

วิธีการแบบไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพ
มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานโดยใช้ข้อมูลจากการวัด

LOW-INTRUSIVE METHOD FOR INDUCTION MOTOR
FIELD EFFICIENCY ESTIMATION USING ON-SITE MEASUREMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2557

KMITL-2014-EN-D-018-051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOW-INTRUSIVE METHOD FOR INDUCTION MOTOR
FIELD EFFICIENCY ESTIMATION USING ON-SITE MEASUREMENT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMITL-2014-EN-D-018-051 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วิธีการแบบไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน
โดยใช้ข้อมูลจากการวัด

Thesis Title Low-intrusive Method for Induction Motor Field Efficiency Estimation using
On-site Measurement

นักศึกษา นายปยุตภัทร ภูมิภาค


รหัสประจำตัว 50060004

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-D-018-051

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.ดร.ไพบุลย์	นาคมหาชลาสินธุ์	
รศ.ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เวลา 15.00-17.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า (ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ณ บดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิธีการแบบไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานโดยใช้ข้อมูลจากการวัด
นักศึกษา	นายบุญยภัทร ภูมิภาค
รหัสประจำตัว	50060004
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรรุทัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แนะนำเสนอวิธีการใหม่ที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานจริงโดยไม่มีขั้นตอนที่ซับซ้อน วิธีการนี้ใช้พื้นฐานวงจรสมมูลที่ปรับปรุงซึ่งแสดงถึงต้นแบบความสูญเสียของมอเตอร์ วิทยานิพนธ์นี้อธิบายรายละเอียดของการใช้ข้อมูลจากการวัดในขณะมอเตอร์ทำงาน (ข้อมูลทางไฟฟ้าและความเร็ว) ร่วมกับวิธีการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัวซึ่งใช้หลักการของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม (วิธีเชิงพันธุกรรมและแบบกลุ่มอนุภาค) เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะใช้งานที่แต่ละภาระทางกล ในวิธีการนี้จะมีขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบเพื่อประมวลผลหาขอบเขตของพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดของมอเตอร์ รวมทั้งมีการนำเสนอวิธีการวัดความเร็วแบบไร้ตัวตรวจจับโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์อีกด้วย วิธีการใหม่นี้สามารถพิสูจน์ยืนยันความแม่นยำโดยการนำผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทั้งที่ขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์และอินเวอร์เตอร์ นอกจากนั้นแล้ววิทยานิพนธ์นี้ยังกล่าวถึงการนำเอาวิธีการนี้ไปใช้กับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้ข้อมูลจากการวัดในขณะทำงาน ซึ่งใช้หลักการของวงจรสมมูลที่พัฒนาขึ้นใหม่โดยอ้างอิงตามทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้นี้มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดสอบภาระทางกลตลอดในช่วงการใช้งานที่กว้าง (ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 %) ประโยชน์ของวิทยานิพนธ์นี้คือ วิธีการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัวนี้สามารถนำไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแรงดันต่ำชนิดห่อหุ้มฉนวนมิดชิดได้หลากหลายพิกัดและสภาพภาระทางกล และมีการนำเสนอวงจรสมมูลปรับปรุงที่มีการเพิ่มพารามิเตอร์ของความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกลและความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม เพื่อให้การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์มีความแม่นยำยิ่งขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการใหม่ที่ไม่ยุ่งยากนี้สามารถที่จะให้ข้อมูลที่มีประโยชน์อย่างมากสำหรับการตรวจสอบและบริหารจัดการพลังงาน

Thesis	Low-intrusive Method for Induction Motor Field Efficiency Estimation Using On-site Measurement
Student	Mr. Punyaphat Phumiphak
Student ID.	50060004
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chaiwut Chat-Uthai

ABSTRACT

This thesis presents a novel low-intrusive method for estimating field efficiency of induction motors which focuses on a simple means without a high intrusion process. This approach is based on the modified equivalent circuit that represents the estimated loss model of motor. This thesis fully describes the use of on-site measurements data (electrical data and speed) incorporated with the adaptive optimal design (AOD) algorithm based on optimization process (the genetic algorithm and particle swarm optimization) in order to evaluate the optimal motor parameters for estimating motor field efficiency at each measured load. This algorithm includes the feasible boundary of design variables process for evaluating the suitable boundaries of motor parameters depending on its power rating. In addition, the sensorless speed measurement scheme using implementation of motor current signature analysis (MCSA) is presented. This proposed method has been verified by the experimental results of both sinusoidal and inverter fed three-phase induction motors. Furthermore, this thesis also proposes field efficiency estimation method for single-phase induction motors using data from on-site measurement. The uses of improved equivalent circuit models based on double-revolving-field theory are described. The results indicate that the agreement between the estimated efficiencies and the load test efficiencies (absolute error 3%) validates the proposed method over a wide range of load conditions. The main contributions of this thesis are that the AOD algorithm makes it possible to apply this method for TEFC low voltage motors of various ratings or loading conditions, and the stray load loss as well as the friction and windage loss parameters are initiated into conventional equivalent circuit in order to achieve an accurate estimated efficiency. Therefore, this simple procedure can provide the useful information for energy audit and management.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ชยวุฒิ ฉัตรอุทัย ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณนักศึกษาที่ห้องปฏิบัติการเครื่องจักรไฟฟ้าและเจ้าหน้าที่ทุกคน ที่ให้การสนับสนุนในงานวิจัยนี้

สุดท้ายต้องขอขอบคุณน้องสาวของข้าพเจ้า คุณถาวรีย์ ยวงพานิช ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

บุญภัทร ภูมิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
บทที่ 2 วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	10
2.2.1 วิธีการป้ายพิกัด	10
2.2.2 วิธีการวัดค่ากระแสไฟฟ้า.....	11
2.2.3 วิธีการวัดค่าสลลิป	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัด IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 วิธีการวงจรสมมูล	12
2.2.5 วิธีการแยกส่วนค่าสูญเสีย.....	13
2.2.6 การหาแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ.....	13
2.2.7 การวัดแรงบิดที่เพลลา.....	15
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.4 บทสรุป.....	19
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	20
3.1 บทนำ.....	20
3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	20
3.2.1 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์.....	26
3.2.2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....	31
3.3 หลักการออกแบบที่เหมาะสม.....	37
3.3.1 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม	40
3.3.2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	42
3.3.3 การหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค	44
3.4 การหาความเร็วโดยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์	47
3.5 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน.....	58
3.6 บทสรุป.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัด V ว่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งาน	
เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์.....	61
4.1 บทนำ.....	61
4.2 วงจรสมมูลที่ปรับปรุงต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	62
4.3 ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ.....	68
4.4 การออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว.....	72
4.5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์.....	75
4.5.1 การประเมินพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	75
4.5.2 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะใช้งาน	94
4.6 การใช้วิธีการ AOD ร่วมกับการหาความเร็วของมอเตอร์ด้วย MCSA.....	101
4.7 บทสรุป.....	108
บทที่ 5 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งาน	
เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....	110
5.1 บทนำ.....	110
5.2 วงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....	110
5.3 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์	
โดยวิธีการ AOD	121
5.4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์.....	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดVIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5 การใช้วิธีการ AOD ร่วมกับการหาความเร็วของมอเตอร์ด้วย MCSA	
เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....	139
5.6 การประยุกต์ใช้งานกับมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์.....	148
5.7 บทสรุป.....	152
บทที่ 6 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งาน	
เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์.....	154
6.1 บทนำ.....	154
6.2 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่.....	155
6.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	157
6.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส.....	158
6.3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า.....	160
6.4 วงจรสมมูลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	163
6.4.1 วงจรสมมูลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส.....	163
6.4.2 วงจรสมมูลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า.....	168
6.5 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	172
6.6 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	177
6.6.1 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	181
6.6.2 การประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	186
6.7 บทสรุป.....	191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตี VII ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 บทสรุป.....	193
7.1 บทนำ.....	193
7.2 สรุปผลการวิจัย	193
7.2.1 วิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	194
7.2.2 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งาน เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์.....	194
7.2.3 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งาน เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....	196
7.2.4 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งาน เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์.....	197
7.3 การประหยัดพลังงานและระยะเวลาการคืนทุน.....	200
7.4 ข้อเสนอแนะ.....	204
เอกสารอ้างอิง.....	205
ภาคผนวก ก.....	218
ภาคผนวก ข.....	226
ประวัติผู้เขียน.....	238

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VIII ึ่งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดโดยตรงกับวิธีการวิเคราะห์ สัญญาณกระแสของมอเตอร์กรณีที่แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายเป็นไซน์.....	53
3.2 การเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW 6 ขั้วแม่เหล็ก ที่ได้จากการวัดโดยตรงกับวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ กรณีเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....	56
3.3 การเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก ที่ได้จากการวัดโดยตรงกับวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ กรณีเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....	57
4.1 ข้อมูลของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้.....	70
4.2 ข้อมูลเริ่มต้นของขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม.....	73
4.3 ข้อมูลจากป้ายพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	76
4.4 ขอบเขตที่เป็นไปได้ของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลที่ปรับปรุง.....	77
4.5 ข้อมูลทางไฟฟ้าและความเร็วจากการวัดในขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 พิกัด.....	78
4.6 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW, 6 ขั้วแม่เหล็ก.....	80
4.7 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก.....	81
4.8 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5.5 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก.....	82
4.9 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 7.5 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก.....	83
4.10 การเปรียบเทียบการไหลของกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW, 6 ขั้วแม่เหล็ก.....	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 การเปรียบเทียบการไหลของกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก.....	86
4.12 การเปรียบเทียบการไหลของกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5.5 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก.....	87
4.13 การเปรียบเทียบการไหลของกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 7.5 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก.....	88
4.14 ความต้านทานไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์โดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 พิกัด.....	90
4.15 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพารามิเตอร์.....	92
4.16 การเปรียบเทียบกำลังทางกลที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับการวัดโดยตรง.....	95
4.17 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับการทดสอบ.....	96
4.18 ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อ้างอิงผลการทดสอบจากหน่วยงานภายนอก.....	97
4.19 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 11 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก.....	98
4.20 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 75 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก.....	99
4.21 การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW โดยใช้วิธี AOD (GA)-MCSA.....	102
4.22 การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW โดยใช้วิธี AOD (GA)-MCSA.....	102
4.23 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW โดยใช้ AOD (GA)-MCSA.....	103
4.24 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW โดยใช้ AOD (GA)-MCSA.....	104
4.25 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ 2.2 kW ที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีต่าง ๆ.....	106
4.26 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ 4.0 kW ที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีต่างๆ.....	107
5.1 ข้อมูลของวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้.....	122
5.2 ข้อมูลเริ่มต้นของขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม.....	125
5.3 ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากป้ายพิกัด.....	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.4 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW, 4-pole เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....	130
5.5 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW, 4-pole เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....	131
5.6 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW ที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ.....	132
5.7 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW ที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ.....	133
5.8 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW ที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ.....	136
5.9 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW ที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ.....	137
5.10 ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากป้ายพิกัด.....	139
5.11 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW 6 ขั้วแม่เหล็ก เมื่อความเร็วของมอเตอร์ได้จากการคำนวณโดยใช้เทคนิค MCSA.....	140
5.12 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก เมื่อความเร็วของมอเตอร์ได้จากการคำนวณโดยใช้เทคนิค MCSA.....	141
5.13 แรงบิดที่ได้จากวิธีการ AOD (MCSA) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW.....	143
5.14 ประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการ AOD (MCSA) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW.....	144
5.15 แรงบิดที่ได้จากวิธีการ AOD (MCSA) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 4.0 kW.....	146
5.16 ประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการ AOD (MCSA) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW.....	147
5.17 ป้ายพิกัดมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ.....	148
5.18 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ขณะใช้งาน.....	151
6.1 ข้อมูลของพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับวิธีเชิงพันธุกรรม.....	173
6.2 ข้อมูลของขอบเขตตัวแปรออกแบบ.....	174

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้ง **XI** อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.3	ป้ายพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....178
6.4	ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส.....179
6.5	ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า.....180
6.6	การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส.....182
6.7	การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า.....183
6.8	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส.....187
6.9	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า.....188
7.1	การเปรียบเทียบกับวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบต่างๆ.....199

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XII ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของการประเมินค่าประสิทธิภาพด้วยวิธีการต่างๆ.....	12
3.1 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	22
3.2 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยอ้างอิงหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	23
3.3 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ต่อเฟส.....	23
3.4 วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ต่อเฟส.....	25
3.5 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์.....	26
3.6 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std 112.....	27
3.7 การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	28
3.8 หลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	32
3.9 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันที่ดับเบิลยูเอ็ม.....	33
3.10 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์.....	33
3.11 วงจรสมมูลที่ความถี่ต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟส.....	34
3.12 ขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม.....	38
3.13 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม.....	39
3.14 คำตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$	41
3.15 กระบวนการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	42
3.16 ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	43
3.17 ขั้นตอนการทำงานของการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค.....	47
3.18 การพิจารณาหาความถี่ของโรเตอร์.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XIII อังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19	การหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์.....51
3.20	กราฟโดเมนความถี่และโดเมนเวลาของสัญญาณกระแสที่ได้จากการวัดโดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์กรณีที่แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายเป็นไซน์.....52
3.21	กราฟโดเมนความถี่และโดเมนเวลาของสัญญาณกระแสที่ได้จากการวัดโดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์กรณีเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW, 6 ขั้วแม่เหล็ก ที่แรงบิด 83.40 % ของพิกัด.....54
3.22	กราฟโดเมนความถี่และโดเมนเวลาของสัญญาณกระแสที่ได้จากการวัดโดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์กรณีเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก ที่แรงบิด 85.05 % ของพิกัด.....55
3.23	ขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างง่าย.....59
4.1	ต้นแบบความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....63
4.2	วงจรสมมูลที่ปรับปรุงต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....63
4.3	ความสัมพันธ์ของต้นแบบความสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....69
4.4	ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ.....69
4.5	ขั้นตอนของการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว (AOD)72
4.6	ขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม.....74
4.7	วงจรการทดสอบจำลองการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....76
4.8	การรู้เข้าหาค่าตอบ.....93
4.9	วงจรการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ XIV อังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	วงจรมุมลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม.....112
5.2	วงจรมุมลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....116
5.3	ต้นแบบความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....117
5.4	ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้.....124
5.5	ขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม.....126
5.6	ขั้นตอนของการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว.....127
5.7	วงจรถดสอบภาระทางกลเมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....129
5.8	การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW และ 4.0 kW เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....134
5.9	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW และ 4.0 kW เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....138
5.10	มอเตอร์สำหรับระบายอากาศในอุโมงค์ของระบบรถไฟใต้ดิน.....149
5.11	การวัดปริมาณทางไฟฟ้าใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า.....149
6.1	การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุนคู่.....155
6.2	วงจรมุมลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวอ้างอิงจากทฤษฎีสถนามแม่เหล็กหมุนคู่.....156
6.3	วงจรถดสอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....157
6.4	วงจรมุมลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า.....160
6.5	วงจรมุมลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส.....164
6.6	วงจรมุมลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า.....169

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงข้างต้นของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.7	วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งาน.....173
6.8	ขั้นตอนของการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งาน.....174
6.9	ขั้นตอนกระบวนการหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม.....176
6.10	วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....178
6.11	การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส.....184
6.12	การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า.....185
6.13	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส.....189
6.14	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า.....190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ **XVI** ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การประเมินประสิทธิภาพที่มีความแม่นยำของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้นกระทำได้ยากมาก เนื่องจากจำเป็นต้องถอดมอเตอร์ออกจากการใช้งานเพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ หากการถอดและการติดตั้งมอเตอร์ มีค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้เวลามาก และส่งผลกระทบต่อระบบการผลิตในอุตสาหกรรม จะทำให้เกิดความยากลำบากต่อการประเมินประสิทธิภาพที่แม่นยำของมอเตอร์นั้น วิธีการประเมินประสิทธิภาพแบบทั่วไป เช่น วิธีการใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัด (nameplate method) วิธีการวัดค่าสลลิป (slip method) วิธีการใช้ค่ากระแส (current method) จะมีความคลาดเคลื่อนสูง [1] ไม่เหมาะกับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ต้องการข้อมูลที่แม่นยำต่อการตัดสินใจดำเนินการบางอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น การตัดสินใจเกี่ยวกับการบริหารด้านพลังงาน หรือการตัดสินใจลงทุนเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ประเด็นทางด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจ โดยเฉพาะทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งมีมอเตอร์เหนี่ยวนำใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากตั้งแต่ขนาดไม่กี่กิโลวัตต์จนถึงหลายร้อยกิโลวัตต์ ทั้งการขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายเป็นไซน์และอินเวอร์เตอร์ (inverter) การใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูงเป็นวิธีการหนึ่งสำหรับการประหยัดพลังงาน แต่การตัดสินใจลงทุนเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อทดแทนมอเตอร์เดิมที่มีประสิทธิภาพต่ำจะต้องมีข้อมูลที่เชื่อถือได้ในการพิจารณา ดังนั้นวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เดิมขณะที่ใช้งานจริงจะต้องมีความแม่นยำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นจริงในการตัดสินใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ให้มีความแม่นยำ สะดวก และประหยัด เพื่อใช้ตรวจสอบมอเตอร์ขณะใช้งานจริง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะที่ใช้งาน โดยใช้วิธีการเชิงเลขในการหาค่าที่เหมาะสม (numerical optimization method) ของพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2] - [5] โดยการใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดทางด้านไฟฟ้าและความเร็วของมอเตอร์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้คือการนำเสนอวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งานจริง (on-site audit) ทั้งขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายเป็นไซน์และอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเน้นเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบแรงดันต่ำ (low voltage induction motor) ชนิดห่อหุ้มฉนวนมิดชิด (total enclosed fan cooled, TEFC) ที่อ้างอิงตามการออกแบบ A (design A) และ ออกแบบ B (design B) [6] เท่านั้น โดยการใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัดร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้า ความถี่ และความเร็วรอบมอเตอร์ขณะใช้งาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการนี้มีความสะดวก และประหยัด

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานจริงโดยวิธีทั่ว ๆ ไปจะใช้วิธีการที่สามารถนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้มาประเมินประสิทธิภาพ เช่น วิธีการใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัด (nameplate method) วิธีการวัดค่าสลลิป (slip method) วิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า (current method) แต่วิธีการดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากเป็นค่าโดยประมาณจากผู้ผลิต และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมอเตอร์นั้นถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์ จะทำ

ให้ข้อมูลที่ป้ายพิกัดจะไม่สามารถใช้อ้างอิงในการคำนวณโดยวิธีทั่วไปได้ ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลาดเคลื่อนอย่างมาก อย่างไรก็ตามในการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์อาจจะใช้วิธีการนำมอเตอร์เข้าทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบแบบวิธีวัดแรงบิดที่เพลา (shaft torque method) หรือการทดสอบแบบไม่มีภาระ (no-load test) และแบบยึดโรเตอร์ (blocked-rotor test) ในการดำเนินการในลักษณะนี้อาจจะพบกับปัญหามากมาย เช่น มอเตอร์นั้นจำเป็นจะต้องใช้งานอยู่ตลอดเวลา มอเตอร์มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดความลำบากหรือยุ่งยากในการถอดหรือติดตั้ง เป็นต้น ดังนั้นในการพิจารณาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ ข้อมูลที่ได้มาจะต้องมีความแม่นยำสูงเพื่อใช้ในการตัดสินใจดำเนินการอย่างหนึ่งอย่างใดกับมอเตอร์ตัวนั้น ๆ จึงทำให้ต้องพัฒนาวิธีการที่สามารถประเมินประสิทธิภาพได้อย่างแม่นยำ สะดวก และประหยัด

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ เหนียวนาขณะใช้งานจริงโดยใช้ข้อมูลจากการวัด ซึ่งมีแนวคิดพื้นฐานในการใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์ เหนียวนาที่ปรับปรุง โดยมีการพิจารณาถึงความสูญเสียจริงที่เกิดภายในมอเตอร์ ที่ได้นำเสนออยู่ในรูปของ “ต้นแบบความสูญเสีย (losses model)” เพื่อให้มีความแม่นยำ และจากแนวความคิดที่จะทำให้วิธีการประเมินมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก ดังนั้นจะต้องไม่มีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ หรือค่าความสูญเสียใด ๆ ของมอเตอร์เหนียวนา แต่จะใช้วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุง โดยใช้วิธีการเชิงเลขในการหาค่าที่เหมาะสมร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะใช้งาน

เนื่องจากมอเตอร์เหนียวนาสามเฟสแบบแรงดันต่ำที่อ้างอิงตามการออกแบบ A และ ออกแบบ B มีหลายพิกัด ตั้งแต่ 0.75 kW – 750 kW ดังนั้นไม่ว่าพิกัดมอเตอร์จะมีขนาดเท่าไรก็ตาม วิธีการหาค่าที่เหมาะสมจะต้องสามารถประเมินหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงได้ เพื่อคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ ซึ่งประเด็นนี้จะเป็นจุดด้อยของวิธีการหาค่าที่เหมาะสม เนื่องจากทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนพิกัดมอเตอร์หรือบริษัทผู้ผลิต จะต้องมีการกำหนดขอบเขตของตัวแปร

ออกแบบใหม่ทุกครั้ง ซึ่งการกำหนดขอบเขตจะต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ซึ่งถ้ามีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นแจ้งระเบียบขั้นตอนการนำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดขอบเขตที่ไม่เหมาะสม อาจจะได้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ไม่เป็นจริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการ “การออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว (adaptive optimal design : AOD)” โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

1. ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ (feasible boundary of design variables process) เป็นกระบวนการประมวลผลเพื่อหาขอบเขตของตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมกับมอเตอร์พิกัดต่าง ๆ
 2. ขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม (optimal design variables process) เป็นกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุง โดยใช้ขอบเขตที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ร่วมกับข้อมูลของค่าที่วัดได้จริงในขณะที่มอเตอร์ใช้งานอยู่ คือ แรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้า ความถี่ และความเร็วมอเตอร์ (จากการวัดโดยตรงหรือวัดโดยอ้อม)
- เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงแล้ว จะนำไปคำนวณเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสต่อไป

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้คือ การนำเสนอวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานจริงโดยใช้ข้อมูลจากการวัด มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 % โดยการพัฒนาวงจรสมมูลที่ปรับปรุงจากพื้นฐานต้นแบบความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อให้สามารถแสดงพฤติกรรมจริงของมอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง และนำเสนอแนวทางการพัฒนาวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงให้สามารถใช้งานได้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำแรงดันต่ำหลากหลายพิกัด ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอเป็น 3 กรณี โดยแต่ละกรณีมีขอบเขตในการวิจัยดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 วิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์ จะทำการเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบมีภาระ ที่ภาระทางกลต่าง ๆ เพื่อดูความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของวิธีการที่นำเสนอ โดยจะแบ่งเป็น 2 เงื่อนไข ได้แก่ กรณีที่สามารถวัดความเร็วของมอเตอร์ได้โดยตรง จะทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 4 พิกัดในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ พิกัด 2.2 kW 6 ขั้วแม่เหล็ก, 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก, 5.5 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 7.5 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก และใช้ข้อมูลอ้างอิงผลการทดสอบจากหน่วยงานภายนอกอีก 2 พิกัด ได้แก่ 11 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก [7] และ 75 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก [8] และในกรณีที่ไม่สามารถวัดความเร็วของมอเตอร์ได้โดยตรง จะใช้วิธีการหาความเร็วโดยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ (motor current signal analysis) [9] โดยจะทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 2 พิกัดในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ พิกัด 2.2 kW 6 ขั้วแม่เหล็ก และ 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก

กรณีที่ 2 วิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ จะทำการเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบแบบมีภาระ ที่ความถี่ต่างๆ และภาระทางกลต่าง ๆ เพื่อดูความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของวิธีการที่นำเสนอ โดยจะแบ่งเป็น 2 เงื่อนไข ได้แก่ กรณีที่สามารถวัดความเร็วของมอเตอร์ได้โดยตรง จะทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 2 พิกัดที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ พิกัด 2.2 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก และในกรณีที่ไม่สามารถวัดความเร็วของมอเตอร์ได้โดยตรง จะใช้วิธีการหาความเร็วโดยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์โดยจะทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 2 พิกัดที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ พิกัด 2.2 kW 6 ขั้วแม่เหล็ก และ 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก ต่อจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อให้เห็นถึงความแม่นยำถูกต้องในการนำไปใช้งาน ในตอนสุดท้ายจะนำวิธีการนี้ไปประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟ

