}	n_r
220	3.76	530	1468
220	4.91	870	1450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลอินพุทดังตารางที่ 5-2 เมื่อทำการประมาณค่าประสิทธิภาพด้วยเทคนิค OPT ที่ความเร็วรอบ 1468 ค่าประสิทธิภาพมีค่า 56.81 % และที่ความเร็วรอบ1450 มีค่าประสิทธิภาพ 65.23 % และผลการประมาณค่าประสิทธิภาพตลอดย่านด้วยเทคนิค TPT นั้น ผลที่ได้ดังรูปที่ 5-5



รูปที่ 5-5 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ ขนาด 1 แรงม้า ที่การใช้งานจริงด้วยวงจรสมมูลโมเดล EC2

จากตารางที่ 5-2 และรูปที่ 5-5 จะพบว่า ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพด้วยเทคนิค OPT และ TPT ที่ความเร็วรอบ 1468 และ 1450 นั้น ได้ค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกันทั้ง 2 วิธี

5.5 ข้อเสนอแนะ

จากที่กล่าวมาทั้งหมด จะพบว่าวิธีการนี้นั้นเป็นการประมาณค่าประสิทธิภาพจากชุดข้อมูลอินพุทที่ป้อนเข้า ถ้าชุดข้อมูลอินพุทที่ป้อนเข้านั้นไม่มีความแม่นยำ ก็จะส่งผลให้การประมาณค่านั้นเกิดความคลาดเคลื่อนอย่างมากได้ ฉะนั้น เครื่องมือวัดที่ใช้ควบคู่กับวิธีการนี้นั้นควยที่จะมีความแม่นยำที่สูง อีกประการหนึ่งในการประมาณค่าประสิทธิภาพแบบ TPT นั้น ชุดข้อมูล 2 ชุด ที่ทำการป้อนเข้าสู่กระบวนการนั้นควรที่จะมีความห่างกันพอสมควรเพื่อให้ได้ซึ่งค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยที่เหมาะสมตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ จากการวิจัยพบว่าควรที่จะมีความห่างกันไม่น้อยกว่า 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่เราสามารถทราบค่าประสิทธิภาพอย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำนี้มีส่วนช่วยในการพิจารณาทำการซ่อมบำรุงหรือพิจารณาในเรื่องค่าไฟฟ้าหาระยะเวลาคุ้มทุนเพื่อตัดสินใจเปลี่ยนมอเตอร์เพื่อการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าซึ่งสอดคล้องกับสถานการณ์ทางด้านพลังงานที่กำลังประสบปัญหาในปัจจุบันต่อไป

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Bhag S. Guru and Huseyin R. Hiziroglu, **Electric Machinery and Transformer.** New York: Oxford University Press, 2001.

[2] Cyril G. Veinott and Joseph e. Martin, **Fractional and subfractional horsepower electric motors.** New York: McGraw-Hill Book Company, 1984

[3] Richard A. Pearman, **Electrical Machinery and Transformer Technology.** Philadelphia: Harcourt Brace College Publishers

[4] Paul C. Krause, **Analysis of Electric Machinery.** New York: McGraw-Hill Book Company,

[5] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk and Scott D. Sudhoff, **Analysis of Electric Machinery and Drive System.** IEEE Power Engineering Society: A John Wiley & Sons INC. Publication,

[6] A. E. Fitzgeral, Charles Kingsley and Jr. Stephen D. Umans, **Electric Machinery.** McGraw-Hill, 2003

[7] Richard H. Englemen, William H. Middendorf, **Handbook of Electric Motors.** USA: Marcel Dekker, Inc. 1995

[8] IEEE Standard 114-2002, **IEEE Standard Test Procedure for Single-Phase Induction Motor**

[9] C. van der Merwe and F. S. van der Merwe, **A Study of Methods to Measure the Parameters of Single-Phase Induction Motors.** IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, June 1995

[10] E. R. Colins, Jr. and P. B. Boyd, **Improved Methods for Determining the Equivalent Circuit Parameters for Single-Phase Induction Motor Models**. IEEE Trans. pp. 390-397, 1993

[11] Garret N. Vanderplats, **Numerrical Optimization for Engineering Design with Application.** New York: McGraw-Hill.Inc., 1984

[12] S. S. Rao. **Optimization Theory and Application. 2nd ED.** New Delhi: Wilet Eastern, 1994

[13] K. F. Man, K.S. Tang and S. Kwong, **Genetic Algorithms Concepts and Designs.** Great Britain: Spriger-Verlag Limited, 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] John J. Grefenstette, **Genetic Algorithm for Machine Learning.** Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994

[15] A. M. S. Zalzala and P.J. Fleming, **Genetic Algorithms in Engineering System.** London: Bookcraft, 1997

[16] เชาว์ ชมพูอินไหว, **การรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้เจเนจิกอัลกอริทึม.** บัณฑิตวิทยาลัย สจล.ม 2544

[17] Michael Omoigui anb Obasohan Omozusi, **Parameter Estimation of Single-Phase Induction Machines.** IEEE Trans. pp. 2280-2287, 2001

[18] Claus B. Rasmussen and TJE. Miller, **Revolving-Field Polygon Technique for Performance Prediction of Single-Phase Inductiob Motors.** IEEE Trans. pp. 457-462, 2000

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบ Load Test ทั้ง 3 ครั้ง ของมอเตอร์ทั้ง 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสของ MIISUBISHI 200 W ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 200 W ครั้งที่ 1

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
119.0	220.1	2.881	0.6295	399.2	1420	1.6	237.9	59.60
111.8	219.9	2.827	0.6109	379.8	1423	1.5	223.5	58.85
104.5	219.9	2.790	0.5968	366.2	1425	1.4	208.9	57.05
97.5	219.9	2.735	0.5741	345.3	1432	1.3	194.9	56.46
90.3	220.0	2.691	0.5527	327.3	1437	1.2	180.6	55.17
83.3	220.0	2.648	0.5245	305.6	1446	1.1	166.6	54.51
75.9	220.1	2.616	0.5019	289.0	1449	1.0	151.7	52.50
68.6	220.1	2.585	0.4729	269.0	1455	0.9	137.1	50.98

ตารางที่ ก-2ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 200 W ครั้งที่ 2

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
118.9	220.1	2.868	0.6224	392.8	1419	1.6	237.8	60.53
111.9	220.1	2.812	0.6057	374.8	1425	1.5	223.8	59.72
104.7	220.1	2.786	0.5949	364.8	1428	1.4	209.4	57.39
97.6	220.1	2.731	0.5710	343.5	1434	1.3	195.2	56.83
90.4	220.0	2.683	0.5477	323.3	1439	1.2	180.8	55.93
83.1	220.1	2.648	0.5239	305.2	1443	1.1	166.2	54.46
75.9	219.9	2.605	0.5007	286.9	1450	1.0	151.8	52.93
68.6	220.2	2.583	0.4708	267.7	1455	0.9	137.1	51.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 200 W ครั้งที่ 3

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
119.0	220.1	2.855	0.6217	390.7	1421	1.6	238.1	60.94
111.9	220.0	2.808	0.6068	374.9	1425	1.5	223.8	59.71
104.7	220.0	2.773	0.5931	361.8	1428	1.4	209.4	57.87
97.7	220.1	2.721	0.5709	341.9	1435	1.3	195.4	57.14
90.5	220.1	2.682	0.5510	325.3	1440	1.2	181.0	55.63
83.1	220.1	2.642	0.5244	305.0	1443	1.1	166.2	54.50
75.9	220.0	2.610	0.5032	289.0	1450	1.0	151.8	52.54
68.5	219.9	2.572	0.4715	266.7	1453	0.9	136.9	51.35

ก.2 ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสของ MITSUBISHI 400 W ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 400 W ครั้งที่ 1