ใต้ดินขนาด 108 kW ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์เช่นกัน โดยดำเนินการเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางกล จากนั้นนำไปประมวลผลภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดเดียวกันทั้งหมดเพื่อผลการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานจริงในเชิงสถิติ ผลลัพธ์ของกำลังทางกลที่ได้จะนำเสนอเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ (variable speed drive; VSD) และที่ได้จากวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า

กรณีที่ 3 เป็นการนำเสนอวงจรสมมูลที่พัฒนา (3 ต้นแบบ) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดี่ยวทั้งแบบแยกเฟส (split-phase) และแบบคาปาซิเตอร์สองค่า (two-value capacitor) เพื่อให้วงจรสมมูลที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถแสดงพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงของมอเตอร์ขณะทำงาน และสามารถนำมาใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดี่ยวขณะใช้งานได้ โดยทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส 2 พิกัด ได้แก่ พิกัด 0.2 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 0.4 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก และมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่า 2 พิกัด ได้แก่ พิกัด 0.75 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 1.5 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกทำการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์ การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ วงจรสมมูลที่ปรับปรุงกรณีแหล่งจ่ายเป็นไซน์ การออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว และการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ ในส่วนที่สองทำการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ การไหลของกำลังมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ และวงจรสมมูลที่ปรับปรุงกรณีขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ สำหรับส่วนที่สาม เป็นการพัฒนางจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดี่ยวทั้งแบบแยกเฟสและแบบคาปาซิเตอร์สองค่า ให้สามารถแสดงพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงของมอเตอร์ขณะทำงาน เพื่อนำมาใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดี่ยวขณะใช้งาน

ขั้นตอนการศึกษาในงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถนำเสนอได้ดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นได้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บทที่ 2 กล่าวถึงแนวคิด หรือผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
- บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แก่ หลักการทำงานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส วงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์ และขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ความรู้เบื้องต้นของวิธีการหาค่าที่เหมาะสม การหาความเร็วโดยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ และการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสขณะใช้งาน
- บทที่ 4 เป็นการนำเสนอวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์ โดยนำเสนอวงจรสมมูลปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ วิธีการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัวซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ และขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม การทดสอบวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ด้วยวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการทดสอบแบบมีภาระ วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสร่วมกับการหาความเร็วโดยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ
- บทที่ 5 เป็นการนำเสนอวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยนำเสนอวงจรสมมูลปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ การออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัวเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ การทดสอบวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ด้วยวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการทดสอบแบบมีภาระ วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อ

ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ร่วมกับการหาความเร็วโดยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ

บทที่ 6 กล่าวถึงวงจรสมมูลที่อ้างอิงตามทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนรอบคู่ โดยจะนำเสนอมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสและแบบคาปาซิเตอร์สองค่า แนวคิดในการพัฒนางจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวทั้งสองประเภท เพื่อให้วงจรสมมูลที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถแสดงพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงของมอเตอร์ขณะทำงาน และนำมาใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งานได้ และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ

บทที่ 7 เป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะโดยสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากทุกกรณีที่ทำ การประเมินประสิทธิภาพโดยวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งมีความถูกต้องแม่นยำในการนำไปใช้งานจริงกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและเฟสเดียว การคำนวณมูลค่าการประหยัดและระยะเวลาการคืนทุน เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจการลงทุน และข้อเสนอแนะในการตรวจวัดรวมทั้งการนำไปใช้งานกับมอเตอร์ในระบบอื่น ๆ

บทที่ 2

วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1 บทนำ

ปัจจุบันนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่จะมีการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เนื่องจากที่พิกัดเดียวกันจะมีราคาถูก ขนาดเล็ก มีต้นทุนการดูแลรักษาต่ำ ยิ่งในปัจจุบันพลังงานเริ่มมีต้นทุนในการผลิตที่สูงขึ้น โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากแหล่งเชื้อเพลิงเริ่มหายากและมีราคาที่สูงขึ้น ดังนั้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ประเด็นทางด้าน การประหยัดพลังงานไฟฟ้าเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจ โดยเฉพาะด้านอุตสาหกรรม เริ่มที่จะให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพหรือการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่จะนำไปจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ปัญหาที่น่าสนใจคือ ทำอย่างไรจึงจะทราบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะที่ใช้งานจริงโดยไม่ยุ่งยาก ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่แท้จริงนี้จะมีผลอย่างมากต่อการตัดสินใจเกี่ยวกับการบริหารด้านพลังงานหรือการตัดสินใจลงทุน

สำหรับวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ได้รับความสนใจและได้มีการพัฒนาวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ซึ่งมีมากกว่า 20 วิธี [10] โดยแต่ละวิธีการจะมีความสอดคล้องระหว่างความแม่นยำกับระดับความยุ่งยากในการใช้งานดังนี้ คือ วิธีการใด ที่มีความแม่นยำสูง ก็จะมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนมาก ส่วนวิธีการใดที่มีความแม่นยำต่ำ ก็จะมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อนน้อย ซึ่งเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยหรือวิศวกร ได้พยายามปรับปรุงหรือพัฒนาหาวิธีการประเมินประสิทธิภาพที่มีขั้นตอนหรือกระบวนการที่มีความยุ่งยากน้อย ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ต่ำ แต่มีความแม่นยำสูง [1] เนื่องจากค่าประสิทธิภาพที่แม่นยำจะส่งผลต่อการตัดสินใจในการลงทุน

เกี่ยวกับมอเตอร์ หรือระยะเวลาในการคืนทุนที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 กลุ่ม ได้แก่ วิธีการใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัด (nameplate method) วิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า (current method) วิธีการวัดค่าสลลิป (slip method) วิธีการวงจรสมมูล (equivalent circuit method) วิธีการแยกส่วนค่าสูญเสีย (segregated loss method) วิธีการหาแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ (air gap torque method) และการวัดค่าแรงบิดที่เพลลา (shaft torque method)

2.2.1 วิธีการใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัด

วิธีการนี้เป็นวิธีที่มีความยุ่งยากน้อยที่สุด [11], [12] ให้การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เนื่องจากอาศัยข้อมูลของป้ายพิกัดมอเตอร์ ซึ่งวิธีการนี้จะกำหนดให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์มีค่าคงที่และเท่ากับที่พิกัดของมอเตอร์ แต่ในความเป็นจริงประสิทธิภาพจะมีค่าไม่คงที่เมื่อภาระทางกลเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าประสิทธิภาพที่ภาระทางกล 75%, 80, 87% หรือ 95% ของพิกัดมอเตอร์จะมีค่าไม่เท่ากับที่ 100% พิกัด

นอกจากนั้นข้อมูลของมอเตอร์ในป้ายชื่อจะขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ผู้ผลิตอ้างอิง ซึ่งในปัจจุบันมีด้วยกันหลายมาตรฐาน เช่น National Electrical Manufacturers Association (NEMA) [6] อ้างอิงการทดสอบตาม IEEE Standard 112 [13], Japanese Electrotechnical Committee (JEC)[14], Canadian Standards Association (CSA) [15] และ International Electrotechnical Commission (IEC) [16] โดยแต่ละมาตรฐานจะมีขั้นตอนและข้อกำหนดที่แตกต่างกัน ทำให้ข้อมูลประสิทธิภาพของมอเตอร์ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งสามมาตรฐานมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นวิธีการป้ายพิกัดจึงเหมาะกับการใช้สำหรับประมาณค่าประสิทธิภาพเพื่อให้เห็นภาพโดยรวมเท่านั้น ไม่เหมาะสำหรับการใช้สำหรับการตรวจสอบพลังงาน

2.2.2 วิธีกรใช้ค่ากระแสไฟฟ้า

วิธีกรใช้ค่ากระแสเป็นการเปรียบเทียบหาอัตราส่วนระหว่างกระแสไฟฟ้าในขณะใช้งานมอเตอร์ ($I_{Measured}$) กับกระแสไฟฟ้าที่พิกัด (I_{fl}) ที่ได้จากป้ายพิกัด สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพได้ ดังสมการ

$$\eta = \left(\frac{I_{Measured}}{I_{fl(Nameplate)}} \right) \left(\frac{P_{rated(Nameplate)}}{P_{in(Measured)}} \right) \quad (2.1)$$

ถ้าพิจารณาผลของกระแสไฟฟ้าในขณะไม่มีภาระทางกล ($I_{No-load}$) จะเพิ่มความแม่นยำให้สูงขึ้น แสดงดังนี้ [17]

$$\eta = \left(\frac{2I_{Measured} - I_{No-load}}{2I_{fl(Nameplate)} - I_{No-load}} \right) \left(\frac{P_{rated(Nameplate)}}{P_{in(Measured)}} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ P_{rated} และ P_{in} หมายถึง กำลังไฟฟ้าที่พิกัดจากป้ายพิกัด และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัด จากการพิจารณาผลของกระแสไฟฟ้าในขณะไม่มีภาระทางกล ทำให้สมการที่ (2.2) มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น แต่ในทางปฏิบัติการวัดกระแสไฟฟ้าในขณะไม่มีภาระทางกลทำได้ค่อนข้างยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรม

2.2.3 วิธีกรวัดค่าสลิป

หลักการของวิธีนี้จะการเปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าสลิปในขณะใช้งาน กับสลิปที่พิกัดของมอเตอร์ที่ได้จากป้ายพิกัด [17] - [19] ซึ่งประสิทธิภาพสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\eta = \left(\frac{N_{syn} - N_{r(Measured)}}{N_{syn} - N_{fl(Nameplate)}} \right) \left(\frac{P_{rated(Nameplate)}}{P_{in(Measured)}} \right) \quad (2.3)$$

โดยมีการชดเชยผลของแรงดันไฟฟ้า [6] ตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \left(\frac{N_{syn} - N_{r(Measured)}}{N_{syn} - N_{fl(Nameplate)}} \right) \left(\frac{P_{rated(Nameplate)}}{P_{in(Measured)}} \right) \left(\frac{V_{Measured}}{V_{Nameplate}} \right)^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ N_{syn} , N_r และ N_{fl} หมายถึง ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ความเร็วมอเตอร์ และความเร็วที่พิกัดจากป้ายพิกัด ตามลำดับ ส่วน $V_{Measured}$ และ $V_{Nameplate}$ หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวัดและแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดจากป้ายพิกัด นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาหรือปรับปรุงเพื่อให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น เช่น Upper Bound Slip Method [12]

วิธีการวัดค่าสลลิป อาจเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการประเมินประสิทธิภาพ เนื่องจากมีขั้นตอนไม่ซับซ้อน มีความแม่นยำมากกว่าวิธีการใช้ค่ากระแส แต่เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.3) และ (2.4) จะพบว่าวิธีนี้เหมาะกับกรณีที่ความถี่ใช้งานเท่ากับความถี่ที่ป้ายพิกัด และจากพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับภาระทางกลที่คงที่ ความเร็วจะลดลงเนื่องจากผลของอุณหภูมิ นอกจากนี้ความเร็วที่ป้ายพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นข้อมูลที่ได้ทางสถิติของบริษัทผู้ผลิต ซึ่งอาจจะไม่ใช่ความเร็วจริงที่พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่กำลังประเมินประสิทธิภาพ ดังนั้นจะส่งผลต่อความแม่นยำ และไม่เหมาะกับกรณีที่ไม่สามารถวัดความเร็วของมอเตอร์ได้โดยตรง เช่น มอเตอร์ของปั้มน้ำ เป็นต้น

2.2.4 วิธีการตรวจสอบรวม

วิธีการนี้จะใช้การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการคำนวณจากข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูลทางไฟฟ้าซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะได้อาจมาจากการทดสอบวัดความต้านทานขดลวด การทดสอบแบบไม่มีภาระและแบบยึดโรเตอร์ ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น นอกจากนี้ถ้าต้องการให้วิธีนี้มีความแม่นยำมากขึ้นจะต้องทำการทดสอบหา ความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล (stray-load loss) และความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม (friction and windage loss) ซึ่งจะมีความยุ่งยากมากขึ้น และไม่สะดวกในการประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะใช้

งานจริง โดยทั่วไปวิธีการนี้จะใช้การทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 112 method F/F1 [13], [6] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นยังมีการปรับปรุงเพื่อให้ความยุ่งยากน้อยลง ได้แก่ วิธีการของ Ontario Hydro Modified method F (OHMF) [20], [21] และ Nameplate Equivalent-Circuit (ORMEL96) [1], [11], [12], [20] เป็นต้น สำหรับวิธีการวงจรมูล ถือว่ามีความแม่นยำ แต่ไม่เหมาะสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะใช้งาน เพราะมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน

2.2.5 วิธีการแยกส่วนค่าสูญเสีย

วิธีการแยกส่วนค่าสูญเสียจะเป็นการประมาณค่าความสูญเสียของมอเตอร์ด้วยกัน 5 ชนิด ได้แก่ ค่าความสูญเสียของขดลวดสเตเตอร์ ค่าความสูญเสียของขดลวดโรเตอร์ ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก ความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล และความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม การหาแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ได้จากกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าลบด้วยค่าความสูญเสียทั้ง 5 แบบ ซึ่งการแยกค่าความสูญเสียจะมีความยุ่งยาก ซับซ้อน และต้องทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยทั่วไปวิธีการนี้จะใช้การทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std. 112 method E/E1 นอกจากนี้ยังได้มีการปรับปรุงวิธีการเพื่อให้ความยุ่งยากน้อยลง ได้แก่ วิธีการของ Ontario Hydro Modified method E (OHME) [1], [11], [12], [21] เป็นต้น เช่นเดียวกับวิธีการวงจรมูล วิธีการแยกส่วนค่าสูญเสียเป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูง แต่ไม่เหมาะสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะใช้งาน เพราะมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน

2.2.6 การหาแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ

การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ [22] ขั้นตอนแรกหาลำกำลังทางกลที่ช่องว่างอากาศ (air gap mechanical power) โดยได้จากผลคูณของแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ กับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ จากนั้นนำมาประเมินหาค่าประสิทธิภาพ วิธีการดังกล่าวนี้ทาง Oak Ridge National Laboratory (ORNL) [1] ได้นำเทคนิคการหาแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ โดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปสัญญาณของกระแสและแรงดันไฟฟ้า มาพัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจสอบมอเตอร์ เช่น การลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์, การแตกหักของตัวนำที่โรเตอร์ เป็นต้น

กำลังไฟฟ้าอินพุท (P_{input}) หาได้จากค่าเฉลี่ยของผลรวมที่ได้จากการคูณของรูปสัญญาณแรงดันเฟส v_a , v_b และ v_c กับรูปสัญญาณกระแสเฟส i_a , i_b และ i_c

$$P_{input} = \frac{\int_0^T (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) dt}{T} \quad (2.5)$$

สมการแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ

$$T_{ag} = \frac{P}{2\sqrt{3}} \left\{ \begin{array}{l} (i_A - i_B) [v_{CA} - R_1(i_C - i_A)] dt \\ -(i_C - i_A) [v_{AB} - R_1(i_A - i_B)] dt \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

เมื่อ P เป็นจำนวนขั้วแม่เหล็ก v_{AB} , v_{BC} และ v_{CA} เป็นสัญญาณแรงดันไลน์ i_A , i_B และ i_C เป็นสัญญาณกระแสไลน์ ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์พิจารณาได้จากสมการ

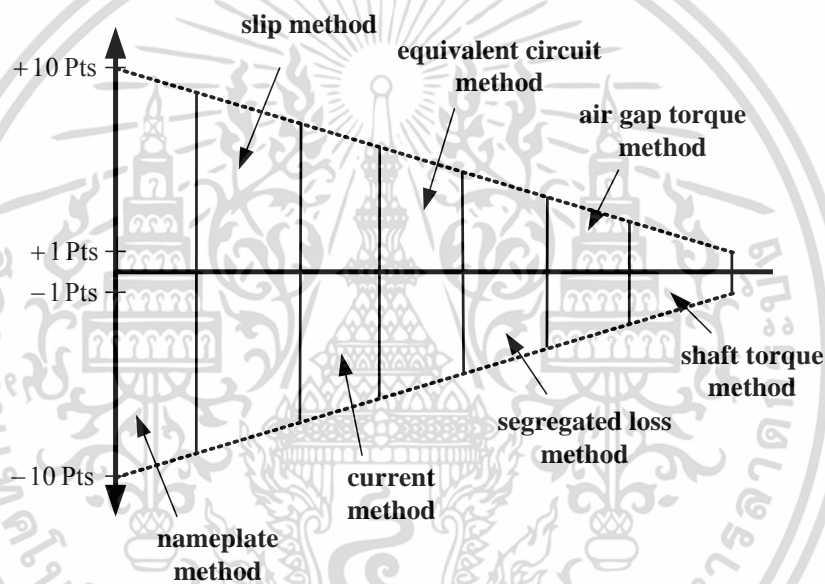
$$\eta = \frac{[T_{ag} \omega_m - P_{fr} - P_{SLL}]}{P_{input}} \quad (2.7)$$

เมื่อ P_{fr} เป็นค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านลม P_{SLL} เป็นค่าความสูญเสียแฝง และ ω_m เป็นความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์

การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีแรงบิดที่ช่องว่างอากาศเป็นหาค่ากำลังทางกลที่ช่องว่างอากาศ จากนั้นนำมาประเมินหาประสิทธิภาพ โดยจะต้องทราบค่าความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล และความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม ถึงจะทำให้มีความแม่นยำ ซึ่งขั้นตอนและกระบวนการหาที่มีความยุ่งยากเพราะต้องทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2.2.7 การวัดแรงบิดที่เพลลา

วิธีการนี้จะทำการวัดแรงบิดที่เพลลาโดยตรง โดยอาศัยตัวตรวจวัดแรงบิดทางกลโดยตรง (torque detector) ทำให้มีความแม่นยำสูงที่สุดในวิธีการหาประสิทธิภาพ [1] แต่ขั้นตอนและกระบวนการทดสอบยุ่งยากมาก เพราะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง และต้องทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง และไม่เหมาะสำหรับการประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะใช้งานจริง โดยทั่วไปวิธีการนี้จะใช้การทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 112 method B [13]



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของการประเมินค่าประสิทธิภาพด้วยวิธีการต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.1 จะพบว่าวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีขั้นตอนหรือกระบวนการที่ยุ่งยากและซับซ้อนแปรผกผันกับความแม่นยำ เช่น วิธีการประเมินประสิทธิภาพที่มีความแม่นยำ แต่จะขั้นตอนหรือกระบวนการที่ยุ่งยากและซับซ้อน ซึ่งจะไม่สอดคล้องกับความต้องการวิธีการที่จะใช้สำหรับประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งาน จะต้องมียุ่ขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อน และมีความแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการประเมินค่าประสิทธิภาพด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอพบว่า ถ้าต้องการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม ค่าประสิทธิภาพที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากวิธีการประเมินจะต้องมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่พยายามพัฒนาเทคนิคหรือวิธีการสำหรับประเมินประสิทธิภาพหรือสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งานโดยที่รบกวนระบบการผลิตให้น้อยที่สุด แต่มีความแม่นยำ

ในปี ค.ศ. 1998 - 2002 ได้มีการนำเสนองานวิจัย “In situ induction motor efficiency determination using the genetic algorithm” [23], “The use of the genetic algorithm for in situ efficiency measurement of an induction motor” [24] และ “Estimation of induction motor parameters based on field test coupled with genetic algorithm” [3] เป็นงานวิจัยที่ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithms) ในการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบบมาตรฐาน โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะใช้งาน เพื่อหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในปี ค.ศ. 2003 ได้มีการนำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ “An accurate low-cost method for determining electric motor’s efficiency for the purpose for plant energy management” [25] เป็นวิธีที่คำนวณพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลมาตรฐานโดยใช้ข้อมูลจากเงื่อนไขการทำงานที่ภาระทางกลต่างกัน 2 จุด แต่ต้องมีการวัดความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และอุณหภูมิขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งาน

ในปี ค.ศ. 2004 ได้มีการนำเสนอ “An economical method for induction motor field efficiency estimation for use in on-site energy audit and management” [26] ได้

นำเสนอวิธีการสำหรับประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้ข้อมูลที่วัดในขณะทำงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ทำงานที่ภาระทางกลต่างกัน 2 จุด และที่ภาระทางกล 1 จุด ร่วมกับวงจรสมมูลที่ปรับปรุง โดยเพิ่มพารามิเตอร์ของความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล และใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ วิธีเชิงพันธุกรรม การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ในขณะใช้งานด้วยแนวทางนี้ยังมีความยุ่งยาก ในการใช้งาน เพราะจะต้องมีการวัดความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ แต่มีค่าความคลาดเคลื่อน ประมาณ 2 % เนื่องจากวงจรสมมูลได้เพิ่มผลของความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อใช้สำหรับ ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้มีการนำเสนอในปี ค.ศ. 2005 “Energy Management Program for Use of Induction Motors Based on Efficiency Prediction” [27] เป็น แนวความคิดที่จะนำข้อมูลจากป้ายพิกัดร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสม เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของ วงจรสมมูล ซึ่งมีงานวิจัยที่ใช้แนวความคิดเดียวกันในการหาค่าพารามิเตอร์ [28], [29]

งานวิจัยในปี ค.ศ. 2006 - 2008 โดยได้มีการสรุปแนวทางการประเมินประสิทธิภาพ มอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการพัฒนาวิธีการประเมินประสิทธิภาพที่ไม่ยุ่งยาก [30] และได้พัฒนาจนได้ งานวิจัย “A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap torque with considerations of condition monitoring” [31] โดยอยู่บนพื้นฐานของวิธีการ หาแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ ซึ่งใช้ข้อมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ได้จากป้ายพิกัดและจากการวัด โดยเฉพาะความเร็วของมอเตอร์ และความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ ไม่มีการทดสอบภาระ ทางกล ไม่มีการทดสอบแบบไม่มีภาระ ซึ่งทำให้ไม่ต้องคำนวณหาความสูญเสียทางกลและความ สูญเสียจากแกนเหล็ก แต่จะทำการกำหนดค่าจากประสบการณ์ สำหรับความสูญเสียแฝงเนื่องจาก ภาระทางกลจะคำนวณโดยให้สอดคล้องกับ มาตรฐาน IEEE Std 112 method F1 [13] ทำให้วิธีการ ดังกล่าว จะต้องอาศัยประสบการณ์ และจะต้องทำการทดสอบวัดความต้านทานขดลวด ซึ่งยังมี ขั้นตอนที่ยุ่งยาก

ในปี ค.ศ. 2010 - 2011 มีงานวิจัย “Non-intrusive efficiency estimation method for energy auditing and management of in-service induction motor using bacterial foraging algorithm”[32] และ “On-site efficiency evaluation of three-phase induction motor based on particle swarm optimization” [33] ได้พัฒนาโดยอยู่บนพื้นฐานวงจรสมมูล โดยเพิ่มพารามิเตอร์ของความสูญเสียเนื่องจากการทางกล โดยให้สอดคล้องตามมาตรฐาน IEEE Std. 112 method F1 ทำให้วิธีการดังกล่าว สามารถใช้ในการตรวจสอบทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนในการซื้อมอเตอร์ใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง แต่พบว่างานวิจัยดังกล่าวยังไม่สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสม ทำให้งานวิจัยดังกล่าวยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า วิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสส่วนใหญ่จะอยู่บนพื้นฐานของวงจรสมมูลหรือต้นแบบทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ เช่น การแก้ปัญหาแบบเชิงเส้น การแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น และวิธีการหาที่เหมาะสม เป็นต้น เพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรตามที่ต้องการ ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับ

1. วงจรสมมูลหรือต้นแบบทางคณิตศาสตร์ที่สามารถแสดงพฤติกรรมจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างถูกต้อง โดยที่ขั้นตอนการได้มานั้น จะต้องไม่ยุ่งยากหรือซับซ้อน
 2. วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะต้องสามารถใช้งานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้หลากหลายพิกัด
 3. มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้สำหรับทดสอบควรมีหลายพิกัด เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำว่าสามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวางจริง
- ดังนั้นจากงานวิจัยที่ได้มีการนำเสนอพบว่า ยังไม่สามารถตอบโจทย์ปัญหาสำหรับความ

ต้องการที่จะประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน เนื่องจากยังไม่มีเอกสารเสนอวงจรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมูลหรือต้นแบบทางคณิตศาสตร์ที่สามารถแสดงพฤติกรรมจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างถูกต้อง และยังมีวิธีการแก้ปัญหาที่ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เพื่อที่จะนำไปเป็นวิธีสำหรับการประเมินพลังงานของมอเตอร์ใช้เป็นข้อมูลประกอบการลงทุน นั่นคือ วิธีการจะต้องสามารถประเมินประสิทธิภาพโดยมีความแม่นยำสูง มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก และประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

2.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี แต่ที่นิยมสำหรับใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์มีด้วยกันอยู่ 7 กลุ่ม ได้แก่ วิธีการใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัด วิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า วิธีการวัดค่าสลิป วิธีการวงจรมุม วิธีการแยกส่วนค่าสูญเสีย วิธีการหาแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ และการวัดค่าแรงบิดที่เพลลา โดยทั่วไปวิธีการใดที่มีความยุ่งยากในการใช้งานมาก จะมีความแม่นยำสูง ส่วนวิธีการใดมีความยุ่งยากน้อย ความแม่นยำก็จะต่ำ และจากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่สามารถตอบโจทย์ปัญหาสำหรับต้องการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานโดยต้องมีความแม่นยำสูง มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก และประหยัดค่าใช้จ่ายเพื่อที่จะนำไปเป็นวิธีการประเมินการใช้พลังงานของมอเตอร์ในอุตสาหกรรม สำหรับเป็นข้อมูลในการบริหารจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ

การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 บทนำ

วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีจะมีจุดเด่นและข้อจำกัดในการใช้งาน ซึ่งได้อธิบายและนำเสนออย่างพอสังเขปไปแล้วในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนของการประเมินประสิทธิภาพจะแปรผกผันกับความยุ่งยากซับซ้อนของขั้นตอน หรือกระบวนการของวิธีการประเมิน ในวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสนใจกับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีกระบวนการไม่ยุ่งยากโดยใช้พื้นฐานของวงจรสมมูล ซึ่งวิธีการที่พัฒนาขึ้นมาสามารถที่จะใช้ประเมินประสิทธิภาพหรือสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์ และกรณีที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์ได้

ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ หลักการออกแบบที่เหมาะสม การหาความเร็วมอเตอร์โดยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน

3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ในงานอุตสาหกรรมมีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีจุดเด่นหลายอย่าง อาทิเช่น ราคาถูก มีการดูแลรักษาน้อย และมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ

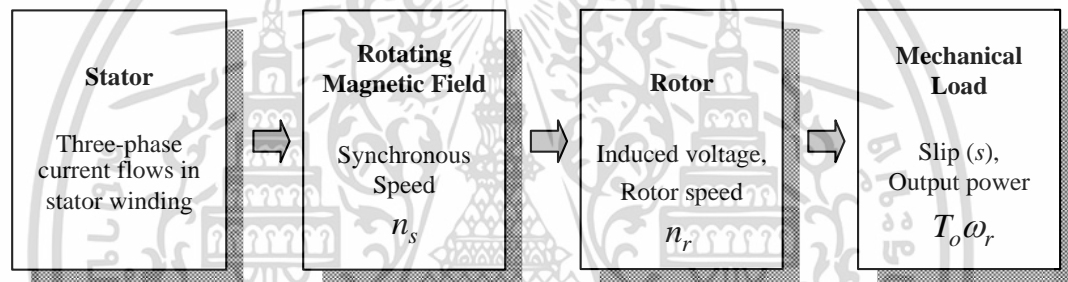
มอเตอร์ประเภทอื่น เป็นต้น สำหรับโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นมีส่วนประกอบหลักๆ คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่อยู่กับที่ หรือสเตเตอร์หรือด้านปฐมภูมิซึ่งเป็นโครงทรงกระบอกที่ทำมาจากวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กแผ่นบางๆ ซ้อนกันเป็นชั้นๆ และมีขดลวดพันอยู่ภายในร่องของมัน ขดลวดแต่ละขดนั้นจะพันแตกต่างกัน หากเป็นมอเตอร์ตัวเล็กก็จะพันแบบสุ่ม (random-wound stator coils) ถ้าเป็นมอเตอร์ตัวใหญ่ก็จะมีรูปแบบการพันที่แน่นอน (form-wound stator coils) และส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์หรือด้านทุติยภูมินั้นเป็นส่วนประกอบหลักอีกส่วนหนึ่ง ซึ่งทำมาจากวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กแผ่นบางๆ ซ้อนกันเป็นชั้นๆ รูปร่างทรงกระบอก ติดอยู่บนเพลลา ตามเส้นรอบวงด้านนอกทรงกระบอกของโรเตอร์จะมีการเจาะทะลุตามแนวยาวแกนเพลลาโดยรอบเพื่อรองรับการพันขดลวดโรเตอร์ ซึ่งมีการพันอยู่ 2 แบบคือ แบบกรงกระรอก (squirrel cage) และแบบขดโรเตอร์ (wound rotor)

เมื่อขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสได้รับค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นมาที่มีความเร็วเชิงโคโรนัส n_s โดยความเร็วนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและจำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้า และสามารถกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนนี้ได้โดยการสลับลำดับเฟสของสัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟสคู่ใดคู่หนึ่ง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแท่งตัวนำต่าง ๆ ที่วางอยู่บนโรเตอร์จะเกิดการตัดกับสนามแม่เหล็กหมุนโดยพิจารณาในลักษณะแนวเคลื่อนที่สัมพัทธ์ แท่งตัวนำจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาซึ่งทำให้เกิดค่ากระแสเหนี่ยวนำในแท่งตัวนำ ค่ากระแสนี้จะมีผลทำให้เกิดแรงทางกลกระทำกับแท่งตัวนำต่าง ๆ ในทิศทางที่ทำให้เคลื่อนที่ไปในแนวเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วโรเตอร์ n_r ซึ่งหลักการทำงานดังกล่าวเครื่องจักรไฟฟ้านี้จึงเรียกชื่อว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังนั้นจากหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 พิจารณาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะเริ่มหมุน (โรเตอร์อยู่กับที่กำลังจะหมุน $n_r = 0$) แท่งตัวนำจะตัดกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส n_s และเมื่อโรเตอร์เกิดการหมุนด้วยความเร็ว n_r แท่งตัวนำจะตัดกับสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว $n_s - n_r$ จะเห็นได้ว่าในขณะที่เริ่มหมุนโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำมากที่สุด และต่อจากนั้นการเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับความเร็วโรเตอร์ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าภาระทางกล เช่น เมื่อมีภาระทางกลน้อยๆ หรือสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีภาระทางกล (no-load) ความเร็วโรเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส โรเตอร์จะเกิดค่ากระแสเหนี่ยวนำเพียงเล็กน้อยเนื่องจากต้องการแรงบิดทางกลไม่มาก (แรงเสียดทานของโรเตอร์) และเมื่อภาระทางกลเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร็วโรเตอร์ลดลงมีผลทำให้โรเตอร์เกิดการเหนี่ยวนำที่มากขึ้นและจะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำและแรงบิดทางกลมากขึ้นได้ตามความต้องการของภาระทางกล การเพิ่มขึ้นของกระแสเหนี่ยวนำในลักษณะนี้เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำมีความต้องการกำลังไฟฟ้า (กระแส) ที่เพิ่มมากขึ้นจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกตามความต้องการของภาระทางกลที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 3.1 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์ของค่าสลิป (slip) ดังนี้

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3-1)$$

เมื่อ s เป็นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีหน่วย ส่วน n_s และ n_r เป็นความเร็วซิงโครนัสและความเร็วโรเตอร์ ตามลำดับ มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (revolution per minute; rpm)

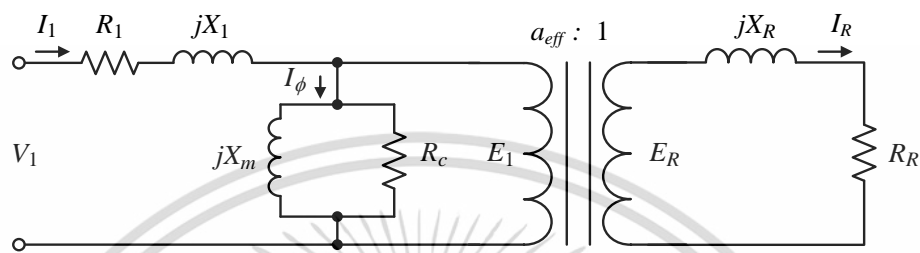
$$n_r = (1 - s) n_s \quad (3.2)$$

ในขณะที่เริ่มหมุน (starting) ค่าสลิปจะเท่ากับ 1 และขณะที่ไม่มีภาระทางกลค่าสลิปจะมี

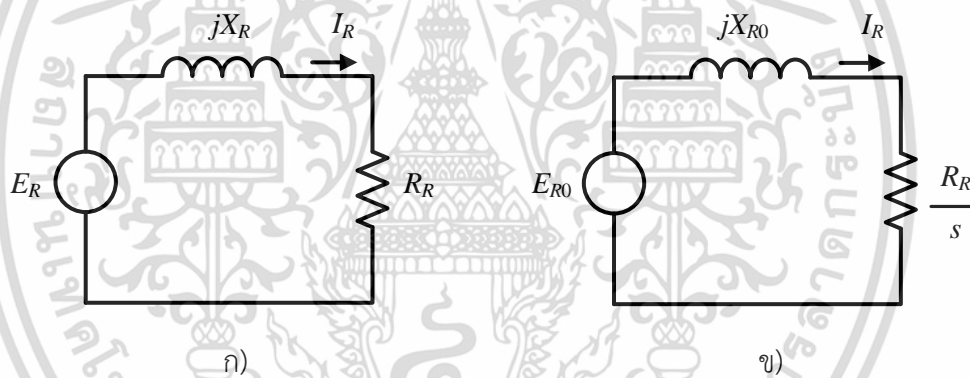
ค่าน้อยมาก (เข้าใกล้ศูนย์) ดังนั้นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าเป็นบวก และอยู่ระหว่างค่า 0
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง 1 และค่าสลิปจะไม่มีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่เริ่มหมุน ความถี่ของโรเตอร์จะเท่ากับความถี่ของสเตเตอร์

ความถี่ของโรเตอร์ $f_r = s f$ (3.3)



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยอ้างอิงหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ต่อเฟส

เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำ [34] มีหลักการทำงานพื้นฐานคือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนมาเกี่ยวคล้องกับแท่งตัวนำหรือขดลวดที่อยู่บนโรเตอร์ ซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายกับหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสามารถที่จะอ้างอิงกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ซึ่งมีรูปแบบของวงจรคล้ายหรือเหมือนกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยวงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ และวงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์

จากสมการที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าความถี่ของโรเตอร์จะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าสลิป ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้าที่โรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสลิป

$$X_R = sX_{R0} \quad (3.4)$$

เมื่อ X_R และ X_{R0} เป็นค่ารีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วทางด้านโรเตอร์ (rotor leakage reactance) ที่ค่าสลิปใด ๆ และขณะหยุดนิ่ง ตามลำดับ

$$E_R = sE_{R0} \quad (3.5)$$

เมื่อ E_R และ E_{R0} เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์ ที่ค่าสลิปใด ๆ และขณะหยุดนิ่ง ตามลำดับ จากรูปที่ 3.3 ก) วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ต่อเฟสจะได้ว่า

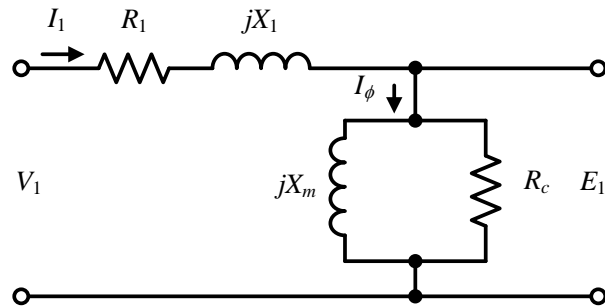
$$I_R = \frac{E_R}{\sqrt{R_R^2 + (X_R)^2}} \quad (3.6)$$

เมื่อ I_R เป็นค่ากระแสทางด้านโรเตอร์ และ R_R เป็นความต้านทานไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์

จากสมการที่ (3.6) สามารถจัดความสัมพันธ์ใหม่ โดยพิจารณาอยู่รูปแบบของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง และค่ารีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วด้านโรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง ดังนี้

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\sqrt{(R_R/s)^2 + (X_{R0})^2}} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.7) จะได้วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ใหม่ดังรูปที่ 3.3 ข)



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ต่อเฟส

วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ต่อเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยกำหนดให้ V_1 และ I_1 เป็นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ ตามลำดับ ส่วน R_1 และ X_1 เป็นความต้านทานไฟฟ้า และรีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วทางด้านสเตเตอร์ (stator leakage reactance) ตามลำดับ R_c และ X_m เป็นความต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากความสูญเสียที่แกนเหล็ก (core loss resistance) และรีแอกแตนซ์จากการสร้างสนามแม่เหล็ก (magnetizing reactance) ซึ่งพิจารณาอยู่ทางด้านสเตเตอร์ตามลำดับ จากการพิจารณารวมวงจรสมมูลในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ถ้าอัตราส่วนรอบประสิทธิผลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเท่ากับ a_{eff} ดังนั้นแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์เมื่อย้ายมาอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์

$$E_1 = E'_R = a_{eff} E_{R0} \quad (3.8)$$

กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ (I_2) ได้จากสมการ (3.9)

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \quad (3.9)$$

และอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์

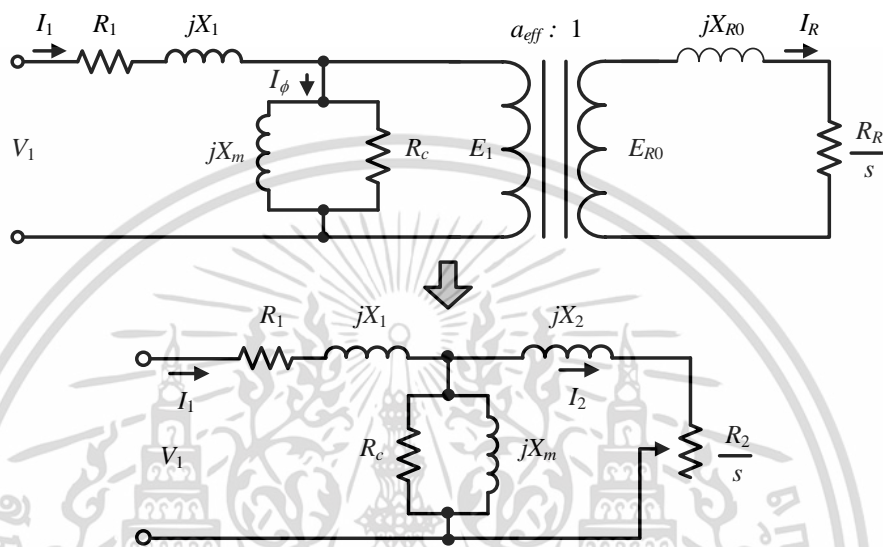
$$R_2 = a_{eff}^2 R_R \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R0} \quad (3.11)$$

กำหนดให้ค่า R_2 และ X_2 เป็น ความต้านทานไฟฟ้า และรีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วทางด้านโรเตอร์

อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ ตามลำดับ ซึ่งจะได้วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 3.5



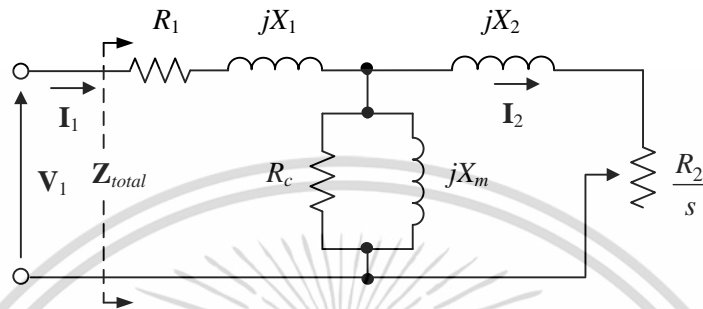
รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์

3.2.1 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์หรือขดลวดปฐมภูมิ นั้น จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด ซึ่งจะสร้างฟลักซ์เชื่อมโยงไปยังขดลวดโรเตอร์หรือขดทุติยภูมิ ฟลักซ์ร่วม (mutual flux) ที่หมุนตัดขวางแกนเหล็กที่เป็นเฟอร์โรแมกเนติกเหล่านี้จะทำให้เกิดความสูญเสียจากกระแสวน (eddy current loss) และความสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) นอกจากนี้ยังมีฟลักซ์รั่ว (leakage flux) เกิดขึ้นอีกด้วย กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ยังแสดงพฤติกรรมต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ที่สร้างจากขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดความสมดุลของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force) จากผลลัพธ์นี้จึงเสมือนว่าสามารถนำวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้ามาเป็นวงจรสมมูลต้นแบบให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำสามเฟสที่อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std 112-2004 method F/F1 แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลสามารถหาได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 112-2004 method F1 [13]



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std 112

จากวงจรสมมูลรูปที่ 3.6 ค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z_{total}) ของวงจรสมมูลและค่าตัวประกอบกำลังอินพุท (PF) มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (3.12)$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (3.13)$$

$$Z_{mc} = \frac{R_c jX_m}{R_c + jX_m} \quad (3.14)$$

$$Z_{2mc} = \frac{Z_2 Z_{mc}}{Z_2 + Z_{mc}} \quad (3.15)$$

$$Z_{total} = Z_1 + Z_{2mc} \quad (3.16)$$

$$PF = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(Z_{total})}{\text{Re}(Z_{total})} \right) \right) \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

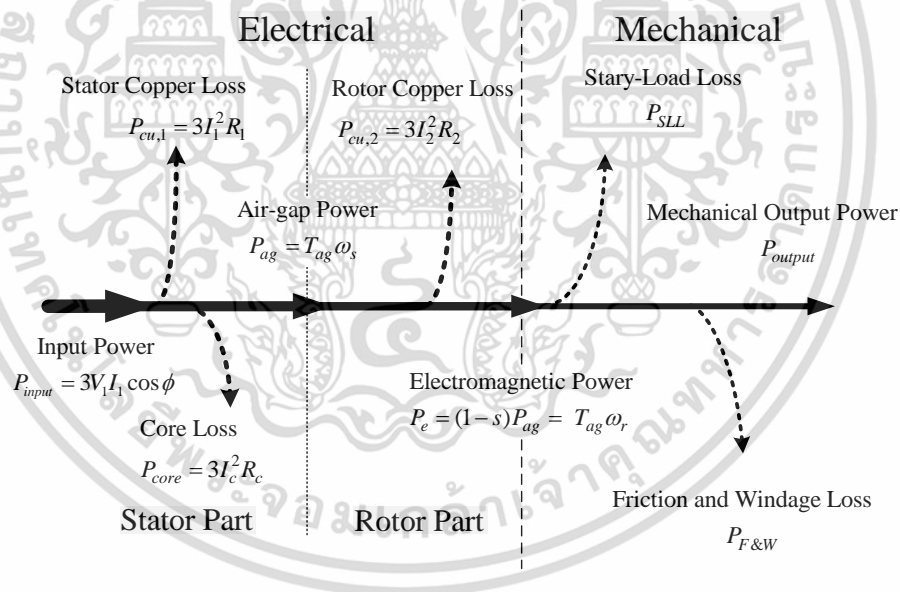
จากสมการที่ (3.16) และ (3.17) เฟสเซอร์กระแสไฟฟ้าอินพุต (I_1) และกำลังไฟฟ้าอินพุต (P_{input}) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{total}} \tag{3.18}$$

$$P_{input} = \text{Re}(3V_1 I_1^*) \tag{3.19}$$

เมื่อ V_1 เป็นเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าอินพุต และ Re หมายถึง ส่วนที่เป็นจำนวนจริง และจากรูปที่ 3.6 สามารถหาค่าของเฟสเซอร์กระแสในโรเตอร์ได้ดังนี้

$$I_2 = \frac{I_1 Z_{mc}}{Z_2 + Z_{mc}} \tag{3.20}$$



รูปที่ 3.7 การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การไหลของกำลังและค่าความสูญเสียในวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ค่าความสูญเสียที่ขดลวดทางด้านสเตเตอร์ ($P_{cu,1}$) และค่าความสูญเสียที่แกนเหล็ก (P_{core}) สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{cu,1} = 3I_1^2 R_1 \quad (3.21)$$

$$P_{core} = 3I_c^2 R_c \quad (3.22)$$

เมื่อ I_1 และ I_c เป็นค่าประสิทธิผลของกระแสไฟฟ้าอินพุท และกระแสไฟฟ้าเนื่องจากความสูญเสียที่แกนเหล็ก ตามลำดับ

กำลังที่ช่องว่างอากาศ (P_{ag}) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_{ag} = P_{input} - P_{cu,1} - P_{core} \quad (3.23)$$

หรือ
$$P_{ag} = T_{ag} \omega_s \quad (3.24)$$

เมื่อ T_{ag} เป็นแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ ω_s เป็นความเร็วเชิงมุมของซิงโครนัส และ ω_r เป็นความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ สำหรับการไหลของกำลังและความสูญเสียทางด้านโรเตอร์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ความสูญเสียที่ขดลวดทางด้านโรเตอร์ ($P_{cu,2}$)

$$P_{cu,2} = 3I_2^2 R_2 \quad (3.25)$$

กำลังแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic power ; P_e)

$$P_e = P_{ag} - P_{cu,2} \quad (3.26)$$

หรือ

$$P_e = (1-s)P_{ag} = \frac{3I_2^2 R_2 (1-s)}{s} = T_{ag} \omega_r \quad (3.27)$$

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าความสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีอยู่ 5 ส่วน ได้แก่

ความสูญเสียที่ขดลวดทางด้านสเตเตอร์ (stator copper loss) ความสูญเสียที่ขดลวดทางด้านโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(rotor copper loss) ความสูญเสียที่แกนเหล็ก (core loss) ซึ่งเป็นความสูญเสียจากฮีสเทอรีซิสกับ กระแสวนในแกนเหล็ก ความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล P_{SLL} (stray-load loss) เป็นความ สูญเสียอื่น ๆ ที่ไม่สามารถพิจารณาแยกได้ ซึ่งประกอบด้วยความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากผลของฟลักซ์ ฮาร์โมนิกส์ (harmonics flux) ในแกนเหล็ก ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ในขดลวดทางด้านสเตเตอร์ ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ในตัวนำทางด้านโรเตอร์ และค่าสนามแม่เหล็กรั่วเมื่อมีภาระทางกล ตามลำดับ และค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม $P_{F\&W}$ (friction and windage loss) ซึ่งเป็น ความสูญเสียทางกลเนื่องจากการหมุนและการต้านลมของใบพัด สำหรับวงจรสมมูลโดยทั่วไปแล้วจะ ไม่คิดผลของความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกลและความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม หรืออาจจะกำหนดให้เป็นค่าคงที่โดยอาศัยประสบการณ์ ยกเว้นกรณีการทดสอบหาประสิทธิภาพ มอเตอร์เหนี่ยวนำตามขั้นตอนของ IEEE Std 112 method F/F1 จะนำผลของค่าความสูญเสียแฝง เนื่องมาจากภาระทางกลที่ได้จากการทดสอบโดยตรงหรือจากการสมมติ และค่าความสูญเสียจากแรง เสียดทานกับแรงต้านลมที่ได้จากการทดสอบปรับระดับแรงดันไฟฟ้า (variation voltage) มาทำ การปรับแก้เพื่อเพิ่มความแม่นยำ [13]

ดังนั้น กำลังเอาต์พุตทางกล P_{output} (mechanical output power) ที่ทำได้จากวงจร สมมูลตาม IEEE Std 112 method F/F1 และวงจรสมมูลโดยทั่วไป สามารถพิจารณาได้จาก

$$P_{output} = P_e - P_{SLL} - P_{F\&W} \quad (3.28)$$

$$P_{output} = P_e \quad \therefore P_{SLL} + P_{F\&W} = 0 \quad (3.29)$$

และแรงบิดที่เพล่า T_{sh} (shaft torque) หรือ แรงบิดเอาต์พุต (output torque) พิจารณาได้ดังนี้

$$P_{output} = T_{sh} \omega_r \quad (3.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{sh} = \frac{P_{output}}{\omega_r} \quad (3.31)$$