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
102.4	219.9	4.524	0.5914	588.4	1448	2.7	409.4	69.58
98.7	220.0	4.486	0.5822	574.6	1450	2.6	394.8	68.71
91.4	220.1	4.375	0.5606	539.8	1455	2.4	365.7	67.74
84.0	220.1	4.270	0.5296	497.7	1458	2.2	335.9	67.49
76.5	220.1	4.206	0.5126	474.5	1461	2.0	306.0	64.49
69.0	220.1	4.109	0.4771	431.4	1465	1.8	276.1	64.01
61.5	220.1	4.038	0.4420	394.8	1469	1.6	246.1	62.34
53.9	220.1	3.992	0.4176	366.9	1471	1.4	215.7	58.78
46.4	220.1	3.920	0.3777	325.9	1478	1.2	185.7	56.99
38.7	220.0	3.885	0.3481	297.4	1479	1.0	154.9	52.08
31.1	220.1	3.850	0.3247	275.1	1483	0.8	124.2	45.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 400 W ครั้งที่ 2

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
102.4	220.1	4.526	0.5926	590.3	1448	2.7	409.4	69.36
98.7	220.1	4.478	0.5828	574.4	1450	2.6	394.8	68.73
91.3	220.0	4.385	0.5606	540.8	1453	2.4	365.2	67.53
84.1	220.0	4.254	0.5341	499.9	1460	2.2	336.4	67.29
76.5	220.1	4.203	0.5132	474.7	1461	2.0	306.0	64.46
69.0	220.1	4.100	0.4773	430.8	1465	1.8	276.1	64.10
61.5	220.0	4.032	0.4490	398.2	1469	1.6	246.1	61.81
54.0	220.0	3.977	0.4171	365.0	1472	1.4	215.8	59.13
46.4	220.2	3.913	0.3778	325.5	1478	1.2	185.7	57.06
38.8	220.0	3.865	0.3497	297.3	1481	1.0	155.1	52.17
31.0	220.1	3.861	0.3264	277.3	1482	0.8	124.2	44.77

ตารางที่ ก-6 ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 400 W ครั้งที่ 3

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
102.4	220.0	4.524	0.5937	590.8	1448	2.7	409.4	69.30
98.7	220.0	4.466	0.5820	571.9	1450	2.6	394.8	69.03
91.4	220.1	4.366	0.5634	541.2	1454	2.4	365.4	67.52
83.9	220.0	4.260	0.5326	499.3	1457	2.2	335.7	67.23
76.4	220.1	4.202	0.5135	475.0	1460	2.0	305.8	64.38
68.9	220.0	4.115	0.4808	435.2	1463	1.8	275.8	63.37
61.6	220.1	4.025	0.4473	396.2	1470	1.6	246.3	62.17
54.0	220.0	3.965	0.4178	364.4	1472	1.4	215.8	59.22
46.4	219.9	3.907	0.3794	326.0	1476	1.2	185.5	56.90
38.8	220.1	3.868	0.3512	299.0	1481	1.0	155.1	51.87
31.0	220.1	3.860	0.3275	278.2	1482	0.8	124.2	44.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุของ Venz ขนาด 400 W

ตารางที่ ก-7 ผลการทดสอบทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ครั้งที่ 1

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
99.4	220.0	3.012	0.8090	536.2	1460	2.6	397.5	74.14
95.8	220.0	2.885	0.7982	506.6	1463	2.5	383.0	75.60
88.4	219.9	2.760	0.7845	476.1	1468	2.3	353.6	74.27
80.8	220.1	2.659	0.7683	449.7	1469	2.1	323.1	71.84
73.3	220.1	2.505	0.7472	411.9	1473	1.9	293.1	71.15
65.6	220.1	2.380	0.7233	378.8	1474	1.7	262.4	69.27
58.0	220.0	2.274	0.6994	349.9	1477	1.5	232.0	66.31
50.4	220.1	2.119	0.6778	328.1	1482	1.3	201.8	61.49
42.7	220.1	2.090	0.6395	294.1	1483	1.1	170.8	58.09
35.0	220.1	2.056	0.6172	279.2	1485	0.9	140.0	50.13

ตารางที่ ก-8 ผลการทดสอบทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ครั้งที่ 2

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
99.3	220.1	3.022	0.8098	538.6	1459	2.6	397.2	73.76
95.8	219.9	2.884	0.7967	505.2	1463	2.5	383.0	75.81
88.3	220.1	2.766	0.7828	476.4	1467	2.3	353.3	74.17
80.8	220.1	2.650	0.7709	449.7	1470	2.1	323.3	71.89
73.2	220.0	2.520	0.7459	413.5	1472	1.9	292.9	70.83
65.6	219.2	2.399	0.7189	379.6	1475	1.7	262.6	69.17
58.1	220.0	2.269	0.7004	349.6	1479	1.5	232.3	66.45
50.4	219.9	2.203	0.6740	326.6	1480	1.3	201.5	61.69
42.8	220.0	2.090	0.6385	293.5	1485	1.1	171.1	58.28
35.0	220.1	2.061	0.6171	279.8	1486	0.9	140.1	50.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-9 ผลการทดสอบทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 400 W ครั้งที่ 3

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
99.4	220.0	3.013	0.8108	537.4	1460	2.6	397.5	73.97
95.8	220.1	2.881	0.7969	505.3	1464	2.5	383.3	75.85
88.3	220.1	2.761	0.7798	473.9	1466	2.3	353.1	74.51
80.7	220.0	2.656	0.7674	448.6	1468	2.1	322.8	71.96
73.3	220.1	2.513	0.7443	411.6	1473	1.9	293.1	71.21
65.7	220.1	2.397	0.7210	380.4	1476	1.7	262.8	69.08
58.0	220.1	2.284	0.6942	349.0	1478	1.5	232.2	66.52
50.4	220.1	2.215	0.6726	327.8	1482	1.3	201.8	61.55
42.8	220.1	2.094	0.6334	292.0	1485	1.1	171.1	58.58
35.0	220.1	2.062	0.6167	279.8	1486	0.9	140.1	50.05

ก.4 ผลการทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุของ MITSUBISHI ขนาด 750 W

ตารางที่ ก-10 ผลการทดสอบทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ครั้งที่ 1

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
104.7	220.0	5.201	0.8843	1011.9	1442	5.2	785.2	77.60
100.9	220.0	5.067	0.8788	979.8	1445	5.0	756.6	77.22
91.2	220.1	4.696	0.8610	889.8	1452	4.5	684.2	76.90
81.3	220.1	4.379	0.8402	809.7	1456	4.0	609.9	75.32
71.5	220.1	4.063	0.8127	726.6	1464	3.5	536.6	73.85
61.5	220.0	3.773	0.7746	643.1	1468	3.0	461.2	71.71
51.5	220.1	3.490	0.7396	568.1	1474	2.5	385.9	67.93
41.2	220.1	3.331	0.6860	502.5	1477	2.0	309.3	61.56
31.1	220.1	3.106	0.6184	422.7	1484	1.5	233.1	55.15
20.8	220.0	2.988	0.5369	352.9	1487	1.0	155.7	44.13
18.7	219.9	2.941	0.5183	335.9	1490	0.9	140.4	41.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-11 ผลการทดสอบทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ครั้งที่ 2

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
104.8	219.9	5.167	0.8835	1004.0	1443	5.2	785.8	78.26
100.9	219.9	5.039	0.8785	973.6	1445	5.0	756.6	77.71
91.2	219.9	4.680	0.8619	887.2	1452	4.5	684.2	77.12
81.4	220.0	4.368	0.8362	803.6	1457	4.0	610.3	75.95
71.5	220.0	4.062	0.8106	724.6	1463	3.5	536.2	74.00
61.5	220.1	3.770	0.7717	640.2	1468	3.0	461.2	72.04
51.5	220.1	3.518	0.7318	566.6	1474	2.5	385.9	68.11
41.3	219.9	3.321	0.6854	500.6	1478	2.0	309.6	61.84
31.1	220.0	3.124	0.6170	424.0	1484	1.5	233.1	54.98
20.8	220.1	2.964	0.5401	352.2	1490	1.0	156.0	44.30
18.7	220.1	2.945	0.5174	335.4	1489	0.9	140.3	41.84

ตารางที่ ก-12 ผลการทดสอบทดสอบ Load Test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ครั้งที่ 3