สำหรับประสิทธิภาพของมอเตอร์สามารถคำนวณหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังทางกล จากสมการที่ (3.28) หรือ (3.29) กับกำลังทางด้านอินพุตจากสมการที่ (3.19) ดังนี้

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \quad (3.32)$$

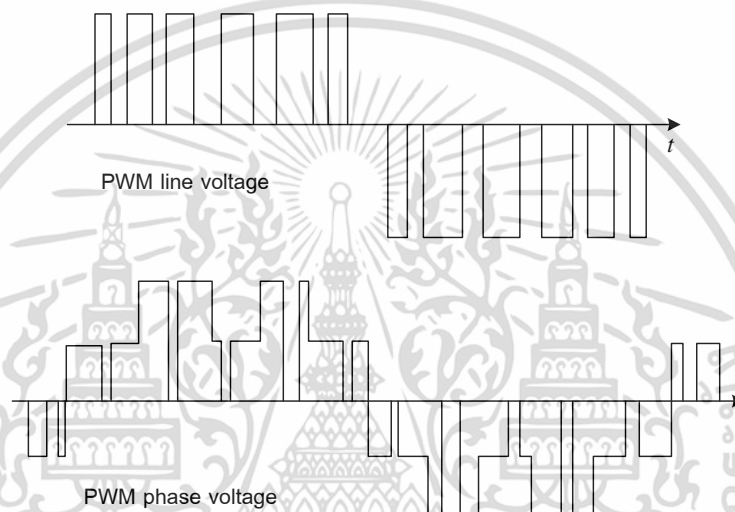
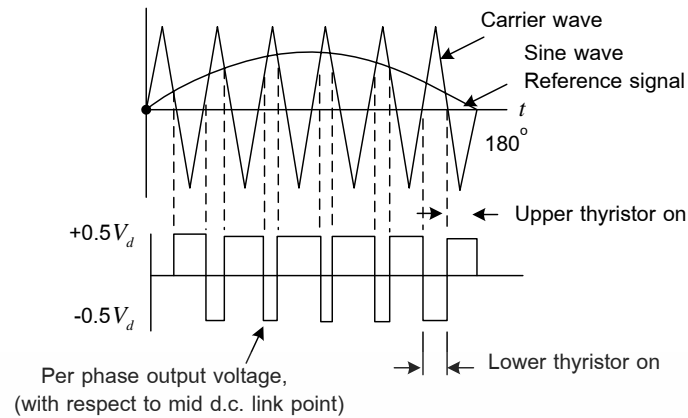
3.2.2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

ในปัจจุบันนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมจะถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ซึ่งอินเวอร์เตอร์จะควบคุมแรงดันและความถี่ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อให้ได้สมรรถนะตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ การควบคุมแรงดันและความถี่ไฟฟ้าจะใช้หลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์หรือพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation, PWM) [35] โดยมีความสัมพันธ์กับดรรชนีการมอดูเลต m_a (modulation index) และดรรชนีการมอดูเลตของความถี่ m_f (frequency modulation index) แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.33) และ (3.34) ตามลำดับสำหรับหลักการพื้นฐานของพีดับเบิลยูเอ็ม แสดงได้ดังรูปที่ 3.8

$$m_a = \frac{V_{reference(peak)}}{V_{carrier(peak)}} \quad (3.33)$$

$$m_f = \frac{f_{carrier}}{f_{reference}} \quad (3.34)$$

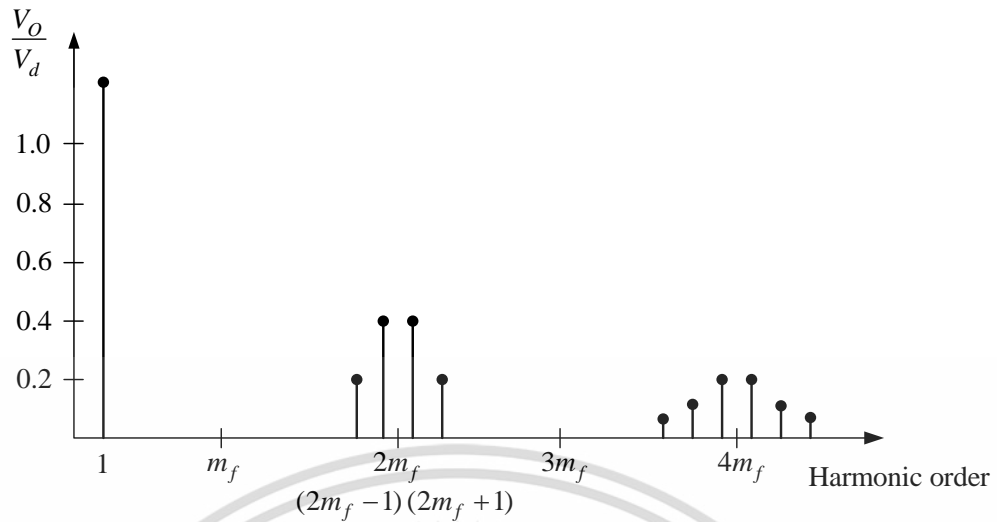
เมื่อ $V_{reference(peak)}$ และ $V_{carrier(peak)}$ เป็นค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและพาหะ ตามลำดับ ส่วน $f_{reference}$ และ $f_{carrier}$ เป็นความถี่ของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและพาหะ ตามลำดับ



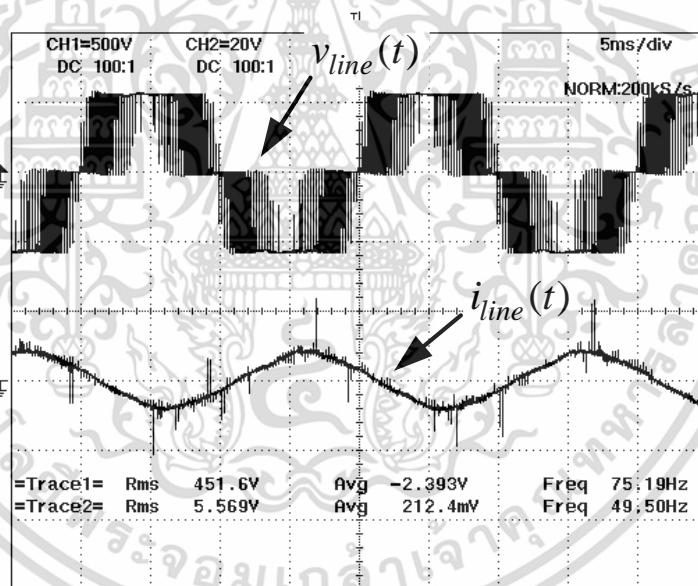
รูปที่ 3.8 หลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์

หลักการของพีดับเบิลยูเอ็ม [35] จะทำการลดส่วนประกอบของสัญญาณแรงดันที่ฮาร์โมนิกอันดับต่ำลง แต่จะเพิ่มส่วนประกอบของสัญญาณแรงดันที่ฮาร์โมนิกอันดับสูงขึ้นมาแทน โดยความถี่ของแรงดันพีดับเบิลยูเอ็ม จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติการมอดูเลตของความถี่ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะเกิดที่กลุ่มความถี่ $k_n m_f$ เมื่อ $k_n = 2, 4, 6, \dots, \infty$ สเปกตรัม (spectrum) ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีรูปสัญญาณที่ใกล้เคียงกับสัญญาณรูปไซน์ ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันพีดับเบิลยูเอเอ็ม



รูปที่ 3.10 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่สัญญาณไม่เป็นรูปไซน์ หรือ อินเวอร์เตอร์ [35] - [37] การวิเคราะห์จะแยกพิจารณาผลที่เกิดขึ้นแต่ละความถี่ จากนั้นจะใช้ทฤษฎี บทการทับซ้อน (superposition theorem) [38] เพื่อแสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ กระแส

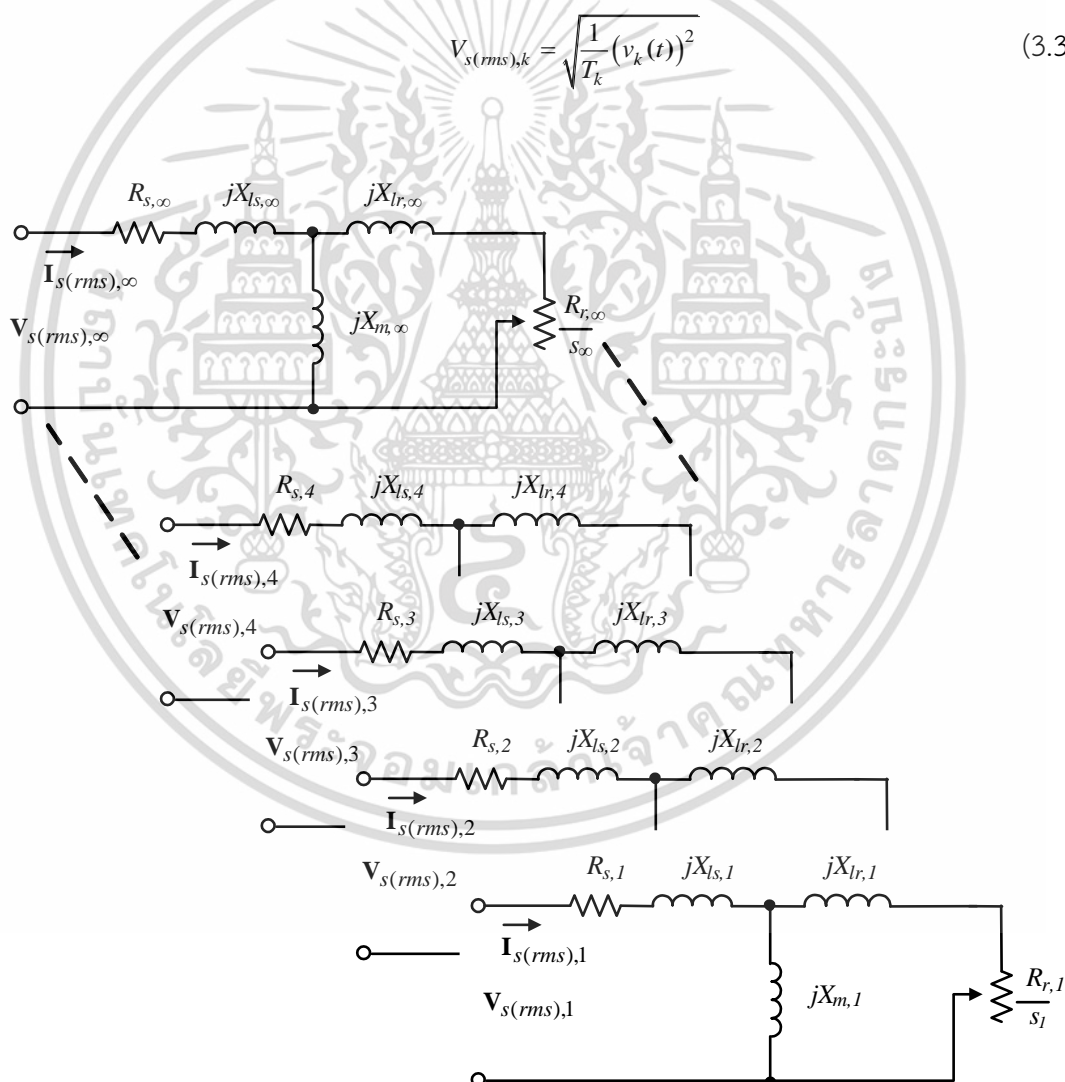
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพอินพุทของมอเตอร์ ความสูญเสียของขดลวด เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์โดยทั่วไปจะอยู่ที่พื้นฐานของวงจรสมมูลที่ตอบสนองแต่ละความถี่ แสดงดังรูปที่ 3.11 สำหรับค่าสลิป ในวงจรสมมูลที่ตอบสนองแต่ละความถี่ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$s_k = \frac{k\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (3.35)$$

กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าแต่ละความถี่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.36)

$$V_{s(rms),k} = \sqrt{\frac{1}{T_k} (v_k(t))^2} \quad (3.36)$$



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลที่ความถี่ต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าแต่ละความถี่ แสดงดังสมการที่ (3.37)

$$I_{s(rms),k} = \sqrt{\frac{1}{T_k} (i_k(t))^2} \quad (3.37)$$

เมื่อ $v_k(t)$ และ $i_k(t)$ เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ฮาร์โมนิกส์ที่ k และสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ฮาร์โมนิกส์ที่ k ตามลำดับ

และกระแสไฟฟ้าประสิทธิผลอินพุทของมอเตอร์ พิจารณาได้จาก

$$I_{s(rms)} = \sqrt{(I_{s(rms),1})^2 + (I_{s,ripple})^2} \quad (3.38)$$

กระแสกระเพื่อม (ripple current) $I_{s,ripple}$ ที่เกิดจากปรากฏฮาร์โมนิกส์ของแรงดันไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ (3.39)

$$\begin{aligned} I_{s,ripple} &= \sqrt{\sum_{k=2,3,4,\dots}^{\infty} (I_{s(rms),k})^2} \\ &= \sqrt{\sum_{k=2,3,4,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_{s(rms),k}}{Z_{total,k}} \right)^2} \end{aligned} \quad (3.39)$$

ดังนั้นกระแสประสิทธิผลอินพุทของมอเตอร์สามารถคำนวณโดยใช้ทฤษฎีบทการทับซ้อน แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.40)

$$\begin{aligned} I_{s(rms)} &= \sqrt{\sum_{k=1,2,3,4,\dots}^{\infty} (I_{s(rms),k})^2} \\ &= \sqrt{\sum_{k=1,2,3,4,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_{s(rms),k}}{Z_{total,k}} \right)^2} \\ &= \sum_{k=1,2,3,4,\dots}^{\infty} \frac{V_{s(rms),k}}{Z_{total,k}} \end{aligned} \quad (3.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.11 อิมพีแดนซ์รวมแต่ละความถี่ ($\mathbf{Z}_{total,k}$) สามารถหาได้จากขั้นตอนดังนี้

$$\mathbf{Z}_{s,k} = R_{s,k} + jX_{ls,k} \quad (3.41)$$

$$\mathbf{Z}_{r,k} = \frac{R_{r,k}}{s_k} + jX_{lr,k} \quad (3.42)$$

$$\mathbf{Z}_{m,k} = jX_{m,k} \quad (3.43)$$

$$\mathbf{Z}_{rm,k} = \frac{Z_{r,k}Z_{m,k}}{Z_{r,k} + Z_{m,k}} \quad (3.44)$$

$$\mathbf{Z}_{total,k} = \mathbf{Z}_{s,k} + \mathbf{Z}_{rm,k} \quad (3.45)$$

ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแต่ละความถี่ (PF_k)

$$PF_k = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_{total,k})}{\text{Re}(\mathbf{Z}_{total,k})} \right) \right) \quad (3.46)$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าอินพุตแต่ละความถี่

$$P_k = V_{s(rms),k} I_{s(rms),k} (PF_k) = (v_k(t) i_k(t)) \quad (3.47)$$

จากสมการที่ (3.47) เมื่อใช้ทฤษฎีบทการทับซ้อน สามารถหากำลังไฟฟ้าอินพุตของมอเตอร์ ได้ดังนี้

$$P_{input} = \sum_{k=1}^{\infty} P_k = \sum_{k=1}^{\infty} (v_k(t) i_k(t)) \quad (3.48)$$

ค่าความสูญเสียรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วย ความสูญเสียของขดลวด

ทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ ความสูญเสียของแกนเหล็ก ความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลม เมื่ออ้างอิงจากวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.11 สามารถคำนวณหาค่าความสูญเสียรวม โดยที่ความสูญเสียของขดลวดทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$P_L = 3 \left[\left(I_{s(rms),1}^2 R_{s,1} \right) + \left(I_{s(rms),2}^2 R_{s,2} \right) + \left(I_{s(rms),3}^2 R_{s,3} \right) + \dots + \left(I_{s(rms),\infty}^2 R_{s,\infty} \right) \right] \quad (3.49)$$

เมื่อ $R_{s,k}$ เป็นความต้านทานประสิทธิผลของวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็มนั้นจะมีผลข้างเคียงจากฮาร์โมนิกส์ซึ่งมีผลทำให้ความสูญเสียที่แกนเหล็กจะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายสัญญาณรูปไซน์ เช่นเดียวกับกับความสูญเสียแฉงเนื่องจากภาระทางกล ดังนั้นเพื่อให้ง่ายการพิจารณา จึงกำหนดให้ ผลรวมของความสูญเสียของแกนเหล็ก ความสูญเสียแฉงเนื่องจากภาระทางกล และความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมนี้อาจที่ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$P_c + P_{SLL} + P_{FW} = K_{const} \quad (3.50)$$

เมื่อ K_{const} เป็นค่าคงที่ซึ่งได้จากการทดลองหรือจากประสบการณ์ ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

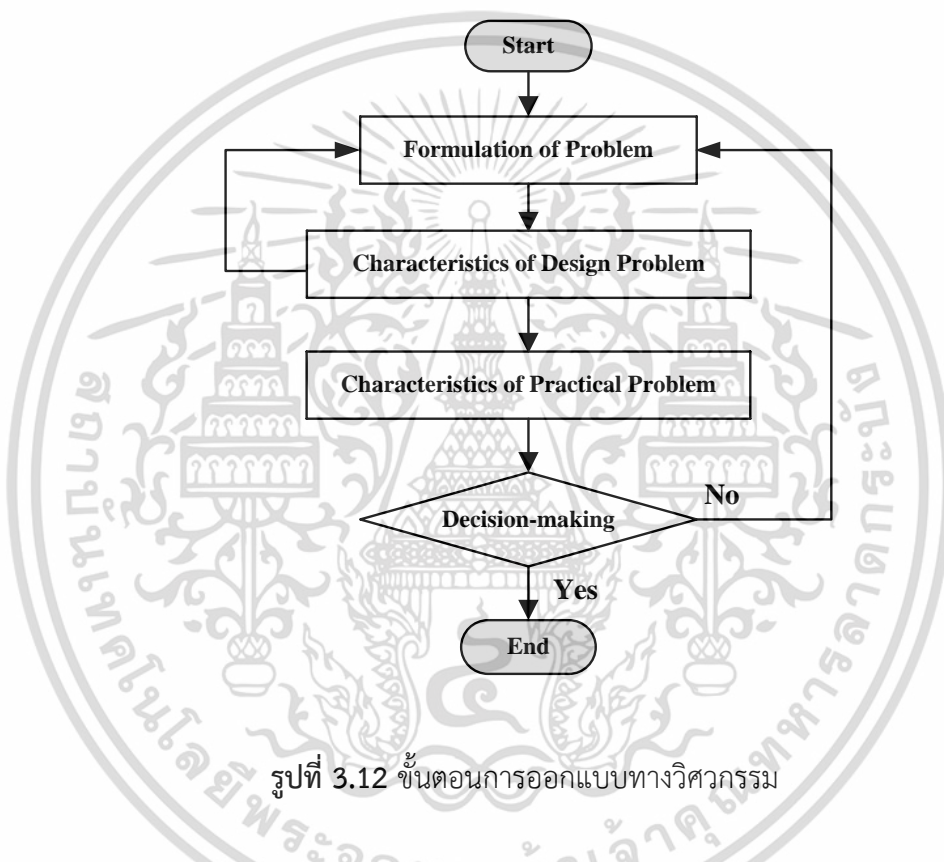
$$\eta = \frac{P_{input} - P_L - K_{const}}{P_{input}} \quad (3.51)$$

3.3 หลักการออกแบบที่เหมาะสม

การออกแบบในงานวิศวกรรมจะต้องมีการกำหนดเป้าหมายเพื่อให้งานที่ออกแบบเป็นไปตามความต้องการ โดยต้องมีเงื่อนไขหรือข้อจำกัดเป็นตัวควบคุมเพื่อให้ผลลัพธ์เป็นไปได้อย่างจริงในทาง

ปฏิบัติ ตัวอย่างเช่น การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว 10 kVA, 24 kV/415 V โดยที่มีความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

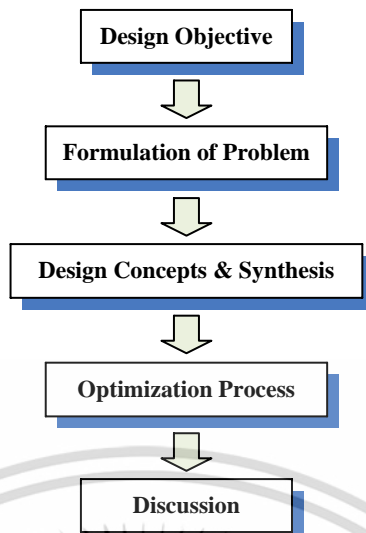
สูญเสียน้อยที่สุดหรือประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งถ้าไม่มีเงื่อนไขหรือข้อจำกัดแล้ว หม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบมา อาจจะไม่สามารถผลิตได้เนื่องจากขนาดแกนเหล็กที่ใช้ในการผลิตอาจจะไม่มี หรือถ้าผลิตได้อาจจะไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เช่น น้ำหนักมากเกินไปหรือมีขนาดใหญ่ เป็นต้น ดังนั้นจะต้องมีเงื่อนไขหรือข้อจำกัดในการออกแบบ เช่น ขนาดของแกนเหล็ก ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด การคุมค่าแรงดัน (voltage regulation) ต้นทุน หรือ น้ำหนัก เป็นต้น



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม

สำหรับการออกแบบทางด้านวิศวกรรม จะมีขั้นตอนการออกแบบเพื่อให้ได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3.12 จะพบว่าขั้นตอนในทางปฏิบัติ มีความยุ่งยากและจำเป็นต้องใช้ความรู้และประสบการณ์ของผู้ออกแบบอย่างมาก และอาจจะต้องใช้การลองผิดลองถูกจนกระทั่งได้ค่าตามเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการออกแบบ อีกทั้งโอกาสที่จะได้ค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ก็มีความเป็นไปได้น้อย และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบหรือราคาของวัสดุก็จำเป็นต้องทำออกแบบใหม่ ซึ่งทำให้เสียเวลาและต้นทุนในการสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

จากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้มีการนำเสนอหลักการออกแบบโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมมาช่วยในการออกแบบซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนในการออกแบบเป็นดังนี้

1. การกำหนดเป้าหมายการออกแบบ (design objective) คือการกำหนดความต้องการที่จะให้ผลของการออกแบบนั้นมีลักษณะเป็นอย่างไรตามเงื่อนไขที่กำหนด
2. กำหนดรูปแบบของปัญหา (formulation of problem) เป็นการศึกษาวិธีและขั้นตอนต่าง ๆ ของสิ่งที่ต้องการออกแบบ รวบรวมสมการที่ใช้ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเป้าหมายที่ต้องการให้ได้เพียงพอ เพราะสิ่งเหล่านี้จะช่วยนำไปสู่การกำหนดสมการเป้าหมายและเงื่อนไขที่ถูกต้องยิ่งขึ้น
3. หลักการและการสังเคราะห์การออกแบบ (design concept and synthesis) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของสมการที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 จัดความสัมพันธ์ของสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกันเพื่อให้แสดงถึงสิ่งที่เป้าหมายต้องการ รวมทั้งการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและตัวแปรที่เลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การหาค่าที่เหมาะสม (optimization process) เป็นวิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ ดิเทอร์มินิสติก (deterministic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของแกรเดียน และสโตชาสติก (stochastic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น
5. อภิปรายผลการออกแบบ (discussion) เป็นการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้หลังจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมว่ามีลักษณะเป็นตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งการที่ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการนั้นอาจเกิดจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ผิดพลาดหรือสาเหตุใดก็ตามที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นหลังการออกแบบจะต้องมีการนำผลลัพธ์มาอภิปรายเสมอเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

3.3.1 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม

โดยทั่วไปการหาค่าที่เหมาะสมจะเป็นการหาค่าตัวแปรของฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) และฟังก์ชันเงื่อนไข (constraints function) [39], [40] ที่กำหนด ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันเป้าหมายแสดงได้ดังสมการที่ (3.52) สำหรับฟังก์ชันเงื่อนไขจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เงื่อนไขน้อยกว่าศูนย์ (inequality constraint) เงื่อนไขเท่ากับศูนย์ (equality constraint) และเงื่อนไขขนาด (side constraint) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3.53) – (3.55) ตามลำดับ ดังนี้

$$F(\mathbf{x}) \quad (3.52)$$

$$g_j(\mathbf{x}) < 0 \quad j = 1, \dots, l \quad (3.53)$$

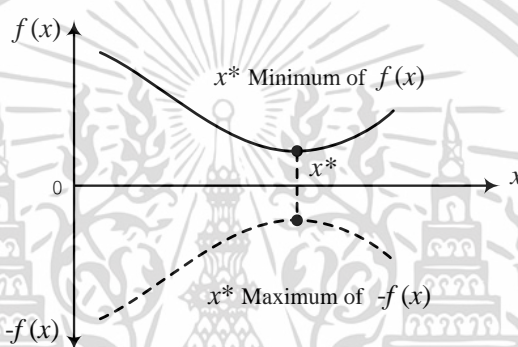
$$h_k(\mathbf{x}) = 0 \quad k = 1, \dots, m \quad (3.54)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, \dots, n \quad (3.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ เป็นเวกเตอร์ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบของฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไข ในการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้

สมการที่ 3.52 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจ เป็นการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันก็ได้ จากรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่า x^* เป็นจุดต่ำสุดของ ฟังก์ชัน $f(x)$ และเป็นจุดสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการหาค่าต่ำสุดของ ฟังก์ชันจะมีความหมายเดียวกันกับการหาค่าสูงสุดของค่าลบของฟังก์ชันนั้น



รูปที่ 3.14 ค่าตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$

สมการที่ (3.53) แสดงฟังก์ชันเงื่อนไขที่น้อยกว่าศูนย์ ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าที่น้อยกว่าหรือ เท่ากับค่าที่กำหนด สมการที่ (3.54) เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันของเงื่อนไขที่เท่ากับศูนย์ ซึ่งในการ ออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ฟังก์ชัน นั้นมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนด และสมการที่ (3.55) เป็นสมการที่ใช้กำหนดช่วงของค่าตัวแปรที่ใช้ในการ ออกแบบเพื่อป้องกันการได้คำตอบที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ

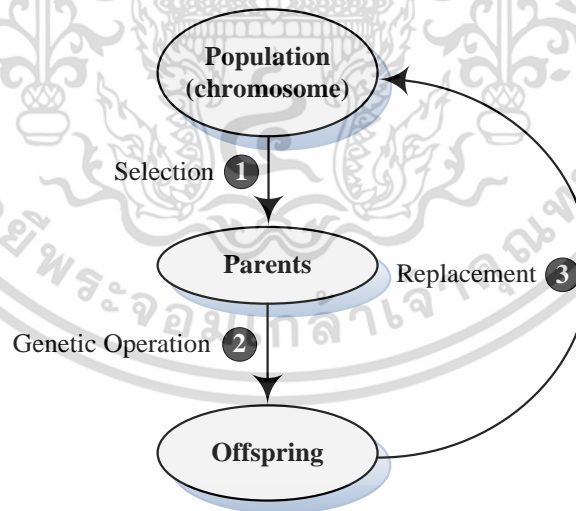
ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมหลากหลายวิธี แต่มีแนวความคิด หนึ่งที่ได้รับความนิยมมาก คือ ความฉลาดแบบกลุ่ม (swarm intelligence) [41] โดยได้ แนวความคิดจากระบบนิเวศวิทยาซึ่งตัวอย่างของความฉลาดแบบกลุ่มที่มาจากธรรมชาติได้แก่ วิธีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณานิคม (ant colony optimization) [42] วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบนกคูหา (cuckoo search) ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมตามแนวทางสโตศาสตร์แบบวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithms) และแบบกลุ่มอนุภาค (particle swarm) เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกในการนำมาประยุกต์ใช้งานในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม

3.3.2 วิธีเชิงพันธุกรรม

วิธีเชิงพันธุกรรม [43], [44] เป็นวิธีการค้นหาคำตอบ โดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติ และหลักการทางสายพันธุ์ ซึ่งวิธีการนี้จัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary computing) เนื่องจากขั้นตอนของการค้นหาคำตอบโดยใช้แนวทางการปรับปรุงหรือพัฒนาสายพันธุ์หรือเรียกว่า “วิวัฒนาการ” ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในด้านประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด



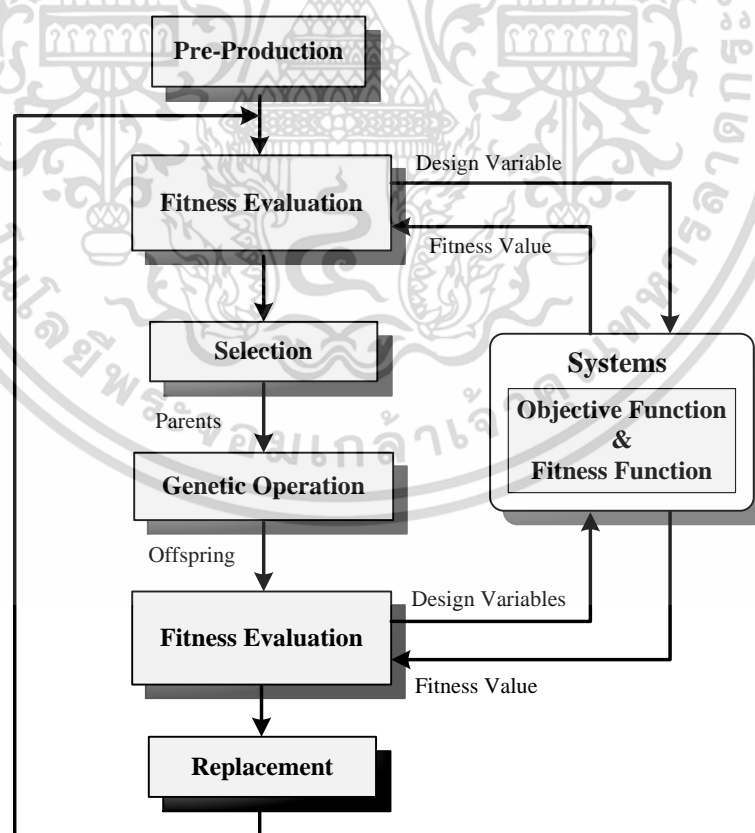
รูปที่ 3.15 กระบวนการของวิธีเชิงพันธุกรรม

วิธีเชิงพันธุกรรม คือ เทคนิคที่ใช้ในการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ได้ โดยเป็นวิธีการที่จำลองการขยายพันธุ์ของธรรมชาติ ในการคัดเลือกโดยธรรมชาติ (natural selection) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

selection) นั้นจะพยายามทำให้โครโมโซม (chromosome) มีค่าที่เหมาะสมที่สุด และจะถ่ายทอดคุณสมบัติไปยังโครโมโซมลูก กระบวนการของวิธีเชิงพันธุกรรมแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญได้แก่ การคัดเลือกสายพันธุ์ (selection) การปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (genetic operation) และ การแทนที่ (replacement)

กระบวนการของวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ โดยการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อม ซึ่งสิ่งมีชีวิตใดสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าย่อมสามารถที่จะมีชีวิตรอดและสืบพันธุ์ลูกหลานต่อไป ดังนั้นวิธีเชิงพันธุกรรม จึงเป็นการจำลองวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบธรรมชาติ เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดของระบบด้วยกระบวนการวิวัฒนาการ (ปรับปรุงหรือพัฒนาสายพันธุ์) ดังนั้นวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.16 จะแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน ได้ดังนี้



รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้นตอนที่ 1 การสร้างประชากร โดยทั่วไปจะใช้หลักการสุ่ม (random)
- ขั้นตอนที่ 2 โครโมโซมของกลุ่มประชากรทั้งหมดจะต้องผ่านการถอดรหัสเพื่อนำมาประเมินค่าด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณหาค่าความเหมาะสมด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม ใช้ค่าความเหมาะสมทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่ม เพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์
- ขั้นตอนที่ 4 การสร้างโครโมโซมลูกหลาน เพื่อเป็นตัวแทนในการถ่ายทอดสายพันธุ์ให้กับรุ่นถัดไปด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์
- ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลานโดยประเมินจากฟังก์ชันเป้าหมาย
- ขั้นตอนที่ 6 โครโมโซมในประชากรเดิมเพียงบางส่วนเท่านั้นจะถูกแทนที่ด้วยลูกหลานที่ถูกเลือก ด้วยขั้นตอนของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ
- ขั้นตอนที่ 7 เริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 2 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการเมื่อสิ้นสุดกระบวนการและขั้นตอนการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรม คำตอบที่ได้จะมาจากโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มประชกรนั่นเองที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายหรือฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function) เป็นไปตามที่ต้องการออกแบบมากที่สุด โดยที่อยู่ในเงื่อนไขการออกแบบ

3.3.3 การหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

การหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค [41], [45] เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดถูกคิดค้นขึ้นมาโดยอีเบอร์ฮาร์ท (Eberhart) และเคนเนดี (Kennedy) ในปี 1995 โดยมีแรงบันดาลใจในการพัฒนามาจากการสังเกตการเคลื่อนไหวของฝูงนกที่มีลักษณะการเคลื่อนที่สอดคล้องกันในเวลาออกหาอาหาร ฝูงนกเหล่านั้นจะมีการส่งสัญญาณเพื่อสื่อสารกันให้ทราบถึงตำแหน่งที่มีอาหารอยู่

และทำการเคลื่อนที่ไปยังแหล่งอาหารที่ได้รับข้อมูลมา จากแนวคิดดังกล่าว วิธีการหาค่าที่เหมาะสมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบกลุ่มอนุภาคจึงใช้วิธีการค้นหาคำตอบด้วยการใช้ออนุภาค (particles) จำนวนมากเคลื่อนที่ไปบนพื้นที่ที่ต้องการค้นหา (search space) เพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด

นกซึ่งเคลื่อนที่เปรียบได้กับอนุภาคหนึ่งตัว และอนุภาคแต่ละตัวจะจดจำตำแหน่งในปัจจุบันของตนเองเอาไว้ (x_i) พร้อมกับทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค (v_i) ทุก ๆ รอบการทำงานจะต้องมีสมการที่ใช้วัดค่าความเหมาะสมซึ่งรับค่าตำแหน่งปัจจุบันของอนุภาคเข้าไปเป็นข้อมูลเพื่อวัดค่าความเหมาะสมของตำแหน่งที่อนุภาคนั้นอยู่ว่าใกล้เคียงกับคำตอบที่ต้องการเพียงใด ด้วยแนวคิดในการเคลื่อนที่ของฝูงนกยามเมื่อหาอาหารเปรียบได้ดังพื้นที่ที่มีค่าความเหมาะสมมากคือพื้นที่ที่มีอาหารอุดมสมบูรณ์ และอนุภาคควรเคลื่อนที่โดยคำนึงถึงข้อมูลตรงส่วนนั้น จึงทำให้อนุภาคทุก ๆ ตัวจะต้องเก็บข้อมูลตำแหน่งที่ดีที่สุดของตนเอง ที่สามารถหาได้ตลอดช่วงเวลาการทำงานพร้อมกับข้อมูลของตำแหน่งที่ดีที่สุดเท่าที่สามารถหาได้จากอนุภาคทุก ๆ ตัว

ในทุก ๆ รอบการทำงานเวลา (t) ความเร็วของการเคลื่อนที่จะถูกเปลี่ยนแปลงโดยใช้ข้อมูลตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคแต่ละตัว (P_{best} : p_i) ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมด (G_{best} : p_g) ความเร็วของอนุภาคแต่ละตัวที่เปลี่ยนไปจะสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (3.56)

$$v_i(t+1) = w(t)v_i(t) + c_1r_1(p_i(t) - x_i(t)) + c_2r_2(p_g(t) - x_i(t)) \quad (3.56)$$

โดยค่า c_1 และ c_2 เป็นค่าคงที่มีค่าเป็นบวก ค่า ϕ_1 และ ϕ_2 เป็นตัวเลขที่ทำการสุ่มขึ้นมา มีค่าอยู่ในช่วง $[0, 1]$ ค่าความเร็วจะถูกกำหนดเอาไว้ไม่ให้เกินค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ($\pm v_{max}$) เพื่อจำกัดความเร็วไม่ให้มีค่าสูงเกินกว่าที่เป็นไปได้ ในทุก ๆ รอบการทำงาน อนุภาคจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งด้วยความเร็วที่มีอยู่ดังสมการที่ (3.57)

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t) \quad (3.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยสมการการเคลื่อนที่ของการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค ทำให้อนุภาคแต่ละตัว มีข้อมูลที่เชื่อมโยงถึงกันแม้ว่าอนุภาคแต่ละตัวจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่แตกต่างกันก็ตาม สิ่งนี้เป็นผลดีที่ทำให้การหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค มีความสมดุลในการค้นหาคำตอบระหว่างแบบใกล้เคียงและโดยรวม แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือ หากความเร็วในการเคลื่อนที่มีค่าน้อย การลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีจะทำได้ค่อนข้างช้า

การทำงานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคแสดงดังรูปที่ 3.17 อธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 รับข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ w , c_1 , c_2 และ $I_{ter,m}$

โดยที่ w เป็นน้ำหนักแรงเฉื่อย c_1 , c_2 เป็นค่าความคงที่อัตราเร่ง

$I_{ter,m}$ เป็นจำนวนรอบในการคำนวณสูงสุด

ขั้นตอนที่ 3 สร้างประชากรโดยสุ่มตำแหน่งเริ่มต้นให้ประชากร

ขั้นตอนที่ 4 ประมวลผลเพื่อหาคำตอบที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 5 ปรับปรุงค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาคแต่ละตัว (Pbest)

ขั้นตอนที่ 6 ปรับปรุงค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมด (Gbest)

ขั้นตอนที่ 7 ปรับปรุงน้ำหนักแรงเฉื่อย

ขั้นตอนที่ 8 ปรับปรุงความเร็วที่ทำให้ตำแหน่งเปลี่ยน

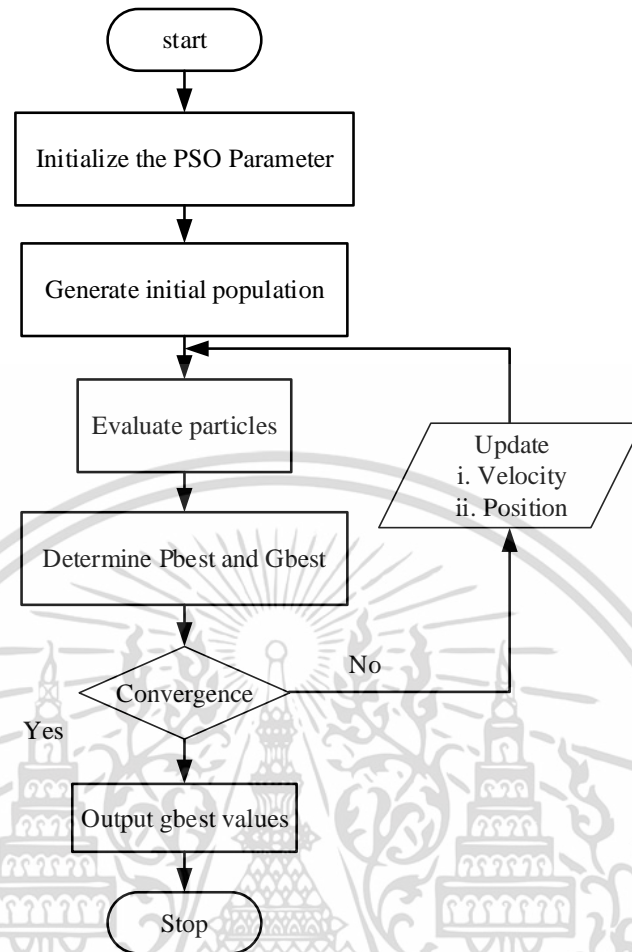
ขั้นตอนที่ 9 ปรับปรุงตำแหน่งที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 10 ถ้าเงื่อนไขการหยุดการทำงานสมบูรณ์ให้หยุดการวนซ้ำ แต่ถ้าเงื่อนไขการ

หยุดการทำงานไม่สมบูรณ์ ให้วนซ้ำกลับไปทำงานขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 11 ได้ค่าความเหมาะสมของอนุภาคที่ดีที่สุด เป็นผลเฉลยที่ได้ตรงตามเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการทำงานของ algorithm การหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

3.4 การหาความเร็วโดยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์

การวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ (motor current signature analysis, MCSA) [46] มีการพัฒนาโดย Oak Ridge National Laboratory (ORNL) เพื่อที่จะใช้ตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ขณะทำงานในอุปกรณ์ Motor Operated Valve (MOV) ที่ใช้ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ เพื่อหาความเร็วของมอเตอร์ในขณะที่ทำงานอยู่ [3,4] จากหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีสนามแม่เหล็กหมุนที่ เกิดจากขดลวดทางด้านสเตเตอร์ไปเกี่ยวคล้องกับแท่งตัวนำหรือขดลวดทางด้านโรเตอร์ จะทำให้เกิด

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น และสร้างแรงบิดมากระทำที่แท่งตัวนำหรือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดทำให้มอเตอร์หมุนได้ สำหรับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทางด้านโรเตอร์นั้นจะมีผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กซึ่งก็จะไปเกี่ยวคล้องกับขดลวดทางด้านสเตเตอร์เช่นกัน ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้า โดยจะมีความถี่เท่ากับความถี่ของโรเตอร์หรือความเร็วของโรเตอร์ในหน่วยรอบต่อวินาที จากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถที่จะตรวจสอบหาความเร็วของมอเตอร์ในขณะที่ทำงานอยู่ในช่วงปกติได้ โดยการสังเกตจากฮาร์โมนิกส์ของความถี่รอบข้าง (ความถี่ของความถี่เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ) เทียบกับความถี่มูลฐาน (ความถี่ของความถี่ซิงโครนัส) ถ้าพิจารณาเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะสังเกตจากฮาร์โมนิกส์ของความถี่รอบข้างที่มีค่าน้อยกว่าความถี่มูลฐาน แต่ถ้าพิจารณาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะสังเกตจากฮาร์โมนิกส์ของความถี่รอบข้างที่มีค่ามากกว่าความถี่มูลฐาน ในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยมีขั้นตอนดังนี้

สัญญาณกระแสของมอเตอร์ที่ขดลวดสเตเตอร์ประกอบด้วยสัญญาณความถี่ต่างๆ ดังนี้

$$i(t) = \left[k_1 + \sum_{m=2}^n k_m \cos(2\pi f_m t) \right] \cos(2\pi f_1 t) \quad (3.58)$$

การวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ที่ได้จากสมการที่ (3.58) เริ่มต้นจากการแยกกระจาย (demodulate) สัญญาณกระแสของมอเตอร์เป็นไปตามสมการ

$$i(t) = [k_1 + k_2 \cos(2\pi f_2 t) + k_3 \cos(2\pi f_3 t) + \dots + k_n \cos(2\pi f_n t)] \cos(2\pi f_1 t) \quad (3.59)$$

เมื่อ f_n เป็นความถี่ของสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ n และ k_n เป็นค่าคงที่ของสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ n โดยที่แหล่งจ่ายมีความถี่เท่ากับ f_1 จากสมการที่ (3.59) จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$i(t) = m(t) \cos(2\pi f_1 t) \quad (3.60)$$

โดยกำหนดให้ $m(t)$ เป็นขนาดของสัญญาณกระแสสเตเตอร์ ซึ่งจะมีค่าเป็นไปตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m(t) = k_1 + k_2 \cos(2\pi f_2 t) + k_3 \cos(2\pi f_3 t) + \dots + k_n \cos(2\pi f_n t) \quad (3.61)$$

จากนั้นทำการกรองความถี่โดยใช้ฟิลเตอร์แบบความถี่ต่ำผ่านได้ (low pass filter) โดยกำหนดให้ความถี่ตัด (cutoff frequency) มีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่แหล่งจ่าย เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนของเครื่องจักรไฟฟ้า ซึ่งจะได้สัญญาณกระแสไฟฟ้าเป็นดังนี้

$$i(t) \times i(t) = m(t)^2 \cos^2(2\pi f_1 t) \quad (3.62)$$

จากสมการที่ (3.62) จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$i(t)^2 = \frac{1}{2} m(t)^2 + \frac{1}{2} \cos(2 \times 2\pi f_1 t) m(t)^2 \quad (3.63)$$

จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลกระแสที่ได้จากสมการที่ (3.63) โดยใช้ FFT (Fast Fourier Transform) เพื่อพิจารณาหาตำแหน่งความถี่รอบข้าง (ต่ำกว่า) ที่มีค่าอยู่ระหว่างความเร็วของโรเตอร์เป็นหน่วยรอบต่อวินาทีต่ำสุด (f_{low}) กับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนเป็นหน่วยรอบต่อวินาที (f_{syn}) โดยที่ความเร็วของโรเตอร์ต่ำสุดกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 90% ของความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนจะขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) และความถี่ของแหล่งจ่าย (f_1) สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (3.64) และ (3.65) ตามลำดับ

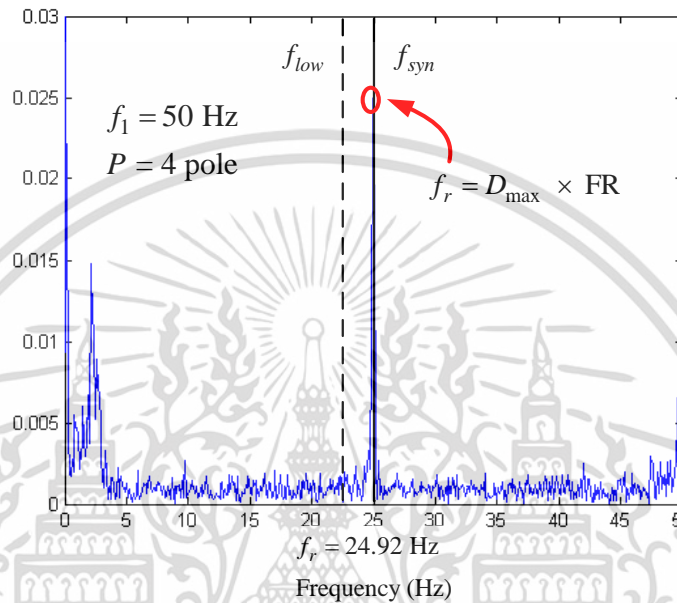
$$f_{low} = 0.9 f_{syn} \quad (3.64)$$

$$f_{syn} = \frac{2f_1}{P} \quad (3.65)$$

ความเร็วของโรเตอร์ในหน่วยรอบต่อวินาที (f_r) สามารถคำนวณได้จากตำแหน่งที่ทำให้มีค่าส่วนประกอบของกระแสสูงสุดหรือตำแหน่งที่ค่าฮาร์มอนิกของกระแสสูงสุด (D_{max}) กับความ

ละเอียดของความถี่ (frequency resolution ; FR) ดังสมการที่ (3.66) ซึ่งแสดงขั้นตอนการ
พิจารณาหาความถี่ของโรเตอร์ได้ดังรูปที่ 3.18

$$f_r = D_{\max} \times FR \quad (3.66)$$



รูปที่ 3.18 การพิจารณาหาความถี่ของโรเตอร์

จากนั้นสามารถนำมาคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์ได้จากสมการที่ (3.67)

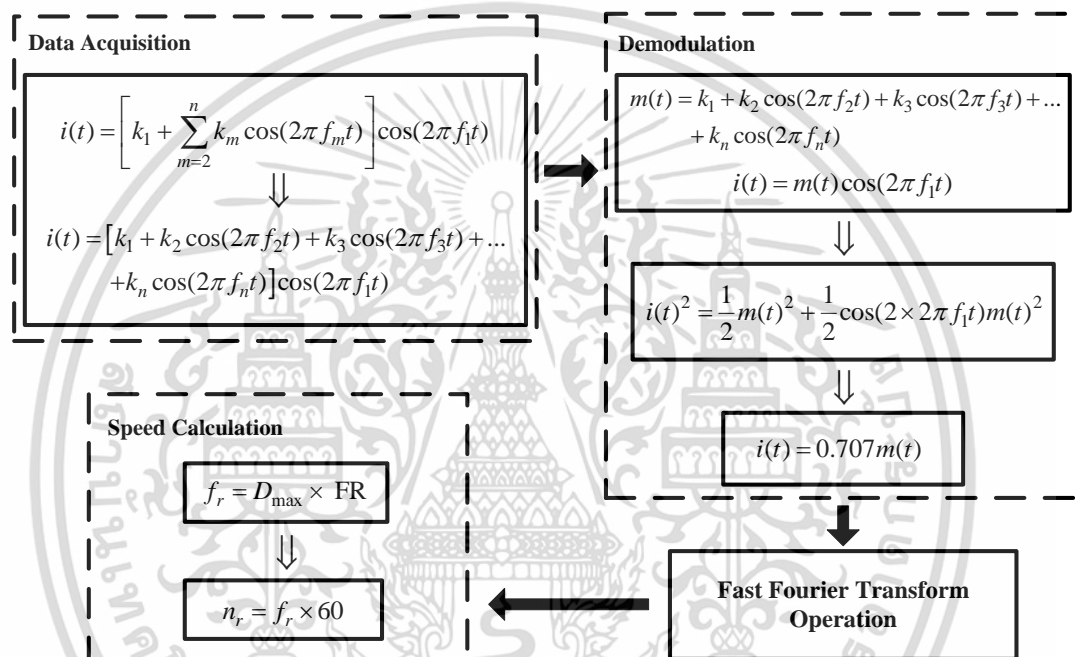
$$n_r = f_r \times 60 \quad (3.67)$$

ขั้นตอนการคำนวณความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแส
ของมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.19 ซึ่งมีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