Load	V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r	T_o	P_o	Eff
104.8	220.1	5.163	0.8821	1002.2	1444	5.2	786.3	78.46
101.0	219.9	5.026	0.8790	971.3	1446	5.0	757.1	77.95
91.2	220.1	4.691	0.8579	885.7	1452	4.5	684.2	77.25
81.4	220.0	4.356	0.8416	806.5	1457	4.0	610.3	75.67
71.4	220.0	4.057	0.8129	725.3	1462	3.5	535.9	73.88
61.5	220.1	3.742	0.7761	639.1	1469	3.0	461.5	72.21
51.5	220.0	3.500	0.7359	566.5	1474	2.5	385.9	68.12
41.3	220.0	3.322	0.6865	501.6	1478	2.0	309.6	61.71
31.1	219.9	3.101	0.6170	420.8	1484	1.5	233.1	55.40
20.8	220.1	2.986	0.5324	349.9	1488	1.0	155.8	44.53
18.7	220.1	2.944	0.5141	333.0	1490	0.9	140.4	42.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพด้วยเทคนิค TPT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 400 W ด้วยเทคนิค TPT

ข. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1479 และ 1458

ตารางที่ ข-1 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1479 และ 1458

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.0	3.885	0.3481	297.4	1479
220.1	4.270	0.5296	497.7	1458

ตารางที่ ข-2 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขนาด 400 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1479 และ 1458

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1479	45.8	3.878	299.4	1.18	183.2	61.19
	1473	58.2	3.963	355.9	1.51	232.9	65.44
	1469	66.1	4.033	392.9	1.72	264.4	67.28
	1461	80.9	4.198	465.4	2.12	323.5	69.50
	1455	91.1	4.339	518.3	2.39	364.5	70.33
	1450	99.1	4.467	561.4	2.61	396.6	70.65

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1479	43.8	3.882	301.0	1.13	175.3	58.23
	1473	55.9	3.959	355.4	1.45	223.5	62.88
	1469	63.6	4.022	391.2	1.65	254.2	64.98
	1461	78.0	4.172	461.5	2.04	312.2	67.64
	1455	88.2	4.302	513.0	2.32	352.6	68.74
	1450	96.1	4.419	555.0	2.53	384.4	69.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2(ต่อ)

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1479	43.4	3.882	301.4	1.12	173.5	57.58
	1473	55.4	3.958	355.3	1.44	221.4	62.31
	1469	63.0	4.020	390.8	1.64	251.9	64.45
	1461	77.4	4.167	460.6	2.02	309.5	67.20
	1455	87.4	4.294	511.6	2.30	349.7	68.35
	1450	95.3	4.410	553.3	2.51	381.3	68.92

ค. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1479 และ 1455

ตารางที่ ข-3 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1479 และ 1455

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.0	3.885	0.3481	297.4	1479
220.1	4.375	0.5606	539.8	1455

ตารางที่ ข-4 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 400 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1479 และ 1455

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1479	47.1	3.866	302.2	1.22	188.6	62.40
	1473	59.7	3.961	359.9	1.55	238.9	66.39
	1469	67.7	4.038	397.6	1.76	270.8	68.09
	1461	82.6	4.218	471.3	2.16	330.2	70.06
	1455	92.8	4.372	524.8	2.44	371.2	70.73
	1450	100.8	4.509	568.2	2.66	403.0	70.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4(ต่อ)

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1479	44.5	3.879	304.1	1.15	177.9	58.49
	1473	56.7	3.956	359.4	1.47	226.9	63.13
	1469	64.5	4.019	395.7	1.68	258.1	65.22
	1461	79.2	4.169	467.0	2.07	317.0	67.87
	1455	89.5	4.299	519.3	2.35	358.2	68.97
	1450	97.7	4.416	562.0	2.57	390.6	69.50

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1479	44.3	3.876	304.5	1.14	177.1	58.19
	1473	56.5	3.955	359.4	1.47	225.9	62.84
	1469	64.2	4.018	395.6	1.67	256.9	64.94
	1461	78.8	4.170	466.5	2.06	315.4	67.60
	1455	89.1	4.301	518.5	2.34	356.2	68.71
	1450	97.1	4.419	560.9	2.56	388.4	69.24

ง. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1471 และ 1455

ตารางที่ ข-5 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ที่ความเร็วรอบ 1471 และ 1455

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.1	3.992	0.4176	366.9	1471
220.1	4.375	0.5606	539.8	1455

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ขนาด 400 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1471 และ 1455

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	*Eff*
Model T	1479	46.2	3.863	299.2	1.19	184.6	61.71
	1473	58.6	3.953	355.9	1.52	234.4	65.85
	1469	66.5	4.025	393.1	1.73	265.9	67.63
	1461	81.2	4.196	465.8	2.12	324.9	69.75
	1455	91.4	4.342	518.7	2.40	365.7	70.51
	1450	99.4	4.473	561.7	2.62	397.5	70.78

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	*Eff*
Model EC1	1479	45.3	3.857	301.4	1.17	181.3	60.15
	1473	57.5	3.950	357.1	1.49	230.0	64.42
	1469	65.2	4.024	393.6	1.70	260.8	66.28
	1461	79.6	4.197	464.7	2.08	318.5	68.53
	1455	89.6	4.345	516.4	2.35	358.2	69.37
	1450	97.3	4.477	558.2	2.56	389.1	69.70

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	*Eff*
Model EC2	1479	43.9	3.888	303.4	1.13	175.5	57.86
	1473	56.0	3.966	357.9	1.45	223.9	62.55
	1469	63.7	4.029	393.8	1.66	254.6	64.66
	1461	78.2	4.179	464.1	2.04	312.6	67.36
	1455	88.3	4.309	515.7	2.32	353.1	68.48
	1450	96.2	4.427	557.7	2.54	385.0	69.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1471 และ 1450

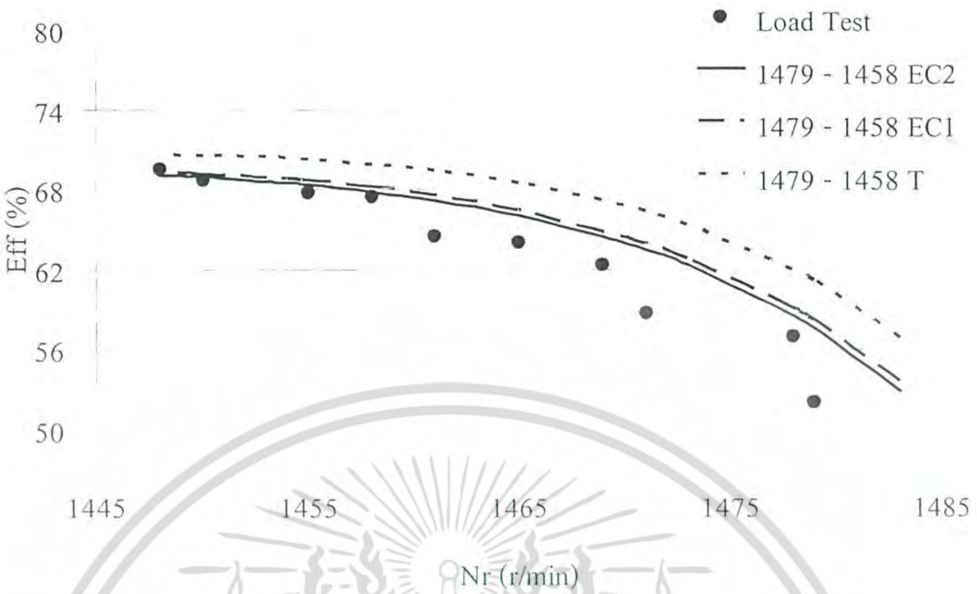
ตารางที่ ข-7 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W
ที่ความเร็วรอบ 1471 และ 1450

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.1	3.992	0.4176	366.9	1471
220.0	4.486	0.5822	574.6	1450