1. เก็บข้อมูลมูลของสัญญาณกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน โดยกำหนดอัตรา
การซีกตัวอย่าง (sampling rate) ให้มีค่าต่ำ และจำนวนตัวอย่างมากหรือระยะเวลา
ในการเก็บตัวอย่างมาก เช่น กำหนดให้ อัตราการซีกตัวอย่าง เท่ากับ 1 kHz จำนวน
ตัวอย่างเท่ากับ 20,000 ข้อมูลหรือระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 20 s เป็นต้น

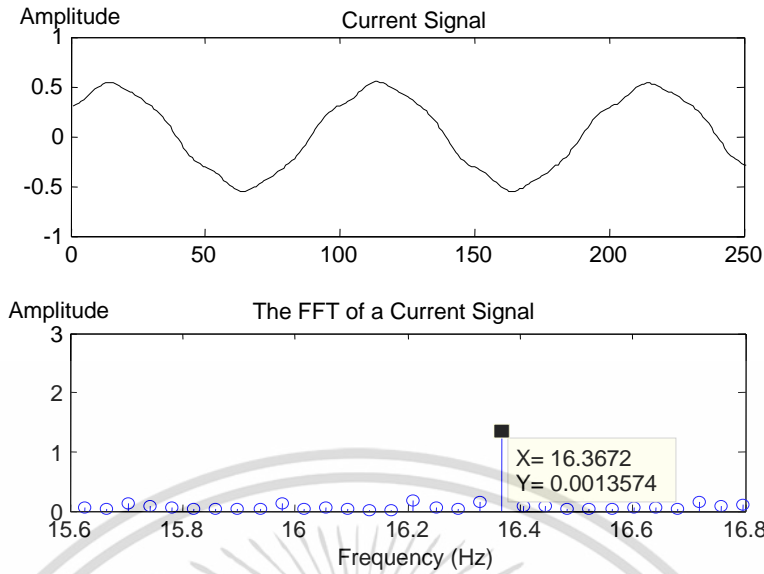
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำข้อมูลมาผ่านขั้นตอนการแยกกระจาย และการวิเคราะห์ข้อมูลกระแสที่ได้โดยใช้ FFT ตามสมการที่ (3.59) – (3.63)
3. พิจารณาหาตำแหน่งที่ข้อมูลมีค่าสูงสุด โดยที่ตำแหน่งที่พิจารณาอยู่ระหว่างความเร็วของโรเตอร์กับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน จากสมการที่ (3.64) – (3.65) ตามลำดับ
4. คำนวณหาความเร็วของมอเตอร์ ดังสมการที่ (3.66) – (3.67)

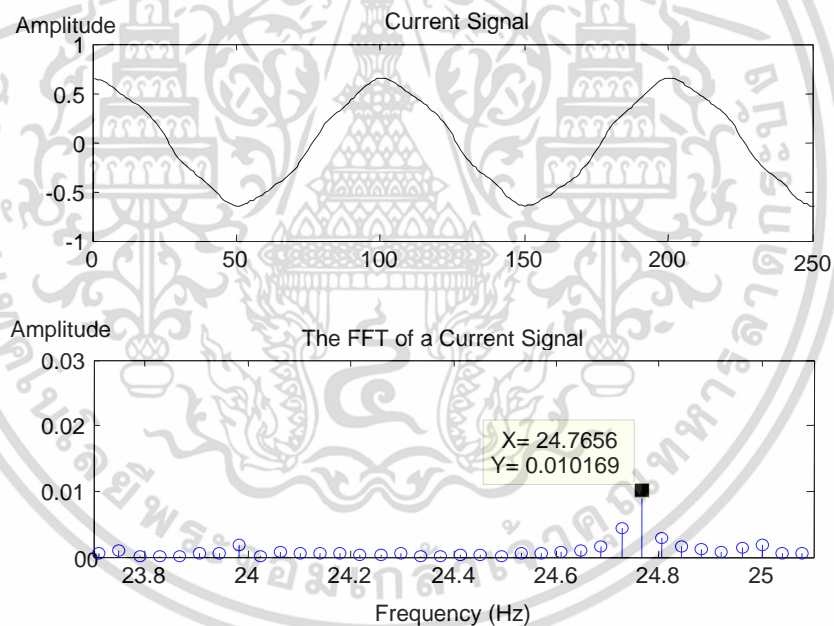


รูปที่ 3.19 การหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์

การวัดความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์สามารถใช้ประเมินความเร็วได้ทั้งกรณีที่แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายเป็นไซน์และเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2 rpm ซึ่งผู้เขียนวิทยานิพนธ์ได้มีการนำเสนอ งานวิจัย [47] จากตารางที่ 3.1 และ รูปที่ 3.20 แสดงข้อมูลในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายเป็น ไซน์ สำหรับตารางที่ 3.2 – 3.3 และ รูปที่ 3.21 - 3.22 แสดงข้อมูลในกรณีเมื่อขับเคลื่อนด้วย อินเวอร์เตอร์



n) 2.2 kW, 6-pole, 3-phase Induction motor at load torque 44.7 %



ข) 4.0 kW, 4-pole, 3-phase Induction motor at load torque 27.4 %

รูปที่ 3.20 โดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของสัญญาณกระแสที่ได้จากการวัดโดยวิธีการ

วิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์กรณีที่แหล่งจ่ายเป็นไซน์

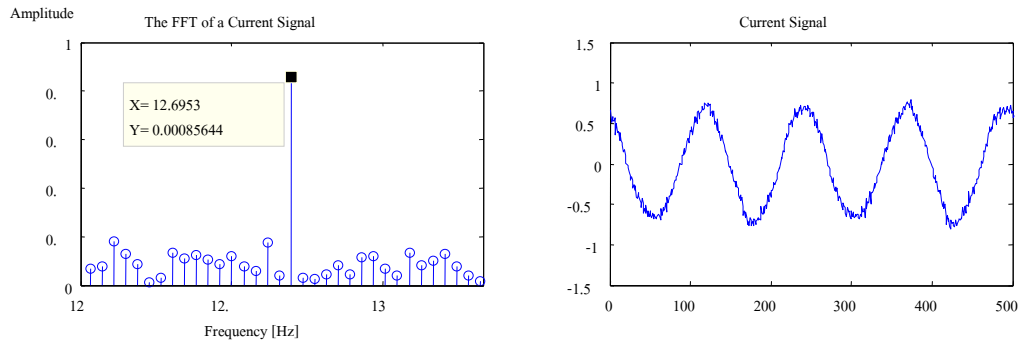
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดโดยตรงกับวิธีการวิเคราะห์

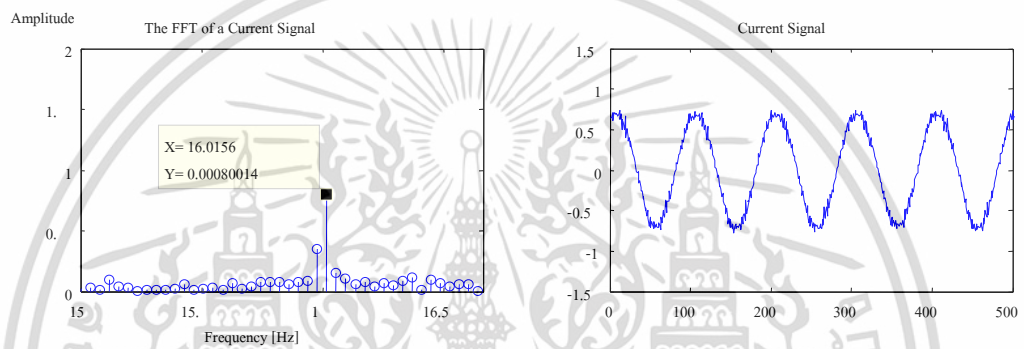
สัญญาณกระแสของมอเตอร์กรณีที่แหล่งจ่ายเป็นไซน์

2.2 kW, 6-pole, 3-phase Induction Motor, Line-fed at 50 Hz			
Load torque (%)	MCSA (rpm)	Measured (rpm)	Absolute Error (rpm)
24.5	991.40	989.7	1.70
44.7	982.03	982.2	- 0.17
64.9	970.31	970.3	0.01
85.9	958.59	959.4	0.81
107.0	942.18	942.7	- 0.52
4.0 kW, 4-pole, 3-phase Induction Motor, Line-fed at 50 Hz			
Load torque (%)	MCSA (rpm)	Measured (rpm)	Error (rpm)
27.4	1485.93	1486.6	- 0.67
38.2	1478.90	1476.8	2.10
49.4	1471.87	1471.3	0.57
61.3	1462.50	1462.6	- 0.10
72.8	1455.46	1454.2	1.26
85.5	1433.75	1444.3	- 0.55
94.1	1434.37	1433.5	0.87

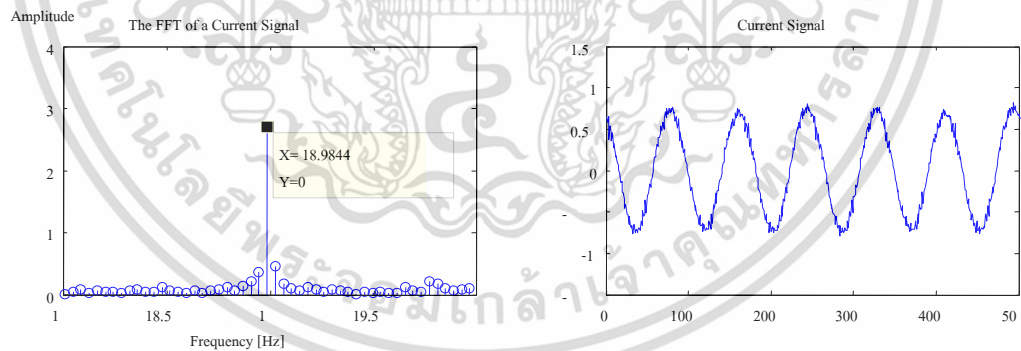
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) Inverter-fed at 40 Hz (nonsinusoidal)



ข) Inverter-fed at 50 Hz (nonsinusoidal)



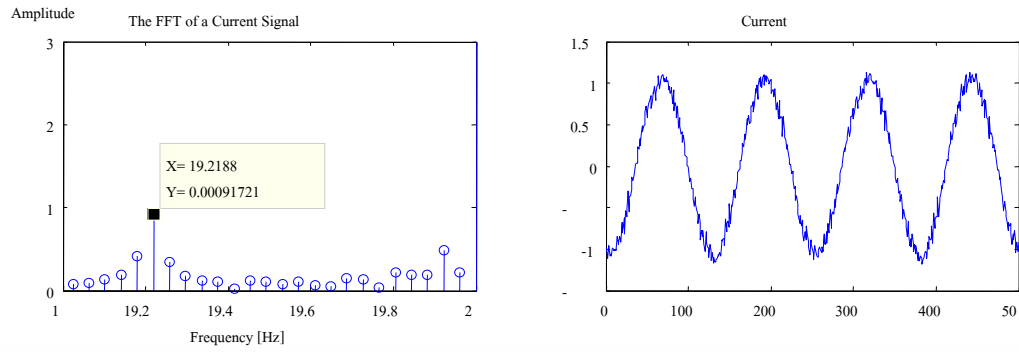
ค) Inverter-fed at 60 Hz (nonsinusoidal)

รูปที่ 3.21 โดเมนความถี่และโดเมนเวลาของสัญญาณกระแสที่ได้จากการวัดโดยวิธีการ

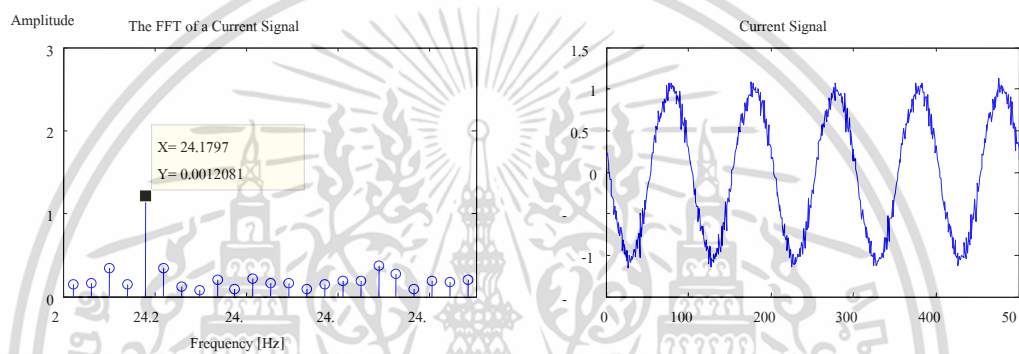
วิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์กรณีเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW, 6 ขั้วแม่เหล็ก ที่แรงบิด 83.40 % ของพิกัด

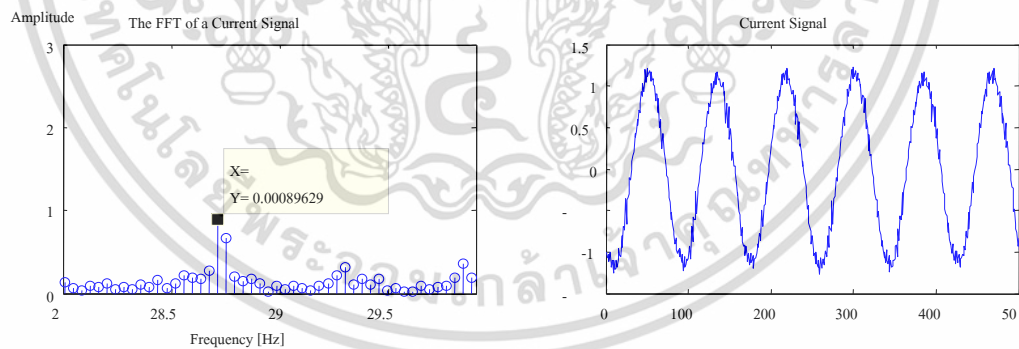
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) Inverter-fed at 40 Hz (nonsinusoidal)



ข) Inverter-fed at 50 Hz (nonsinusoidal)



ค) Inverter-fed at 60 Hz (nonsinusoidal)

รูปที่ 3.22 โดเมนความถี่และโดเมนเวลาของสัญญาณกระแสที่ได้จากการวัดโดยวิธีการ

วิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์กรณีเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก ที่แรงบิด 85.05 % ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW 6 ขั้วแม่เหล็ก ที่ได้จากการวัดโดยตรงกับวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์กรณีเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

Inverter-fed at 40 Hz			
Load torque (%)	MCSA (rpm)	Measured (rpm)	Error (rpm)
33.33	789.85	787.2	2.65
50.02	778.13	779.4	- 1.27
66.71	771.09	771.2	- 0.11
83.40	761.72	762.7	- 0.98
100.04	750.00	751.2	- 1.20
Inverter-fed at 50 Hz			
33.33	984.38	984.8	- 0.42
50.02	977.35	978.2	- 0.85
66.71	970.31	969.5	0.81
83.40	960.94	959.6	1.34
100.04	949.22	949.7	- 0.48
Inverter-fed at 60 Hz			
33.33	1178.90	1179.2	- 0.30
50.02	1167.19	1167.0	0.19
66.71	1155.47	1155.5	- 0.03
83.40	1139.06	1138.9	0.16
100.04	1120.31	1120.2	0.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก ที่ได้จากการวัดโดยตรงกับวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์กรณีเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

Inverter-fed at 40 Hz			
Load torque (%)	MCSA (rpm)	Measured (rpm)	Error (rpm)
34.00	1181.25	1181.7	- 0.45
51.00	1171.88	1171.6	0.28
68.05	1162.50	1161.0	1.50
85.05	1153.13	1152.6	0.53
102.05	1141.40	1141.8	- 0.40
Inverter-fed at 50 Hz			
34.00	1481.25	1481.2	0.05
51.00	1471.88	1470.8	1.08
68.05	1462.50	1461.2	1.30
85.05	1450.78	1451.9	- 1.12
102.05	1439.06	1438.5	0.56
Inverter-fed at 60 Hz			
34.00	1774.22	1773.5	0.72
51.00	1757.81	1757.7	0.11
68.05	1743.75	1743.2	0.55
85.05	1722.65	1723.6	- 0.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน

การพัฒนาวิธีการสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งานให้มีคุณลักษณะดังนี้ คือ มีขั้นตอนหรือกระบวนการที่ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 3 % และสามารถนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทั้งในกรณีขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าปกติและเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ หลักการวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งานจะทำงานอยู่บนพื้นฐานของวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลสามารถประมวลโดยใช้หลักการการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม ร่วมกับข้อมูลทางไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า) และความเร็วของมอเตอร์ ที่ได้จากวัดในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงาน

หลักการสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะใช้งาน อธิบายและแสดงขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 3.23 ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ข้อมูลของมอเตอร์จากป้ายพิกัดและ ข้อมูลของมอเตอร์ที่ได้จากวัดในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงาน (แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า และความเร็ว)

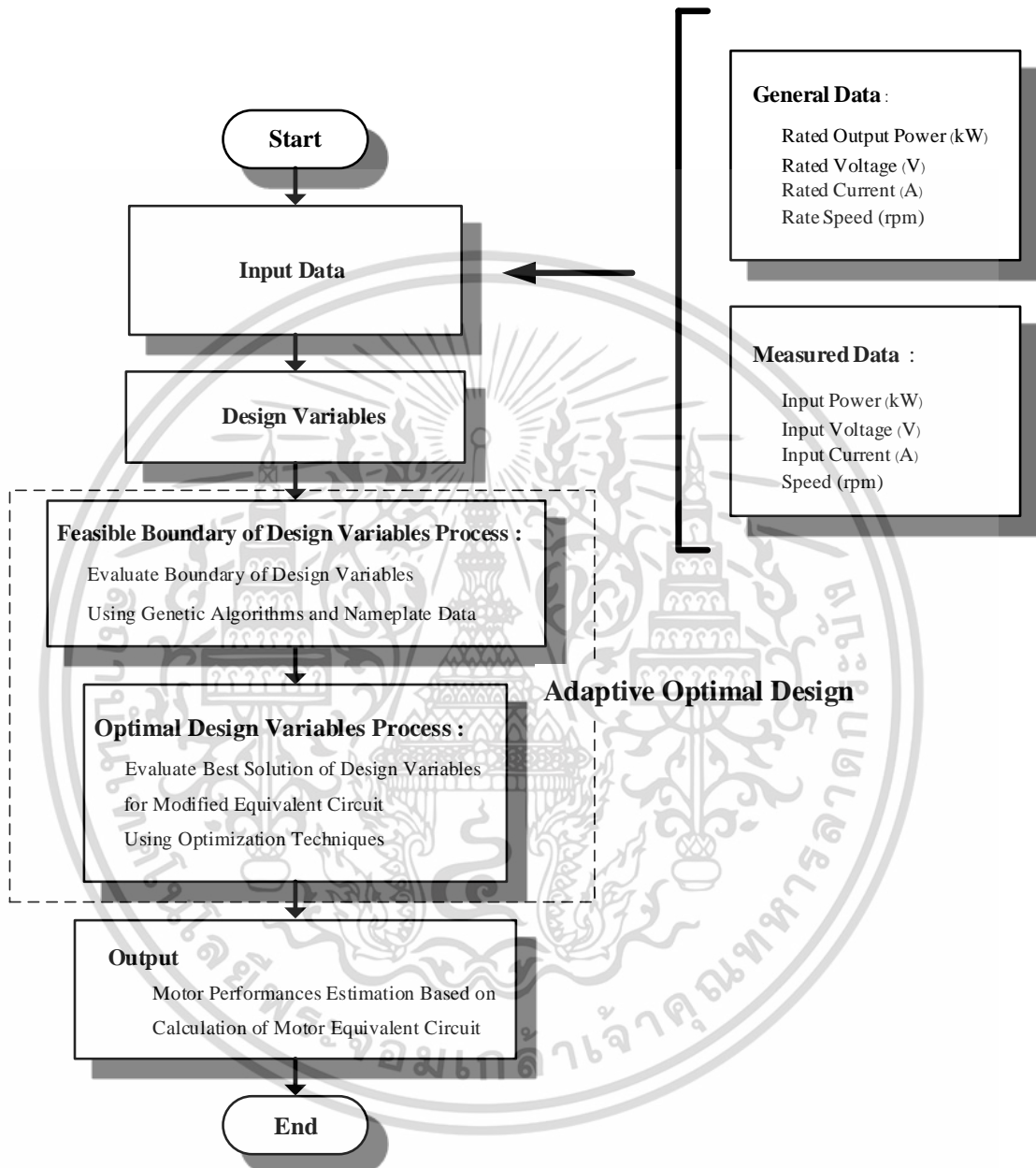
ขั้นตอนที่ 2 กำหนดตัวแปรที่ต้องการออกแบบ (พารามิเตอร์ของวงจรสมมูล)

ขั้นตอนที่ 3 ประมวลผลเพื่อหาขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรที่ต้องการออกแบบ โดยใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรมร่วมกับข้อมูลของมอเตอร์จากป้ายพิกัด

ขั้นตอนที่ 4 ประมวลผลเพื่อหาตัวแปรที่ต้องการออกแบบ (พารามิเตอร์ของวงจรสมมูล) ที่ดีที่สุด โดยใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม หรือ แบบกลุ่มอนุภาคร่วมกับข้อมูลของมอเตอร์ที่ได้จากวัดในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5 ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะใช้งาน โดยการ
คำนวณจากวงจรสมมูลที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 4



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างง่าย

จากขั้นตอนของการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างง่าย จะพบว่า

หลักการดังกล่าวจะเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยไม่ต้องทำ

การทดสอบมอเตอร์แบบมาตรฐาน เช่น การทดสอบหาความต้านทานขดลวด การทดสอบแบบไม่มี
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาระทางกล หรือ การทดสอบแบบจับยึดโรเตอร์ แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอหลักการการประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลในสภาวะคงที่ (steady state) ซึ่งรายละเอียดจะนำเสนอในเนื้อหาของบทที่ 4 และบทที่ 5

3.6 สรุป

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในบทนี้ได้นำเสนอ หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมีขั้นตอนหรือกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและรบกวนการทำงานของระบบน้อยที่สุด แต่มีความแม่นยำสูงหรือคลาดเคลื่อนน้อย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดไว้ให้ความคลาดเคลื่อนประมาณ 3 % และวิธีการดังกล่าวยังสามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสจะประเมินประสิทธิภาพในกรณีขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายปกติ ส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะประเมินประสิทธิภาพทั้งในกรณีขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายปกติและเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

หลักการของวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานโดยใช้ข้อมูลจากการวัด จะทำงานอยู่บนพื้นฐานของวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้หลักการการหาค่าที่เหมาะสมร่วมกับข้อมูลทางไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า) และความเร็วโรเตอร์ ที่ได้จากวัดในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงาน เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล สำหรับคำนวณหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะที่ทำงาน

การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ขณะใช้งานเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซนส์

4.1 บทนำ

แนวทางที่เหมาะสมในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งาน [48] มีลักษณะดังนี้ คือ มีขั้นตอนหรือกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนเพื่อที่จะสามารถใช้งานได้สะดวก และมีความแม่นยำทำให้ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้พลังงานมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งจะส่งผลต่อการตัดสินใจในการบริหารจัดการพลังงาน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการที่ไม่ยุ่งยากในประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานจริง (field efficiency) โดยใช้วงจรสมมูลที่ปรับปรุงโดยใช้แนวความคิดจากต้นแบบความสูญเสีย (losses model) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งพารามิเตอร์ทุกตัวของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงจะได้อาจมาจากการประมาณโดยไม่ต้องทำการทดสอบใด ๆ แต่จะใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัดและข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงาน (แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุท กำลังไฟฟ้าอินพุท และความเร็วมอเตอร์) [49] ร่วมกับวิธีการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว (AOD) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุง ข้อดีของวิธีการที่นำเสนอนี้คือ สามารถใช้งานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบแรงดันต่ำได้หลากหลายพิกัดและตลอดย่านการใช้งาน ทั้งนี้เพราะวิธีการนี้จะมีการกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ (พารามิเตอร์ของวงจรสมมูล) ที่สามารถปรับเปลี่ยนขอบเขตของตัวแปรออกแบบให้เหมาะสมกับพิกัดของมอเตอร์โดยอัตโนมัติ สำหรับในบางกรณีที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน ไม่สามารถวัดความเร็วได้โดยตรง เช่น ระบบระบายอากาศ ระบบปั้มน้ำ เป็นต้น วิธีการที่นำเสนอนี้ก็สามารถพิจารณาหาความเร็วมอเตอร์ได้โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ (MCSA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

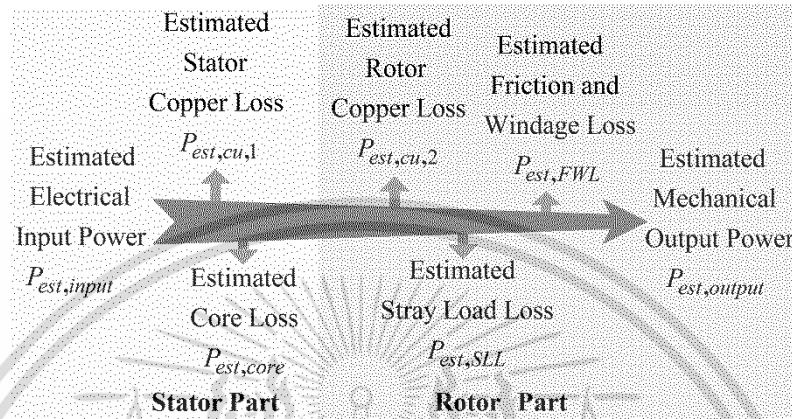
ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย วงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ การออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว ผลการทดสอบและวิเคราะห์ รวมทั้งการใช้วิธีการที่นำเสนอร่วมกับการหาความเร็วโดยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์ สำหรับวิธีการที่นำเสนอจะมีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3% เนื่องจากใช้หลักการของวงจรสมมูลเช่นเดียวกันกับวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตามมาตรฐาน IEEE Std 112 method F/F1 ซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3% [11]

4.2 วงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

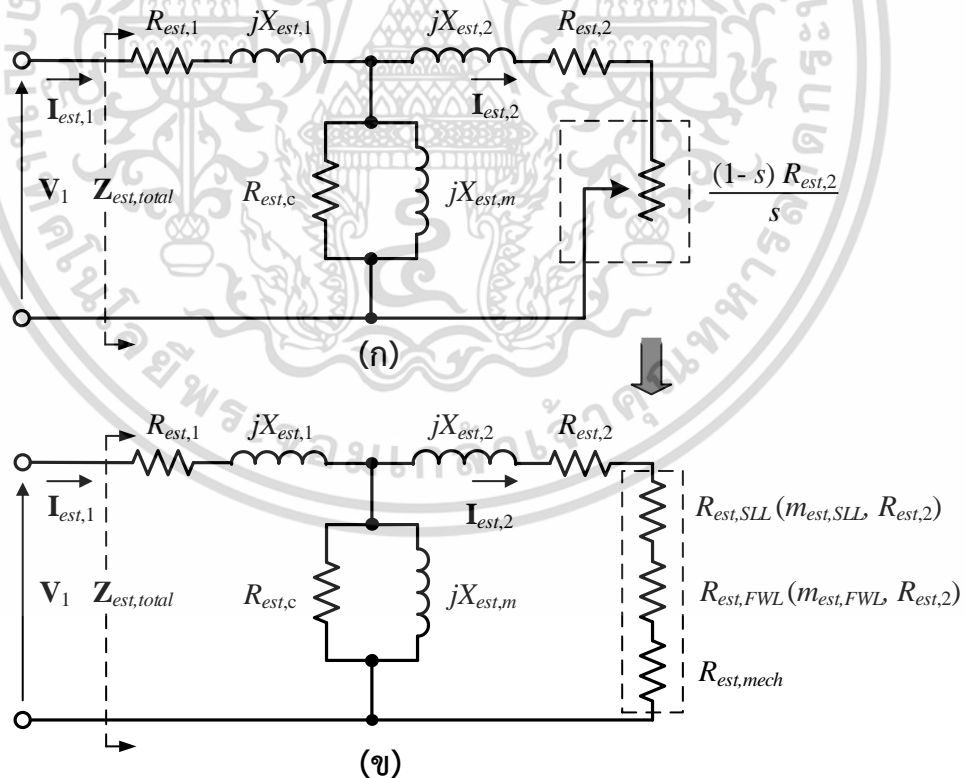
จากวงจรสมมูลตามมาตรฐาน IEEE Std 112 method F/F1 ที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.2.1 แสดงดังรูปที่ 3.6 ประกอบด้วย 6 พารามิเตอร์ จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์เหล่านี้ยังไม่สามารถแสดงถึงความสูญเสียจริงที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ และเมื่อพิจารณาการไหลของกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปที่ 3.7 พบว่าภายในวงจรสมมูลตามมาตรฐาน IEEE Std 112 method F/F1 ไม่มีการพิจารณาผลของความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล และค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม แต่จะได้จากการทดสอบตามที่กำหนดตามมาตรฐาน IEEE Std 112 ซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก โดยจะนำค่าประสิทธิภาพที่ได้มาทำการปรับแก้ไข (correction) ตามขั้นตอนการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE Std 112 method F/F1 เพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้น แต่ยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานอยู่ในระบบ ดังนั้นแนวคิดในวิทยานิพนธ์นี้จะอ้างอิงการไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 3.7 โดยไม่ต้องทำการทดสอบใด ๆ แต่ค่าความสูญเสียทั้งหมดจะได้อาจมาจากการประมาณ และสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบ “ต้นแบบความสูญเสีย” ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงการไหลของกำลังโดยประมาณในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ประกอบด้วยความสูญเสีย 5 ส่วน ได้แก่ ค่าความสูญเสียที่ขดลวดทางด้านสเตเตอร์โดยประมาณ

(estimated stator copper loss) ค่าความสูญเสียที่ขดลวดทางด้านโรเตอร์โดยประมาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูแลเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(estimated rotor copper loss) ค่าความสูญเสียที่แกนเหล็กโดยประมาณ (estimated core loss) ความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกลโดยประมาณ (estimated stray-load loss) และความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลมโดยประมาณ (estimated friction and windage loss)



รูปที่ 4.1 ต้นแบบความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลที่ปรับปรุงต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากต้นแบบความสูญเสียในรูปที่ 4.1 สามารถนำมาจัดความสัมพันธ์ใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของวงจรสมมูลใหม่ดังรูปที่ 4.2 โดยการแทนความสูญเสียที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปพารามิเตอร์ของความต้านทานไฟฟ้า ส่วนทางด้านสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปของรีแอกแตนซ์ จากรูปที่ 4.2 ก) แสดงพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ปรับปรุง เมื่อ $R_{est,1}$, $X_{est,1}$, $R_{est,2}$, $X_{est,2}$, $R_{est,c}$ และ $X_{est,m}$ เป็น ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดทางด้านสเตเตอร์โดยประมาณ (estimated stator resistance) รีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วทางด้านสเตเตอร์โดยประมาณ (estimated stator leakage reactance) ความต้านทานไฟฟ้าขดลวดทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงด้านสเตเตอร์โดยประมาณ (estimated rotor resistance) รีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์โดยประมาณ (estimated rotor leakage reactance) ความต้านทานไฟฟ้าจากความสูญเสียที่แกนเหล็กโดยประมาณ (estimated core loss resistance) และรีแอกแตนซ์จากการสร้างสนามแม่เหล็กโดยประมาณ (estimated magnetizing reactance) ตามลำดับ จากแนวคิดต้นแบบความสูญเสียทำการปรับปรุงวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยพิจารณาเพิ่มผลของความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม และความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล เพื่อให้วงจรมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแสดงพฤติกรรมได้ใกล้เคียงสภาพจริง และเพิ่มความแม่นยำในการประเมินหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยนำเสนอแนวคิดว่าเป็นการต่ออนุกรมกันระหว่างความต้านทานไฟฟ้าของความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกลโดยประมาณ (estimated stray-load loss resistance, $R_{est,SLL}$) กับความต้านทานไฟฟ้าของความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลมโดยประมาณ (estimated friction and windage loss resistance, $R_{est,FWL}$) และ ความต้านทานไฟฟ้าของกำลังเอาต์พุตทางกลโดยประมาณ (estimated mechanical power resistance, $R_{est,mech}$) แสดงดังรูปที่ 4.2 ข) ซึ่งจะเรียกวงจรสมมูลดังกล่าวว่า “วงจรสมมูลที่ปรับปรุง (modified equivalent circuit)” ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

สำหรับความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกลตามมาตรฐาน IEEE Std 112 สามารถพิจารณาหาได้ 2 วิธี ได้แก่ การทดสอบโดยตรงซึ่งมีขั้นตอนในการทดสอบที่มีความยุ่งยาก และการกำหนดค่าโดยจะพิจารณาความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกลให้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของกระแสโรเตอร์ [13] หรือเป็นฟังก์ชันกำลังสองของกระแสสเตเตอร์ [50] - [52] สำหรับความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับสัดส่วนของกำลังสามของอัตราส่วนระหว่างความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์กับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ที่พิกัดทางกล [52], [53] ดังนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้าของความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกลโดยประมาณ และความต้านทานไฟฟ้าของความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลมโดยประมาณได้ดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ

$$R_{est,SLL}(m_{est,SLL}, R_{est,2}) = m_{est,SLL} \frac{(1-s_{fl})R_{est,2}}{s_{fl}} \quad (4.1)$$

$$R_{est,FWL}(m_{est,FWL}, R_{est,2}) = m_{est,FWL} a_{FWL} \left(\frac{n_r}{n_{fl}} \right)^3 \frac{(1-s_{fl})R_{est,2}}{s_{fl}} \quad (4.2)$$

เมื่อ $m_{est,SLL}$ และ $m_{est,FWL}$ เป็นพารามิเตอร์โดยประมาณต่อหน่วยของความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกลและความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม ตามลำดับ a_{FWL} เป็นอัตราส่วนของกระแสโรเตอร์ที่พิกัดกับกระแสโรเตอร์ขณะใช้งาน s_{fl} เป็นค่าสลลิปที่พิกัดภาระทางกล n_{fl} และ n_r เป็นความเร็วมอเตอร์ที่พิกัดและความเร็วมอเตอร์ขณะใช้งาน ตามลำดับ

จากวงจรสมมูลที่ปรับปรุงดังรูปที่ 4.2 ข) สามารถแสดงพารามิเตอร์ของกำลังโรเตอร์เอาท์พุทโดยประมาณ (estimated rotor output parameter) ได้ดังนี้

$$\frac{(1-s)R_{est,2}}{s} = R_{est,SLL}(m_{est,SLL}, R_{est,2}) + R_{est,FWL}(m_{est,FWL}, R_{est,2}) + R_{est,mech} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และพารามิเตอร์ของกำลังทางกลโดยประมาณ

$$R_{est,mech} = \frac{(1-s)R_{est,2}}{s} - R_{est,SLL}(m_{est,SLL}, R_{est,2}) - R_{est,FWL}(m_{est,FWL}, R_{est,2}) \quad (4.4)$$

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์รวมโดยประมาณ ($Z_{est,total}$) ของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$Z_{est,1} = R_{est,1} + jX_{est,1} \quad (4.5)$$

$$Z_{est,2} = R_{est,mech} + R_{est,SLL}(m_{est,SLL}, R_{est,2}) + R_{est,FWL}(m_{est,FWL}, R_{est,2}) + R_{est,2} + jX_{est,2} \quad (4.6)$$

$$Z_{est,total} = Z_{est,1} + \frac{Z_{est,2} \left(\frac{R_{est,c} jX_{est,m}}{R_{est,c} + jX_{est,m}} \right)}{Z_{est,2} + \left(\frac{R_{est,c} jX_{est,m}}{R_{est,c} + jX_{est,m}} \right)} \quad (4.7)$$

ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าโดยประมาณ (PF_{est}) สามารถคำนวณได้จาก $Z_{est,total}$ ดังนี้

$$PF_{est} = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(Z_{est,total})}{\text{Re}(Z_{est,total})} \right) \right) \quad (4.8)$$

และเฟสเซอร์ของกระแสไฟฟ้าอินพุตโดยประมาณ ($I_{est,1}$) และกำลังไฟฟ้าอินพุตโดยประมาณ ($P_{est,input}$) สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$I_{est,1} = \frac{V_1}{Z_{est,total}} \quad (4.9)$$

$$P_{est,input} = 3V_1 I_{est,1} (PF_{est}) \quad (4.10)$$

เมื่อ V_1 และ $I_{est,1}$ เป็นค่าประสิทธิภาพผลของแรงดันไฟฟ้าอินพุตต่อเฟส และกระแสไฟฟ้าอินพุต โดยประมาณ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟสเซอร์ของกระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์โดยประมาณต่อเฟส $I_{est,2}$ สามารถคำนวณหาได้จาก

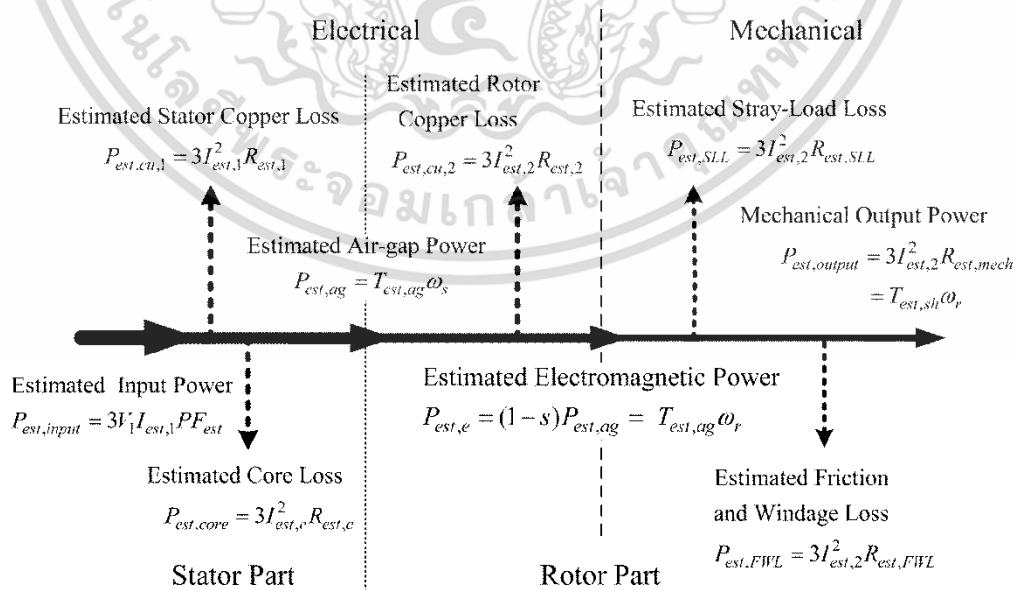
$$I_{est,2} = \frac{I_{est,1} \left(\frac{R_{est,c} jX_{est,m}}{R_{est,c} + jX_{est,m}} \right)}{Z_{est,2} + \left(\frac{R_{est,c} jX_{est,m}}{R_{est,c} + jX_{est,m}} \right)} \quad (4.11)$$

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ปรับปรุงดังรูปที่ 4.2 ข) เมื่อนำมาสรุปสมการของต้นแบบความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสดังรูปที่ 4.3 ได้ดังนี้

$$P_{est,cu,1} = 3I_{est,1}^2 R_{est,1}, \quad P_{est,core} = 3I_{est,c}^2 R_{est,c} \quad (4.12)$$

$$P_{est,ag} = P_{input} - P_{est,cu,1} - P_{est,core} = T_{est,ag} \omega_s \quad (4.13)$$

เมื่อ $P_{est,cu,1}$ และ $P_{est,core}$ เป็นค่าประมาณของความสูญเสียในขดลวดทองแดงทางด้านสเตเตอร์ และความสูญเสียของแกนเหล็ก ตามลำดับ $I_{est,c}$ แทนกระแสไฟฟ้าโดยประมาณที่ทำให้เกิดความสูญเสียของแกนเหล็ก $P_{est,ag}$ และ $T_{est,ag}$ แทนค่าประมาณของกำลังที่ช่องอากาศและแรงบิดที่เกิดในช่องอากาศ ตามลำดับ และ ω_s เป็นความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของต้นแบบความสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{est,cu,2} = 3I_{est,2}^2 R_{est,2} \quad (4.14)$$

$$P_{est,e} = P_{est,ag} - P_{est,cu,2} = (1-s)P_{est,ag} = T_{est,e}\omega_r \quad (4.15)$$

$$P_{est,SLL} = 3I_{est,2}^2 R_{est,SLL} (m_{est,SLL} R_{est,2}) \quad (4.16)$$

$$P_{est,FWL} = 3I_{est,2}^2 R_{est,FWL} (m_{est,FWL} R_{est,2}) \quad (4.17)$$

$$P_{est,output} = P_{est,e} - P_{est,SLL} - P_{est,FWL} = 3I_{est,2}^2 R_{est,mech} \quad (4.18)$$

$$T_{est,sh} = \frac{P_{est,output}}{\omega_r} \quad (4.19)$$

เมื่อ $P_{est,e}$ และ $T_{est,e}$ เป็นค่าประมาณของกำลังทางแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า ตามลำดับ $P_{est,cu,2}$, $P_{est,SLL}$ และ $P_{est,FWL}$ หมายถึงค่าประมาณของความสูญเสียในขดลวดทางด้าน โรเตอร์ ความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล และความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม ตามลำดับ $P_{est,output}$ และ $T_{est,sh}$ แทนค่าประมาณกำลังเอาต์พุตและแรงบิดที่เพลลา ตามลำดับ ส่วน $I_{est,2}$ หมายถึง กระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ต่อเฟสโดยประมาณ และ ω_r เป็นความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ ดังนั้นประสิทธิภาพโดยประมาณของมอเตอร์สามารถหาได้ดังนี้

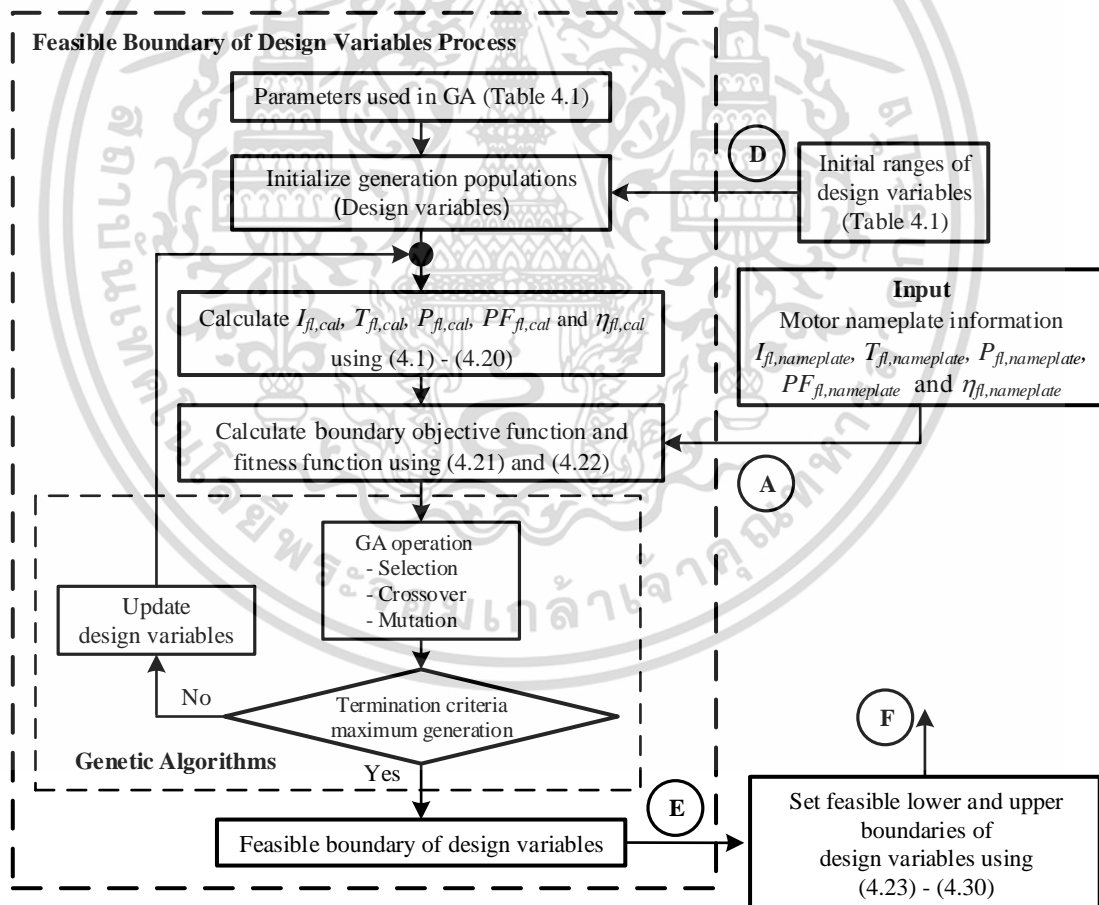
$$\eta_{est} = \frac{P_{est,output}}{P_{est,input}} \quad (4.20)$$

4.3 ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมนั้นจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากจะขึ้นอยู่กับขั้นตอนของวิธีการเองแล้ว ยังขึ้นอยู่กับข้อกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบ เพราะถ้ากำหนดช่วงของขอบเขตกว้างเกินไปก็จะทำให้เวลาในการประมวลผลเพิ่มขึ้น หรือถ้ากำหนดช่วงของขอบเขตแคบเกินไป อาจจะทำให้ไม่ครอบคลุมขอบเขตที่เป็นไปได้ของคำตอบ ทำให้ไม่สามารถหาคำตอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าผู้ใช้งานยังไม่มีประสบการณ์ในการกำหนดขอบเขตของปัญหา อาจจะทำให้เสียเวลา เนื่องจากต้องลองผิด ลองถูก นอกจากนั้นขอบเขตที่กำหนดจะต้องทำให้คำตอบของปัญหาเป็นจริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นการกำหนดขอบเขตจึงมีผลต่อการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหา ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแนวทางที่ช่วยให้ได้ขอบเขตที่เป็นจริงของระบบ โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานของระบบร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมในการกำหนดขอบเขต ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ข้อมูลของป้ายพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำร่วมกับวิธีการที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม วิธีการดังกล่าวเรียกชื่อว่า “ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ (feasible boundary of design variables process)” มีขั้นตอนการทำงานดังนี้



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้

Parameters of GA			
Number of Population	20,000	Crossover function	Heuristic Crossover
Number of Generation	200	Mutation function	Non-uniform mutation
Selection Function	Normalized Geometric	Variables	8

Initial range of design variables			
Parameters	Ranges	Parameters	Ranges
$R_{est,1} (\Omega)$	0.001 - 20	$X_{est,1} (\Omega)$	0.01 - 20
$X_{est,m} (\Omega)$	1 - 2000	$R_{est,c} (\Omega)$	1 - 2000
$X_{est,2} (\Omega)$	0.01 - 20	$R_{est,2} (\Omega)$	0.001 - 10
$m_{est,SLL} (p.u.)$	0.001 - 0.05	$m_{est,FWL} (p.u.)$	0.001 - 0.05