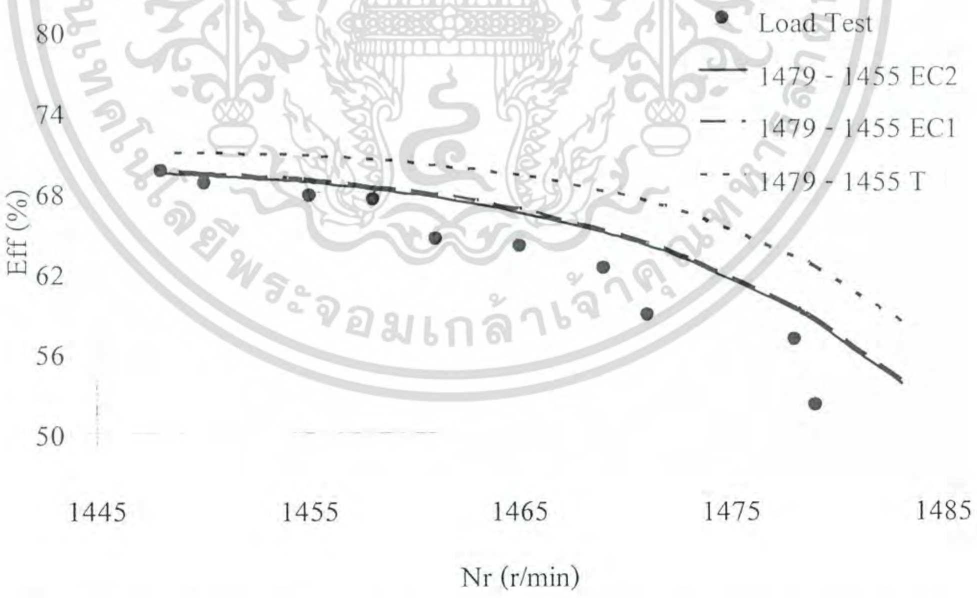
ตารางที่ ข-8 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส
ขนาด 400 W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ 1471 และ 1450

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1479	45.9	3.859	297.7	1.19	183.6	61.67
	1473	58.2	3.949	354.1	1.51	233.0	65.80
	1469	66.1	4.021	391.0	1.72	264.3	67.58
	1461	80.7	4.192	463.3	2.11	322.9	69.70
	1455	90.8	4.338	515.8	2.39	363.4	70.45
	1450	98.7	4.469	558.4	2.60	394.9	70.72
Model EC1	1479	43.8	3.887	301.3	1.13	175.4	58.21
	1473	55.9	3.965	355.7	1.45	223.6	62.87
	1469	63.6	4.028	391.5	1.65	254.3	64.96
	1461	78.1	4.178	461.8	2.04	312.3	67.61
	1455	88.2	4.308	513.3	2.32	352.7	68.72
	1450	96.1	4.425	555.3	2.53	384.5	69.24
Model EC2	1479	43.5	3.890	302.1	1.12	174.0	57.59
	1473	55.5	3.966	356.3	1.44	222.0	62.31
	1469	63.1	4.028	391.8	1.64	252.5	64.45
	1461	77.6	4.175	461.7	2.03	310.2	67.19
	1455	87.6	4.303	512.9	2.30	350.5	68.34
	1450	95.6	4.419	554.7	2.52	382.2	68.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

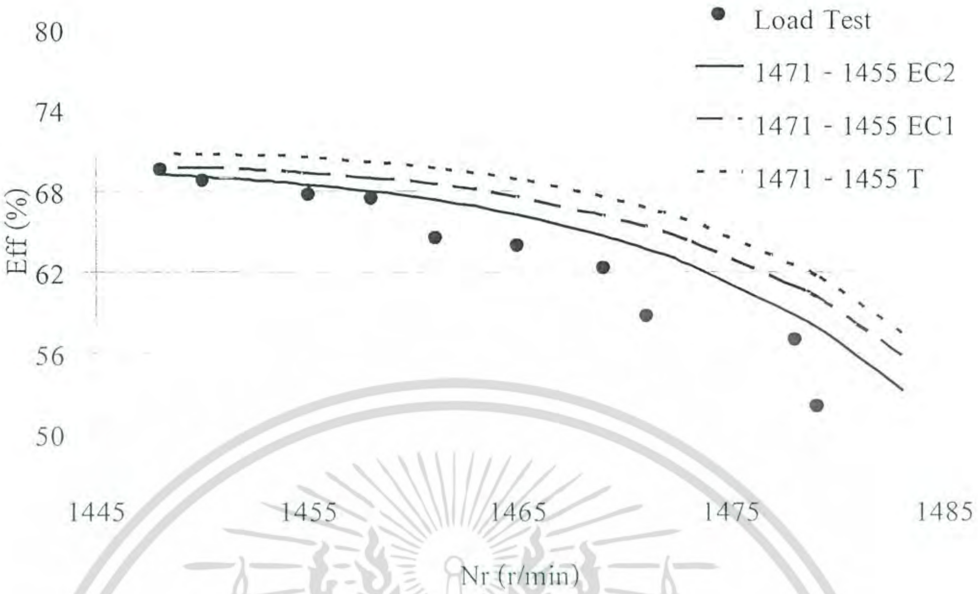


รูปที่ ข-1 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1479 – 1458 r/min

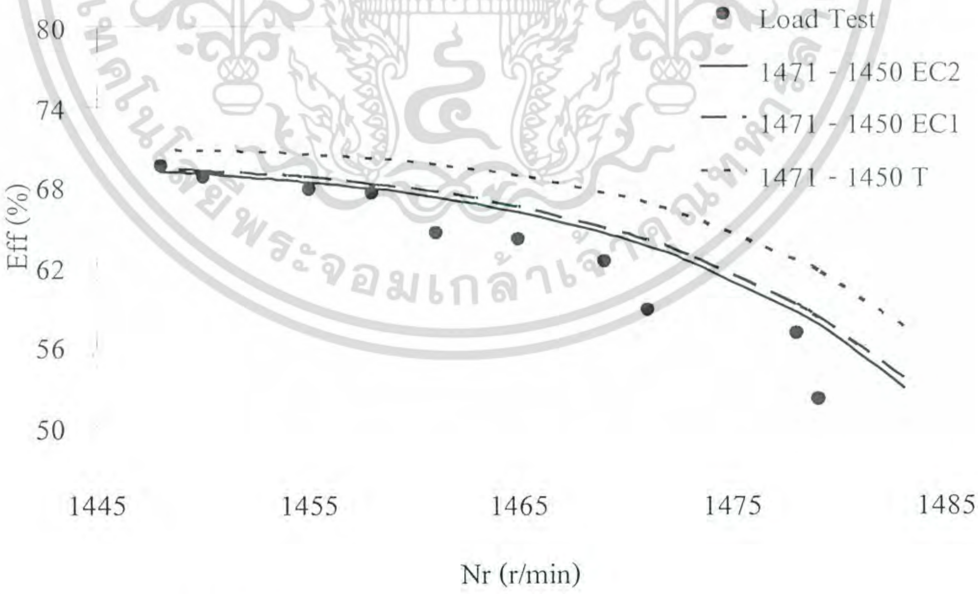


รูปที่ ข-2 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1479 – 1455 r/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1471 – 1455 r/min



รูปที่ ข-4 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบแยกเฟสขนาด 400 W ได้จากการประมาณค่าแบบ TPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1471 – 1450 r/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ด้วยเทคนิค TPT

ข. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1490 และ 1464

ตารางที่ ข-9 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ที่ความเร็วรอบ 1490 และ 1464

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
219.9	2.941	0.5183	335.9	1490
220.1	4.063	0.8127	726.6	1464

ตารางที่ ข-10 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1490และ1464

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1487	28.6	3.031	386.2	1.38	214.4	55.51
	1480	43.3	3.385	497.0	2.09	324.4	65.27
	1474	54.4	3.687	583.4	2.64	407.6	69.87
	1468	64.3	3.981	664.1	3.14	482.4	72.64
	1456	81.8	4.543	814.6	4.03	613.5	75.31
	1445	95.8	5.043	945.3	4.75	718.3	75.98

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1487	27.0	3.036	385.9	1.30	202.5	52.48
	1480	41.1	3.355	495.5	1.99	308.5	62.27
	1474	52.1	3.643	583.3	2.53	390.8	67.01
	1468	62.2	3.933	666.6	3.03	466.2	69.94
	1456	80.1	4.510	823.7	3.94	600.6	72.92
	1445	94.6	5.035	960.6	4.69	709.1	73.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-10(ต่อ)

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1487	28.1	3.034	385.3	1.35	210.5	54.63
	1480	42.5	3.365	495.2	2.06	318.7	64.36
	1474	53.6	3.657	582.7	2.61	402.0	68.99
	1468	63.7	3.948	665.7	3.11	478.1	71.81
	1456	81.8	4.524	822.6	4.02	613.3	74.56
	1445	96.3	5.048	959.9	4.78	722.5	75.27

ค. **ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1490 และ 1452**

ตารางที่ ข-11 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ที่ความเร็วรอบ 1490 และ 1452

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
219.9	2.941	0.5183	335.9	1490
220.1	4.696	0.861	889.8	1452

ตารางที่ ข-12 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1490และ1452

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1487	29.6	3.054	388.0	1.43	222.0	57.23
	1480	44.6	3.414	501.8	2.16	334.5	66.66
	1474	55.9	3.723	590.7	2.72	419.5	71.01
	1468	66.1	4.024	673.9	3.23	496.0	73.60
	1456	84.1	4.604	829.6	4.14	630.4	75.99
	1445	98.4	5.123	965.3	4.88	738.2	76.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-12(ต่อ)

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1487	27.7	3.051	386.2	1.33	207.6	53.76
	1480	42.0	3.377	497.5	2.03	315.0	63.31
	1474	53.1	3.671	586.8	2.58	398.2	67.87
	1468	63.3	3.968	671.5	3.09	474.5	70.66
	1456	81.4	4.560	831.7	4.01	610.5	73.41
	1445	96.1	5.101	971.6	4.76	720.5	74.16

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1487	28.7	3.055	386.5	1.38	215.5	55.76
	1480	43.4	3.392	498.2	2.10	325.4	65.31
	1474	54.6	3.689	587.0	2.66	409.8	69.80
	1468	64.9	3.984	671.1	3.17	486.7	72.52
	1456	83.1	4.568	830.2	4.09	623.3	75.08
	1445	97.8	5.100	969.5	4.85	733.6	75.68

ง. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1484 และ 1452

ตารางที่ ข-13 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ที่ความเร็วรอบ 1484 และ 1452

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.0	3.106	0.6184	422.7	1484
220.0	4.696	0.8610	889.8	1452

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-14 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1484และ1452

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model T	1487	30.1	2.942	372.2	1.45	225.9	60.71
	1480	45.2	3.299	488.8	2.19	339.3	69.43
	1474	56.8	3.612	580.9	2.76	425.9	73.32
	1468	67.3	3.923	667.8	3.28	504.4	75.54
	1456	85.8	4.532	831.5	4.22	643.5	77.39
	1445	100.8	5.086	974.8	5.00	755.7	77.53

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC1	1487	28.2	2.965	373.2	1.36	211.9	56.77
	1480	42.8	3.289	487.2	2.07	320.9	65.86
	1474	54.1	3.587	579.2	2.63	405.9	70.07
	1468	64.6	3.892	667.1	3.15	484.2	72.58
	1456	83.3	4.507	833.9	4.10	624.6	74.90
	1445	98.5	5.073	979.8	4.88	738.5	75.37

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	Eff
Model EC2	1487	29.3	2.956	373.9	1.41	219.7	58.76
	1480	44.1	3.297	488.2	2.14	330.8	67.76
	1474	55.5	3.600	579.5	2.70	416.4	71.86
	1468	66.0	3.905	666.3	3.22	494.8	74.26
	1456	84.6	4.513	831.0	4.16	634.7	76.37
	1445	99.7	5.071	975.5	4.95	748.0	76.68

จ. ชุดข้อมูลของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1484 และ 1442

ตารางที่ ข-15 ชุดข้อมูลอินพุทของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ที่ความเร็วรอบ 1484 และ 1442

V_{in}	I_{in}	$p.f.$	P_{in}	n_r
220.1	3.106	0.6184	422.7	1484
220.0	5.201	0.8843	1011.9	1442

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

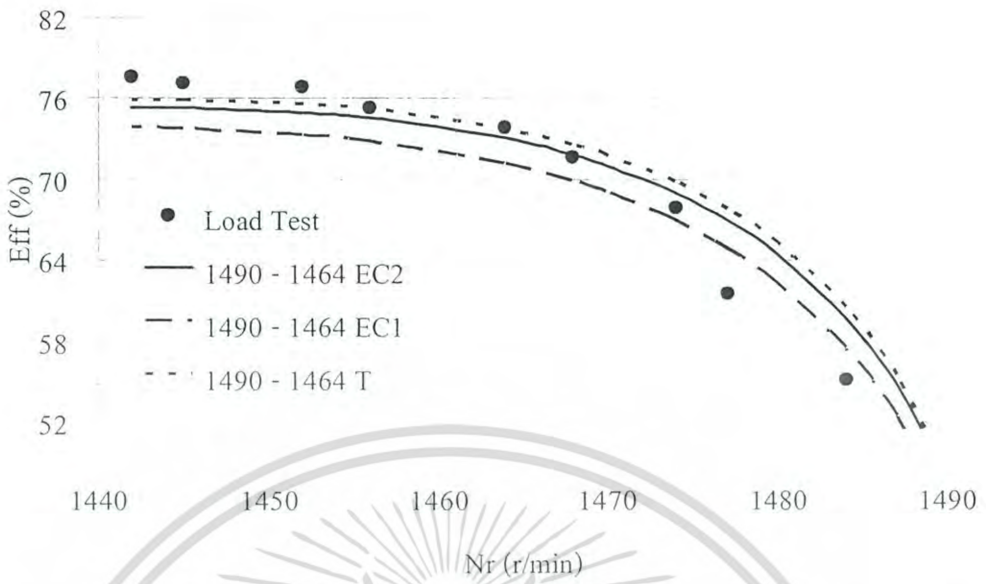
ตารางที่ ข-16 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิค TPT ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750W ที่ชุดข้อมูลอินพุทที่ความเร็วรอบ1484และ1442

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	*Eff*
Model T	1487	30.1	2.951	371.8	1.45	225.4	60.63
	1480	45.1	3.306	487.9	2.18	338.5	69.38
	1474	56.6	3.617	579.5	2.75	424.7	73.28
	1468	67.0	3.926	665.9	3.27	502.8	75.51
	1456	85.5	4.531	828.6	4.21	641.2	77.38
	1445	100.4	5.079	971.0	4.98	752.8	77.53

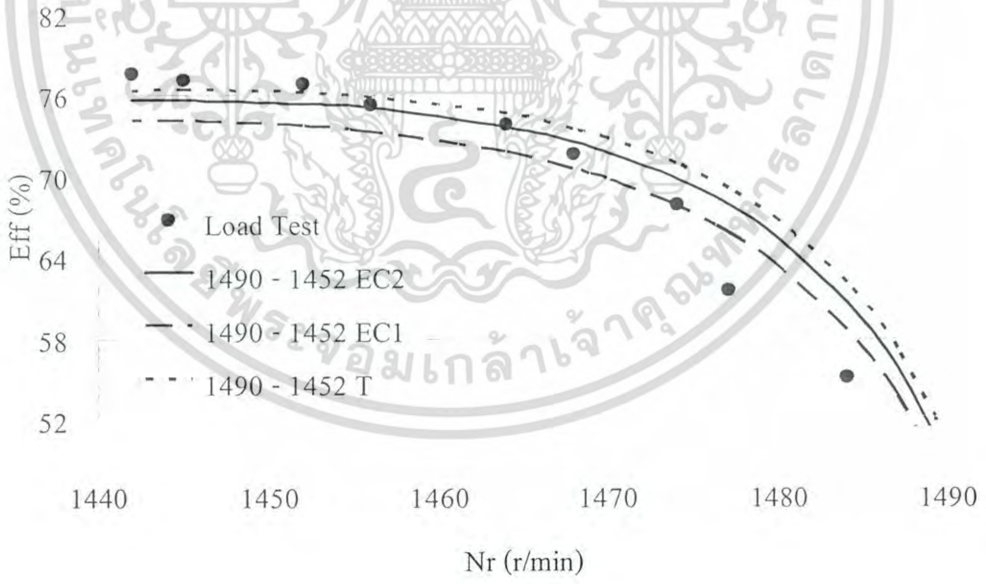
	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	*Eff*
Model EC1	1487	27.8	2.974	373.5	1.34	208.3	55.78
	1480	42.2	3.293	486.3	2.04	316.5	65.08
	1474	53.5	3.587	577.4	2.60	401.0	69.45
	1468	63.8	3.888	664.3	3.12	478.9	72.08
	1456	82.5	4.493	829.2	4.06	618.5	74.60
	1445	97.6	5.050	973.3	4.84	731.9	75.20

	n_r	Load	I_{in}	P_{in}	T_o	P_o	*Eff*
Model EC2	1487	29.0	2.963	373.4	1.40	217.6	58.26
	1480	43.7	3.299	486.8	2.12	327.9	67.34
	1474	55.1	3.599	577.6	2.68	413.1	71.51
	1468	65.5	3.901	664.0	3.20	491.1	73.96
	1456	84.1	4.505	827.9	4.14	630.5	76.15
	1445	99.1	5.059	971.7	4.92	743.5	76.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

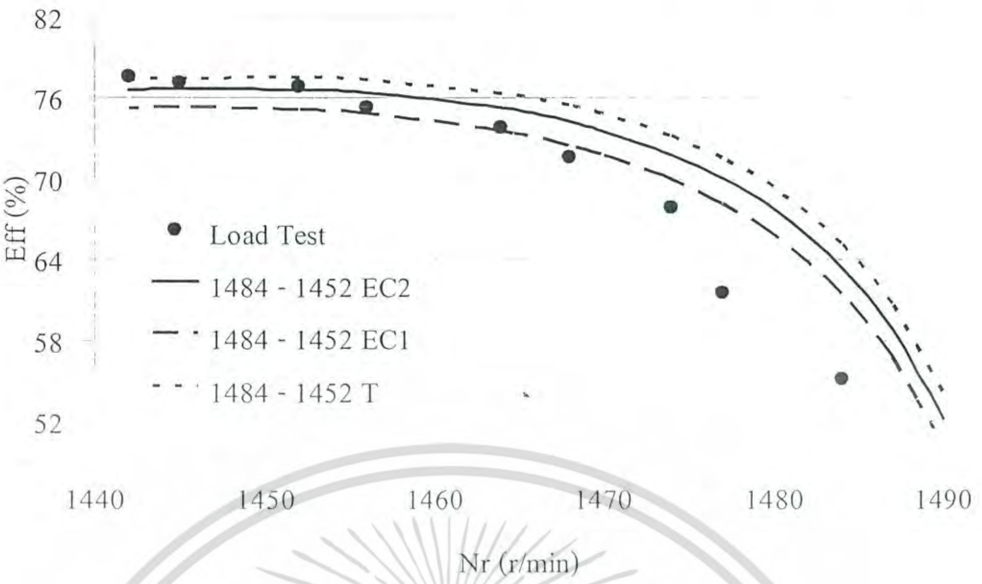


รูปที่ ข-5 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1490 – 1464 r/min

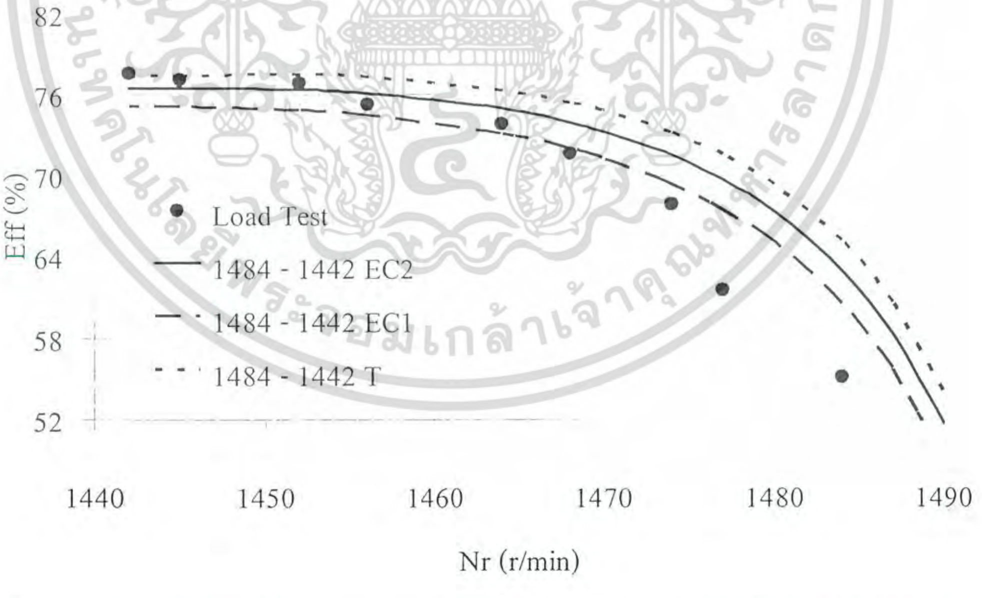


รูปที่ ข-6 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1490 – 1452 r/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-7 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1484 – 1452 r/min



รูปที่ ข-8 ค่าประสิทธิภาพที่ของมอเตอร์แบบเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 750 W ได้จากการประมาณค่าแบบTPT ของวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1484 – 1442 r/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. อินฏา อุบลไทรย์, ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย และ ธนวัฒน์ ภูมิภาคม **"เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส"**, การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 29 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, pp. 93-96, พัทยา, ประเทศไทย, 9-10 พฤศจิกายน 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส

On-Site Efficiency Estimation Technique for Split-Phase Induction Motor

อัญญา จุลไทรย์* ธีรวุฒิ ฉัตรสุทัศ* ธนกิจพนธ์ ภูมิภาค**

* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร 10530

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขณะใช้งานจริงโดยไม่จำเป็นต้องหยุดการทำงานและนำมอเตอร์ออกจากกระบวนการเพื่อไปทำการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพในห้องปฏิบัติการ เทคนิคนี้จะอ้างอิงวงจรสมมูลซึ่งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนาม ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลสามารถพิจารณาได้จากการใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะใช้งานจริงเท่านั้น ร่วมกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบจีเนติกอัลกอริทึม นอกจากนี้ยังได้มีการเพิ่มพารามิเตอร์ของการสูญเสียในแกนเหล็กเข้าไปในวงจรสมมูลเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่า บทความนี้ได้ทำการทดสอบเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพกับมอเตอร์ขนาด 200 และ 400 วัตต์ ผลการทดสอบที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ : การประมาณค่าประสิทธิภาพ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส จีเนติกอัลกอริทึม การสูญเสียในแกนเหล็ก

Abstract

This paper proposes the technique for estimating on-site efficiency of split-phase induction motor without the need to disconnect and remove the motor from the process in order to test that motor in the laboratory. The on-site efficiency is estimated by using the equivalent circuit model which is based on the double-revolving-field theory. These circuit parameters can be obtained from the use of measured data of voltage, current, power and speed of an actual motor in the field coupled with the optimization technique GAs (Genetic Algorithms). Furthermore, the addition core loss parameter is then proposed in order to improve accuracy. Two split-phase motors of 200 and 400 watts are tested by using this proposed technique and the results show that the estimated efficiencies match those obtained from the laboratory test.

Keywords : Efficiency estimation, Split-phase induction motor, Genetic Algorithms, Coreloss

1. บทนำ

โดยปกติแล้วเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสมีการใช้งานในระยะเวลานานต่อเนื่อง ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ดังกล่าวย่อมมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลทำให้มอเตอร์จะมีค่าประสิทธิภาพที่ต่ำลง ดังนั้นเพื่อให้ได้กำลังทางกลที่เหมาะสมตามความต้องการก็จะทำให้มอเตอร์ต้องรับกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และจากสภาวะการณ์ทางด้านพลังงานในปัจจุบันที่มีการรณรงค์ให้มีการใช้พลังงานอย่างประหยัดและคุ้มค่า การทราบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์หลังจากผ่านการทำงานมาเป็นระยะเวลานาน สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาในด้านค่าพลังงานไฟฟ้าและจุดคุ้มทุน ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการตัดสินใจเปลี่ยนมอเตอร์ สำหรับการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ดังกล่าวนั้นได้มีการนำเสนอมาตรฐานการหาประสิทธิภาพหลายวิธี [1, 2] วิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือการถอดมอเตอร์ออกจากกระบวนการเพื่อนำไปทดสอบหาค่าประสิทธิภาพในห้องปฏิบัติการ จะเห็นได้ว่าเป็นวิธีการที่ยุ่งยากและใช้ระยะเวลานาน

รูปที่ 1 วงจรสมมูลแบบดั้งเดิม (Model T)

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลแบบดั้งเดิม (traditional equivalent circuit) ดังรูปที่ 1 [1] สามารถพิจารณาได้จากการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการแบบไม่มีภาระ (no-load test) และล็อกโรเตอร์ (locked rotor test) รวมทั้งการวัดความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง (dc test) เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ประมาณโดยการใช้ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้กับค่าที่แท้จริงพบว่าจะคลาดเคลื่อนไปพอสมควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้เนื่องจากสภาพการใช้งานจริง เช่น แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ค่าความต้านทานไฟฟ้าของโรเตอร์เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ และการไม่คิดค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) บทความนี้นำเสนอวิธีการที่สะดวก รวดเร็ว ค่าใช้จ่ายต่ำ และมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นในการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยไม่ต้องทดสอบในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนอนี้จะอ้างอิงพื้นฐานของวงจรสมมูลซึ่งเพิ่มเติมและพิจารณาถึงค่าการสูญเสียในแกนเหล็กเพิ่มขึ้นด้วย

2. วงจรสมมูลเมื่อคิดผลของค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก

จากวงจรสมมูลแบบดั้งเดิมในรูปที่ 1 สามารถคำนวณหาค่า

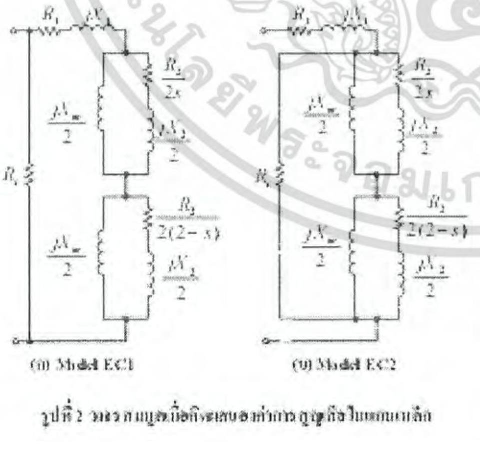
$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (1)$$

$$Z_{2f} = \frac{jX_m}{2} \| \left(\frac{R_2}{2s} + \frac{jX_2}{2}\right) \quad (2)$$

$$Z_{2b} = \frac{jX_m}{2} \| \left(\frac{R_2}{2(2-s)} + \frac{jX_2}{2}\right) \quad (3)$$

$$Z_T = Z_1 + Z_{2f} + Z_{2b} \quad (4)$$

เมื่อ R_1 และ R_2 เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าของสเตเตอร์และโรเตอร์ X_1 และ X_2 เป็นค่า leakage reactance ของสเตเตอร์และโรเตอร์ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากัน [1] X_m เป็นค่า magnetizing reactance และ s เป็นค่าสลิป จะเห็นได้ว่าวงจรสมมูลลักษณะนี้ไม่มีการคิดผลของค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก บทความนี้ได้นำเสนอวงจรสมมูลใหม่โดยมีการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของการสูญเสียในแกนเหล็ก R_c เป็น 2 แบบ ตามที่แสดงในรูปที่ 2 จากวงจรสมมูลรูปที่ 2 (a) และ 2 (b) ค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรสามารถหาได้จากสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ



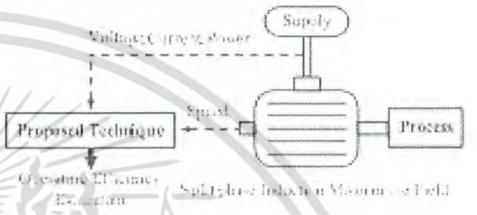
รูปที่ 2 วงจรสมมูลเมื่อคิดผลของค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก

$$Z_T = (Z_1 + Z_{2f} + Z_{2b}) \| R_c \quad (5)$$

$$Z_T = Z_1 + (R_c \| (Z_{2f} + Z_{2b})) \quad (6)$$

3. เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งาน

วิธีการนี้เป็นการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งานอยู่ในระบบดังรูปที่ 3 โดยไม่ต้องปลดมอเตอร์ออกจากการใช้งาน และไม่ต้องวัดค่ากำลังทางกลที่เกิดขึ้น ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการของวงจรสมมูล



รูปที่ 3 เทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งาน

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแต่ละตัว สามารถคำนวณหาค่าได้จากการใช้ชุดข้อมูลของค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์ที่วัดได้ขณะทำงานอยู่ที่ภาระงานใดๆ ร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหนึ่งคือ อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms, GAs) [3] เพื่อค้นหาค่าที่เหมาะสมในช่วงค่าขอบเขตที่เป็นไปได้ของสมการ

Minimize

$$F_{objective} = \sum_{i=1}^{n}\left|\frac{I_{input,cal}}{I_{input,mea}}-1\right|^2 + \sum_{i=1}^{n}\left|\frac{P_{input,cal}}{P_{input,mea}}-1\right|^2 \quad (7)$$

โดย $n = 1$ ในกรณีที่มีข้อมูลขณะใช้งานเพียงชุดเดียว และ $n = 2$ ในกรณีที่มีข้อมูล 2 ชุด ค่า $I_{input,mea}$ และ $P_{input,mea}$ เป็นกระแสและกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ตามลำดับ ค่า $I_{input,cal}$ และ $P_{input,cal}$ เป็นกระแสและกำลังไฟฟ้าที่คำนวณโดยใช้สมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ

$$I_{input,cal} = \frac{V_{input,mea}}{Z_T} \quad (8)$$

$$P_{input,cal} = V_{input,mea} I_{input,cal} (PF_{mea}) \quad (9)$$

เมื่อ $V_{input,mea}$ และ PF_{mea} เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ตามลำดับ ค่าตอบที่เหมาะสมของสมการที่ (7) จะเป็นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลที่สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าประสิทธิภาพโดยประมาณของมอเตอร์ขณะใช้งานได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของเทคนิคการประมาณค่าประสิทธิภาพขณะใช้งาน โดยทำการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขณะทำงานอยู่ในระบบ ขนาด200 และ 400 วัตต์ ซึ่งมีข้อมูลของป้ายพิกัด (nameplate) แสดงในตารางที่ 1 ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากทำการวัดค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะทำงานที่ภาระใด ๆ โดยไม่ต้องหยุดมอเตอร์ ข้อมูลที่วัดได้นี้จะนำไปป้อนให้กับโปรแกรมเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลซึ่งแสดงผลได้ดังตารางที่ 2 จากนั้นค่าประสิทธิภาพโดยประมาณของมอเตอร์ ณ จุดที่ทำงานอยู่จะสามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการของวงจรสมมูล ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ทดสอบทั้ง2 ขนาดแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ข้อมูลป้ายพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส

W	V	A	Hz	Pole	r/min
200	220	2.8	50	4	1450
400	220	4.8	50	4	1440

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ประมาณได้จากสมการที่ (7)

Motor 200 W — Parameters (Ω)

Model	R_1	X_1	X_2	R_2	X_m	R_c
T	11.1	6.9	6.9	11.3	153.7	-
EC1	8.8	8.0	8.0	11.1	160.0	2204
EC2	8.5	7.3	7.3	10.4	154.1	2852

Motor 400 W — Parameters (Ω)

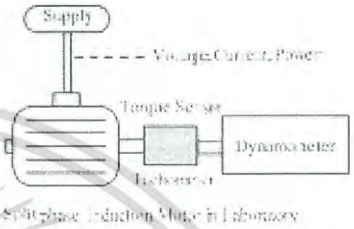
Model	R_1	X_1	X_2	R_2	X_m	R_c
T	6.5	2.1	2.1	5.3	105.4	-
EC1	5.2	3.2	3.2	5.0	104.1	2237
EC2	5.6	2.4	2.4	5.1	105.9	2019

ตารางที่ 3 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะทำงานในระบบ

Motor 200 W Onsite Measurement				Estimated Efficiency (%) Model		
V	A	W	r/min	T	EC1	EC2
219.8	2.58	261.3	1458	57.04	59.30	58.20

Motor 400 W Onsite Measurement				Estimated Efficiency (%) Model		
V	A	W	r/min	T	EC1	EC2
220.0	4.13	400	1464	67.27	65.53	66.11

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการใช้เทคนิคนี้ มอเตอร์ทั้งสองตัวได้ถูกนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 4 โดยใช้เครื่องมือวัดที่ได้มาตรฐาน ทำการทดสอบมอเตอร์แบบมีภาระ (load test) โดยจ่ายกำลังให้กับไดนาโมมิเตอร์ (dynamometer) ซึ่งต่อกับเพลาของมอเตอร์และจะต่อผ่านเครื่องมือวัดค่าแรงบิดและความเร็วรอบ (torque sensor and tachometer) เพื่อวัดค่ากำลังทางกลจริงที่เกิดขึ้น ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ภาระทางกลต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์และกำลังทางกลที่เกิดขึ้น ตารางที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้วิธีการที่นำเสนอกับค่าที่ทดสอบได้จากห้องปฏิบัติการ จะเห็นได้ว่าผลการประมาณค่าโดยใช้วงจรสมมูลทั้ง 3 ลักษณะ (รูปที่ 1 และ 2) จะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีความแตกต่างไม่เกิน 2 %



รูปที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการประมาณและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Efficiency (%)	Laboratory Test	Model T	Model EC1	Model EC2
Motor 200 W	58.4	57.04	59.30	58.20
Motor 400 W	66.02	67.27	65.53	66.11

นอกจากนั้น ถ้าในกรณีที่มอเตอร์ขณะทำงานอยู่ในระบบมีการจ่ายภาระทางกล2 ค่า วิธีการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการคำนวณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์นั้นที่ค่าภาระทางกลต่าง ๆ ได้โดยใช้ข้อมูลที่วัดได้ 2 ชุด ดังตารางที่ 5 ป้อนให้กับโปรแกรมและกำหนดให้ค่า $n = 2$ ในสมการที่ (7) ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ได้จากโปรแกรมจะเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณค่าประสิทธิภาพในช่วงการทำงานจริงของมอเตอร์ตัวนั้นได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการพิจารณาจัดการด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ประกอบการ

ตารางที่ 5 ข้อมูลกรณีมอเตอร์ขณะทำงานในระบบจ่ายภาระทางกล2 ค่า

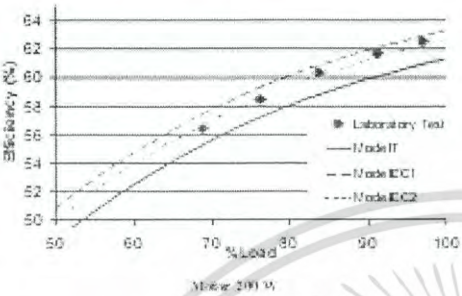
Motor200 W	V	A	W	r/min
Onsite	219.8	2.58	261.3	1458
Measurement	220.2	2.64	292.9	1450

Motor400 W	V	A	W	r/min
Onsite	220.0	4.13	400	1464
Measurement	220.0	4.28	550	1455

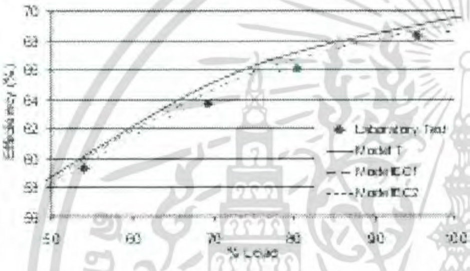
จากกราฟในรูปที่ 5 แสดงผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ในช่วงการทำงานจริงโดยใช้ข้อมูลจากการวัดค่าขณะใช้งาน 2 ชุด และวงจรสมมูล 3 ลักษณะ จะเห็นได้ว่าการใช้วงจรสมมูลไม่โดยมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มค่าพารามิเตอร์ R_c แบบ Model EC1 และ EC2 จึงทำให้แบบจำลองสามารถทำนายค่าประสิทธิภาพที่กระแสโหลดต่าง ๆ ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากกว่าแบบ Model T ทั้งนี้เนื่องมาจากมีการคิดรวมค่าการสูญเสียในแกนเหล็กในวงจรสมมูล



Motor 200 W



Motor 400 W

รูปที่ 5 การทำนายค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ในช่วงการทำงานจริงที่ค่ากระแสโหลดต่าง ๆ โดยใช้วงจรสมมูลทั้ง 3 ลักษณะ

5. บทสรุป

การพิจารณาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสขณะใช้งานจริงในระบบจำเป็นจะต้องทราบค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์ โดยจะต้องติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอเตอร์ซึ่งเป็นสิ่งที่สามารถกระทำได้ แต่จะเห็นได้ว่ามีความยุ่งยากมาก ไม่สะดวกและเสียค่าใช้จ่ายสูง บทความนี้นำเสนอแนวทางใหม่สำหรับการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะใช้งานที่มีความแม่นยำพอสมควร สะดวกและมีข้อดีได้เปรียบในทางปฏิบัติคือเสียค่าใช้จ่ายต่ำ เนื่องจากไม่ต้องหยุดระบบและไม่ต้องติดตั้งเครื่องมือวัดพิเศษ ใช้เพียงข้อมูลพื้นฐานทางไฟฟ้าและทางกลที่สามารถวัดได้ตามปกติทั่วไป วิธีการประมาณค่าประสิทธิภาพที่นำเสนอนี้ใช้หลักการของวงจรสมมูล โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะได้มาจากการใช้ข้อมูลที่วัดได้ร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบเจนเนติกอัลกอริธึม ซึ่งได้มีการนำเสนอแนวทางการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของการสูญเสียในแกนเหล็กเพื่อเพิ่มความแม่นยำของการประมาณค่าประสิทธิภาพ จากผลการทดสอบโดยการใช้ข้อมูลเพียง 1 ชุดพบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวงจรสมมูลทั้ง 3 ลักษณะนั้นมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจริงไม่เกิน 2 % ณ จุดใช้งานนั้น ๆ ซึ่งทำให้สามารถนำวิธีการนี้ไปประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แต่ละตัวที่ใช้งานอยู่จริงในระบบได้อย่างสะดวก นอกจากนี้วิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้งานสำหรับการทำนายค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะใช้งานที่กระแสโหลดต่าง ๆ ได้ ในกรณีที่มีข้อมูลที่วัดได้จากมอเตอร์ขณะทำงาน 2 ชุด และผลจากการทำนายด้วยวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 % เช่นกัน จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการจัดการด้านพลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมได้

เอกสารอ้างอิง

[1] E. R. Collins Jr., P. B. Boyd, A. O. Smith, "Improved Method for Determining the Equivalence Circuit Parameters for Single-Phase Induction Motor Models", *Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE Conference Record*, Vol. 1, pp. 390-397, Oct. 1993.

[2] C. Van der Merwe, F. S. Van der Merwe, "A Study of Methods to Measure the Parameters of Single-phase Induction Motors", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 10, No. 2, pp. 248-253, June 1995.

[3] T. Phumiphak, C. Chat-uthai, "Estimation of Induction Motor Parameters based on Field Test Coupled with Genetic Algorithm", *Proc. of International Conference on Power System Technology, PowerCon 2002*, Vol. 2, Chengdu, pp. 1199-1203, Oct. 2002.

อิทธิฤทธิ์ สุนทรโกวิท สำเร็จการศึกษา วศ.บ. (ไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นนักศึกษาในระดับปริญญาโท สจล. สนใจทำงานวิจัยในด้าน electrical machines, transformer และ optimization

ชัยภูมิ ฉัตรอุทัย สำเร็จการศึกษา คศ.บ. และ วศ.ม. (ไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ Ph.D. (Electrical Eng.) จาก Imperial College, U. of London, U.K. ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ทำงานวิจัยในด้าน electrical machines, finite element และ optimization

ธนบัตร ภูมิภาค สำเร็จการศึกษา คศ.ม. (ไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ทำงานวิจัยในด้าน electrical machines, finite element, optimization และ drives

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายอิษฎา อุบลไทรย์ เกิดเมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ.2525 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้