- ขั้นตอนที่ 1) กำหนดข้อมูลเริ่มต้นและขอบเขตเริ่มต้นของวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ ดังตารางที่ 4.1 และการกำหนดตัวแปรออกแบบสำหรับวงจรสมมูลที่ปรับปรุง ได้แก่ $R_{est,1}$, $X_{est,1}$, $X_{est,m}$, $R_{est,c}$, $X_{est,2}$, $R_{est,2}$, $m_{est,SLL}$ และ $m_{est,FWL}$
- ขั้นตอนที่ 2) จากรูปที่ 4.4 กำหนดให้มอเตอร์ทำงานที่พิกัดทางกล โดยกำหนดให้ความเร็วมีค่าเท่ากับป้ายพิกัด จากนั้นคำนวณกระแสไฟฟ้าอินพุตที่พิกัด (I_{fl}) แรงบิดที่พิกัด (T_{fl}) กำลังไฟฟ้าอินพุตที่พิกัด (P_{fl}) ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่พิกัด (PF_{fl}) และประสิทธิภาพที่พิกัด (η_{fl}) โดยใช้ค่าตัวแปรออกแบบที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากข้อมูลของป้ายพิกัด (\mathbf{A}) โดยใช้สมการเป้าหมาย ($F_{obj, boundary}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
F_{obj, boundary} = & \frac{1}{2} \left[\frac{I_{fl,cal}}{I_{fl,nameplate}} - 1 \right]^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{T_{fl,cal}}{T_{fl,nameplate}} - 1 \right]^2 \\
& + \frac{1}{2} \left[\frac{P_{fl,cal}}{P_{fl,nameplate}} - 1 \right]^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{PF_{fl,cal}}{PF_{fl,nameplate}} - 1 \right]^2 \\
& + \frac{1}{2} \left[\frac{\eta_{fl,cal}}{\eta_{fl,nameplate}} - 1 \right]^2
\end{aligned} \tag{4.21}$$

เมื่อ ตัวห้อย *cal* หมายถึง ค่าที่ได้จากการคำนวณ และ *nameplate* หมายถึง ค่าที่ได้จากการป้ายข้อมูล หรือข้อมูลจากผู้ผลิต และขอบเขตตัวแปรออกแบบที่เป็นไปได้ (**E**) สามารถประมวลผลด้วยวิธีการที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม โดยให้ฟังก์ชันความเหมาะสม จากสมการที่ (4.22) มีค่าสูงสุด

$$Fitness = \frac{1}{1 + F_{obj, boundary}} \tag{4.22}$$

ขั้นตอนที่ 3) จากนั้น กำหนดขอบเขตต่ำสุดและขอบเขตสูงสุดของตัวแปรออกแบบสำหรับวงจรมุมที่ปรับปรุงที่เป็นไปได้ (**F**) ดังนี้

$$R_{est,1,lower} \leq R_{est,1} \leq R_{est,1,upper} \tag{4.23}$$

$$X_{est,1,lower} \leq X_{est,1} \leq X_{est,1,upper} \tag{4.24}$$

$$R_{est,2,lower} \leq R_{est,2} \leq R_{est,2,upper} \tag{4.25}$$

$$X_{est,2,lower} \leq X_{est,2} \leq X_{est,2,upper} \tag{4.26}$$

$$R_{est,c,lower} \leq R_{est,c} \leq R_{est,c,upper} \tag{4.27}$$

$$X_{est,m,lower} \leq X_{est,m} \leq X_{est,m,upper} \tag{4.28}$$

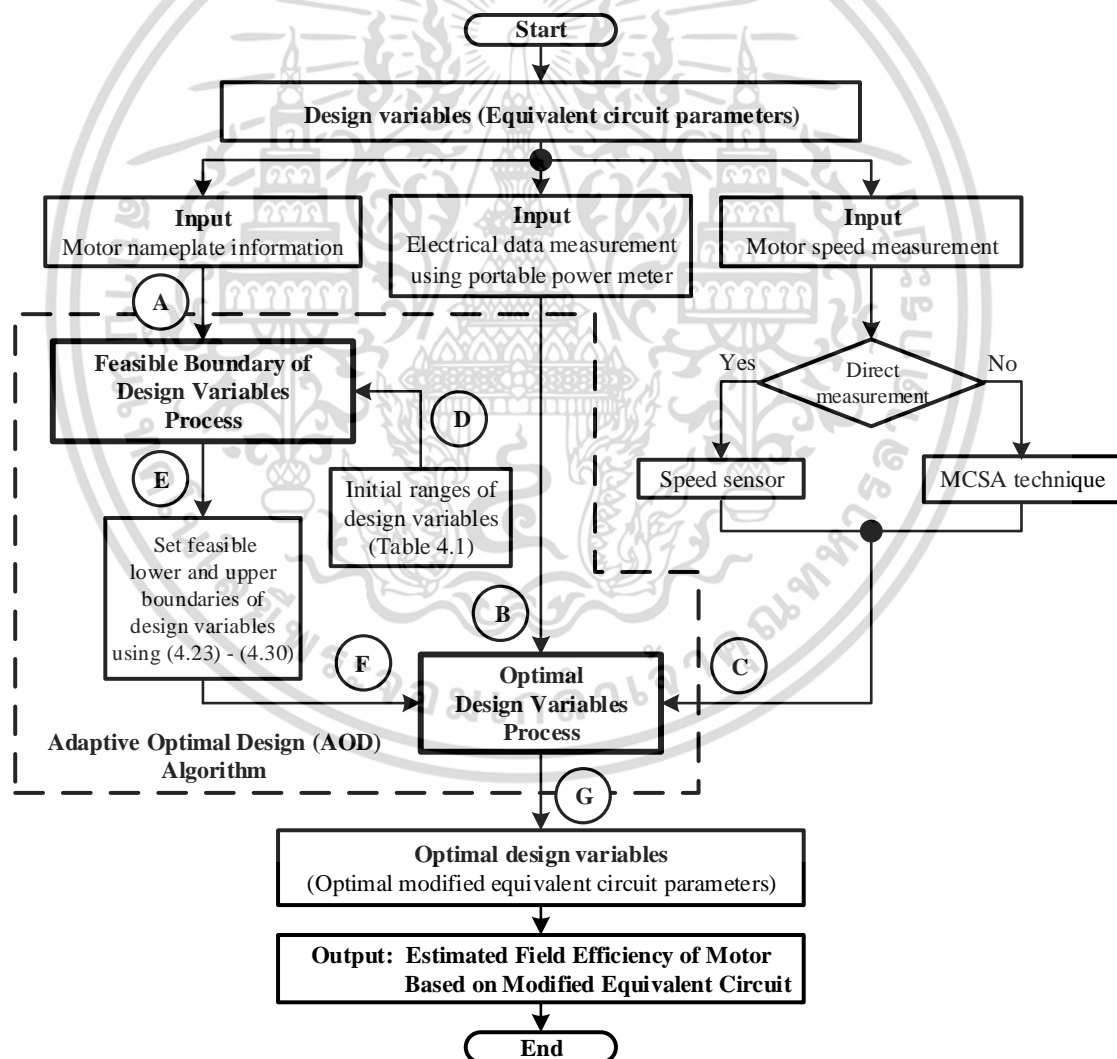
$$m_{est,SLL,lower} \leq m_{est,SLL} \leq m_{est,SLL,upper} \tag{4.29}$$

$$m_{est,FWL,lower} \leq m_{est,FWL} \leq m_{est,FWL,upper} \tag{4.30}$$

เมื่อ ตัวห้อย *lower* และ *upper* หมายถึง ขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดของตัวแปรออกแบบ ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอวิธีการสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเงื่อนไขการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น ที่ภาระทางกลต่างๆ เปลี่ยนพิกัดมอเตอร์หรือประเภทของแหล่งจ่าย โดยไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบ เรียกวิธีการที่นำเสนอว่า “การออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว (adaptive optimal design : AOD)” ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ และขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม (optimal design variables process) แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนของการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว (AOD)

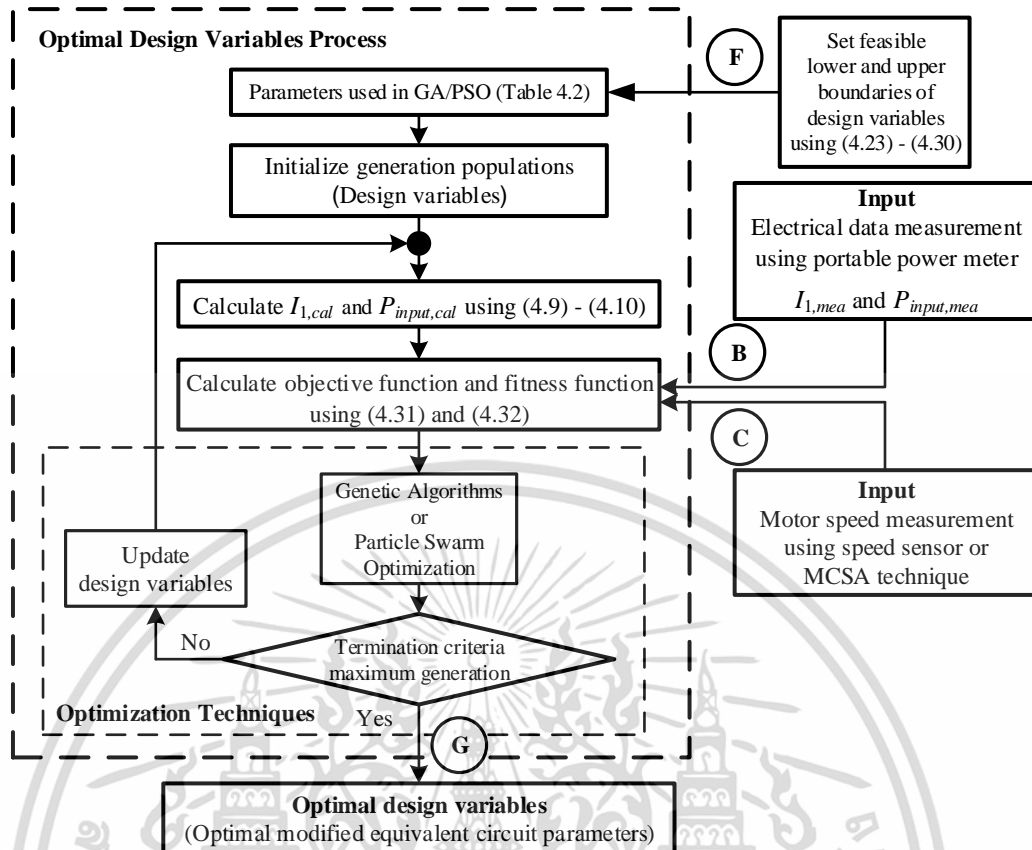
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดตัวแปรออกแบบ สำหรับวงจรสมมูลที่ปรับปรุง ได้แก่ $R_{est,1}$, $X_{est,1}$, $X_{est,m}$, $R_{est,c}$, $X_{est,2}$, $R_{est,2}$, $m_{est,SLL}$ และ $m_{est,FWL}$ จากนั้นป้อนข้อมูลของมอเตอร์จากป้ายพิกัด (A) และข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าอินพุท และความเร็วของมอเตอร์ (B และ C) โดยข้อมูลทางไฟฟ้าจะวัดด้วยเครื่องมือวัดแบบค่าประสิทธิผลที่เป็นจริง (true rms)

ขั้นตอนที่ 2) การออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัวประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ และขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม ซึ่งมีการกำหนดข้อมูลเริ่มต้นของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) [54] และแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) [55], [56] ที่ใช้ในขั้นตอนการหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมตามตารางที่ 4.2 โดยวิธีการ AOD เริ่มต้นจากขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ ซึ่งจะได้ขอบเขตต่ำสุดและขอบเขตสูงสุดที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ (F)

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลเริ่มต้นของขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม

Parameters of GA		Parameters of PSO	
Number of Population	20,000	Number of Particles	20,000
Number of Generation	200	Number of Iterations	200
Selection Function	Normalized Geometric	Inertia Factor	0.7298
Crossover function	Arithmetic	Personal Learning Factor	1.4962
Mutation function	Boundary	Global Learning Factor	1.4962



รูปที่ 4.6 ขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 3) จากรูปที่ 4.6 เป็นขั้นตอนการหาตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมจะประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุง เพื่อคำนวณกระแสไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าอินพุต ตามสมการที่ (4.9) และ (4.10) ตามลำดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าอินพุตที่จากการคำนวณ กับกระแสไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าอินพุตที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงาน (B) และ C) ตามสมการเป้าหมาย ดังสมการที่ (4.31)

$$F_{obj} = \frac{1}{2} \left| \frac{I_{1,cal}}{I_{1,mea}} - 1 \right|^2 + \frac{1}{2} \left| \frac{P_{input,cal}}{P_{input,mea}} - 1 \right|^2 \quad (4.31)$$

เมื่อ $I_{1,cal}$ และ $P_{input,cal}$ หมายถึง กระแสไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าอินพุตที่จาก

การคำนวณ ตามลำดับ $I_{1,mea}$ และ $P_{input,mea}$ หมายถึง กระแสไฟฟ้าอินพุตและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าอินพุตที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ตามลำดับ ตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม (G) ได้จากการประมวลผลโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อให้ฟังก์ชันความเหมาะสม ดังสมการที่ (4.32) มีค่าสูงสุด

$$Fitness = \frac{1}{1 + F_{obj}} \quad (4.32)$$

ขั้นตอนที่ 4) จากรูปที่ 4.6 นำค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ประมาณของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 และข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และความเร็วของมอเตอร์ มาหาคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งาน โดยมีขั้นตอนดังสมการที่ (4.5) – (4.20)

4.5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าวิธีการ AOD สามารถนำไปใช้ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะใช้งานได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแบ่งการนำเสนอออกเป็น การประเมินพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุง และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะใช้งาน

4.5.1 การประเมินพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในห้องปฏิบัติการ 4 พิกัด ซึ่งมีข้อมูลรายละเอียดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงตามตารางที่ 4.3 สำหรับวงจรสมมูลที่ได้จากขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 112 method F1 มีการทดสอบหาความต้านทานขดลวด การทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล การทดสอบแบบจับยึดโรเตอร์ การทดสอบหาความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม และการกำหนดความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล แต่จะไม่มีปรับแก้ไขตามขั้นตอนในมาตรฐาน IEEE Std 112 method F1 ในวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกวิธีการดังกล่าวว่า “วิธีการวงจร

สมมูล (equivalent circuit method : ECM)”

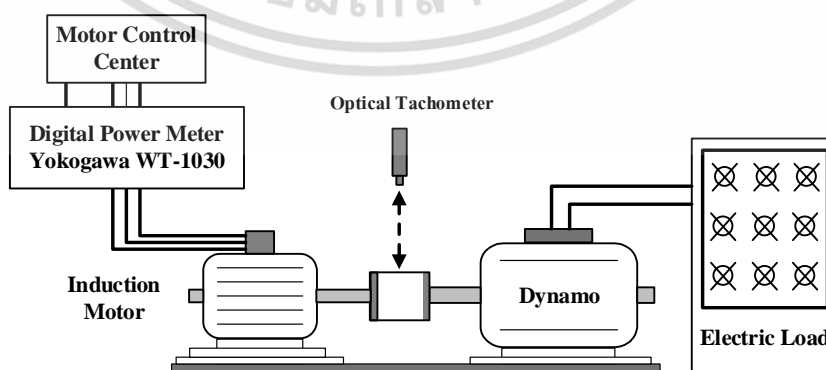
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะนำเสนอเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงซึ่งได้จากวิธีการ AOD กับวิธีการ ECM และกรณีที่ 2 จะเป็นการเปรียบเทียบกำลังทางกลของมอเตอร์ที่ได้จากวิธีการ AOD และวิธีการ ECM กับวิธีการทดสอบภาระทางกล (load test : LT) ซึ่งมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.7

ขั้นแรกของวิธีการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว คือการหาขอบเขตของพารามิเตอร์ โดยข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 4 พิกัด ในตารางที่ 4.3 เป็นข้อมูลสำหรับวิธีการกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบเพื่อหาขอบเขตของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลที่ปรับปรุง แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 เพื่อใช้เป็นขอบเขตต่ำสุดและขอบเขตสูงสุดของขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลจากป้ายพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

kW	V	A	rpm	PF	Hz	Pole
2.2	380 / 220	5.5 / 9.5	940	0.75	50	6
4.0	380	8.8	1440	0.82	50	4
5.5	380 / 220	11.8 / 20.5	1430	0.84	50	4
7.5	380	15.5	1430	0.89	50	4



รูปที่ 4.7 วงจรการทดสอบจำลองการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ขอบเขตที่เป็นไปได้ของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลที่ปรับปรุง

feasible boundary of design variables					
Motor		2.2 kW	4.0 kW	5.5 kW	7.5 kW
$R_{est,1}$ (Ω)	lower	1.52	2.87	1.01	1.60
	upper	2.73	4.79	2.58	2.75
$X_{est,1}$ (Ω)	lower	9.51	13.5	3.91	9.53
	upper	17.5	20.0	5.32	17.0
$X_{est,m}$ (Ω)	lower	24.2	44.8	31.8	103
	upper	170	314	183	720
$R_{est,c}$ (Ω)	lower	349	1482	495	1205
	upper	938	2049	1568	1436
$X_{est,2}$ (Ω)	lower	7.51	9.87	1.22	2.89
	upper	17.52	20.9	3.35	5.30
$R_{est,2}$ (Ω)	lower	1.69	2.23	0.96	1.24
	upper	2.81	3.72	3.89	2.06
$m_{est,SLL}$ (pu)	lower	0.001	0.001	0.001	0.001
	upper	0.05	0.01	0.03	0.04
$m_{est,FWL}$ (pu)	lower	0.001	0.001	0.001	0.001
	upper	0.05	0.01	0.03	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลทางไฟฟ้าและความเร็วจากการวัดในขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 พิกัด

2.2 kW, 6-pole Motor				
Input	Load I	Load II	Load III	Load IV
Field Measurement				
Line Voltage (V)	384.5	383.4	383.9	383.6
Line Current (A)	3.73	4.26	4.94	5.77
Input Power (W)	1253	1785	2343	2974
Speed (rpm)	982.2	970.3	959.4	942.7
4.0 kW, 4-pole Motor				
Input	Load I	Load II	Load III	Load IV
Field Measurement				
Line Voltage (V)	379.4	379.5	379.5	380.4
Line Current (A)	5.387	5.982	7.538	8.314
Input Power (W)	2315	2835	3968	4493
Speed (rpm)	1471.3	1462.6	1444.3	1433.5
5.5 kW, 4-pole Motor				
Input	Load I	Load II	Load III	Load IV
Field Measurement				
Line Voltage (V)	381.6	381.4	381.3	381.1
Line Current (A)	7.12	8.79	9.92	11.35
Input Power (W)	3552	4752	5524	6400
Speed (rpm)	1464.5	1451.6	1444.9	1430.3
7.5 kW, 4-pole Motor				
Input	Load I	Load II	Load III	Load IV
Field Measurement				
Line Voltage (V)	380.0	380.3	380.3	380.4
Line Current (A)	8.56	11.64	13.47	14.35
Input Power (W)	4779	6906	8071	8788
Speed (rpm)	1466.2	1450.1	1439.4	1434.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ขอบเขตของตัวแปรออกแบบ ทำการจำลองการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทั้ง 4 พิกัด ให้ขีดภาระทางกล ตั้งแต่ประมาณ 50 – 100 % ของพิกัด แล้ววัดข้อมูลในขณะที่มอเตอร์ทำงานได้แก่ แรงดันไฟฟ้าอินพุท กระแสไฟฟ้าอินพุท กำลังไฟฟ้าอินพุท และความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.5 ข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงาน (B และ C) จะนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการประมวลผลด้วยขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สองของวิธีการ AOD เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุง สำหรับขั้นตอนนี้ในวิทยานิพนธ์จะนำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) และแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ที่ใช้ในขั้นตอนการหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลว่าวิธีการ AOD สามารถใช้ร่วมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมได้หลายวิธีการ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ แนวทางที่ 1 จะใช้วิธีเชิงพันธุกรรม เรียกว่า “AOD (GA)” และแนวทางที่ 2 จะใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค เรียกว่า “AOD (PSO)” สำหรับประมวลผลในขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม ซึ่งกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นตามตารางที่ 4.2 และขอบเขตของตัวแปรตามตารางที่ 4.4 จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการ ECM ตารางที่ 4.6 – 4.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่ได้จากวิธีการ AOD กับค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบวงจรสมมูลมาตรฐานที่ได้จากวิธีการ ECM ซึ่งพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทั้งสองใช้สัญลักษณ์ต่างกัน ดังรูปที่ 4.2 และ 3.6 ตามลำดับ ดังนั้นการนำเสนอในตารางที่ 4.6 – 4.9 จะอ้างอิงพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุง

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW, 6 ขั้วแม่เหล็ก

		AOD				ECM
		Load I (44.7%)	Load II (64.9%)	Load III (85.5%)	Load IV (107%)	
$R_{est,1}$ (Ω)	AOD (GA)	1.9825	2.0481	2.0444	2.9570	2.5671
	AOD (PSO)	1.9635	2.0716	2.7300	2.2586	
$X_{est,1}$ (Ω)	AOD (GA)	10.437	10.324	10.598	16.609	4.9690
	AOD (PSO)	14.423	13.537	9.5100	10.4477	
$X_{est,m}$ (Ω)	AOD (GA)	67.684	83.912	137.50	74.008	62.917
	AOD (PSO)	63.929	81.349	91.112	146.12	
$R_{est,c}$ (Ω)	AOD (GA)	881.89	810.58	806.55	673.88	1155.1
	AOD (PSO)	624.97	516.86	873.77	692.39	
$X_{est,2}$ (Ω)	AOD (GA)	17.310	16.982	16.216	7.7648	4.9690
	AOD (PSO)	11.678	13.35	11.683	9.3649	
$R_{est,2}$ (Ω)	AOD (GA)	1.6797	1.7816	1.6617	1.6132	2.3062
	AOD (PSO)	1.5285	1.7004	1.8333	1.9258	
$m_{est,SLL}$ (pu)	AOD (GA)	0.022638	0.023028	0.021168	0.002052	1.8 %
	AOD (PSO)	0.015836	0.009869	0.007110	0.006746	
$m_{est,FWL}$ (pu)	AOD (GA)	0.014532	0.014280	0.014305	0.002026	5.6513 W
	AOD (PSO)	0.011915	0.003924	0.006311	0.006735	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก

		AOD				ECM
		Load I (49.4%)	Load II (61.3%)	Load III (85.5%)	Load IV (94.1%)	
$R_{est,1}$ (Ω)	AOD (GA)	3.3578	3.5135	3.2301	3.5696	3.4648
	AOD (PSO)	4.0397	4.5634	4.0144	3.1468	
$X_{est,1}$ (Ω)	AOD (GA)	16.262	15.114	16.180	15.202	8.3955
	AOD (PSO)	15.754	18.264	16.354	14.563	
$X_{est,m}$ (Ω)	AOD (GA)	165.77	175.35	215.46	240.61	149.53
	AOD (PSO)	164.74	181.22	206.85	233.34	
$R_{est,c}$ (Ω)	AOD (GA)	1518.8	1514.1	1501.9	1551.2	1554.8
	AOD (PSO)	1828.5	1921.5	1790.3	1755.3	
$X_{est,2}$ (Ω)	AOD (GA)	14.426	13.775	13.416	14.178	8.3955
	AOD (PSO)	14.730	15.487	12.543	13.671	
$R_{est,2}$ (Ω)	AOD (GA)	3.2031	3.3591	3.3170	3.438284	3.5999
	AOD (PSO)	3.1714	3.1302	3.2761	3.4723	
$m_{est,SLL}$ (pu)	AOD (GA)	0.001943	0.001971	0.002060	0.001903	1.8 %
	AOD (PSO)	0.004985	0.004987	0.007723	0.005036	
$m_{est,FWL}$ (pu)	AOD (GA)	0.002031	0.001963	0.002062	0.001998	7.0472 W
	AOD (PSO)	0.004801	0.005072	0.003660	0.005043	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5.5 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก

		AOD				ECM
		Load I (54.5%)	Load II (72.7%)	Load III (83.5%)	Load IV (95.3%)	
$R_{est,1}$ (Ω)	AOD (GA)	1.1478	2.0011	1.6945	2.0562	1.5747
	AOD (PSO)	1.3944	1.5752	1.8435	1.2324	
$X_{est,1}$ (Ω)	AOD (GA)	5.0233	5.1849	4.1451	5.2224	1.8137
	AOD (PSO)	4.1285	4.1431	4.1513	4.1378	
$X_{est,m}$ (Ω)	AOD (GA)	143.55	134.69	129.99	124.12	49.708
	AOD (PSO)	143.79	135.45	132.53	124.29	
$R_{est,c}$ (Ω)	AOD (GA)	1031.1	1017.1	601.72	770.54	687.35
	AOD (PSO)	1252.8	924.98	875.01	783.87	
$X_{est,2}$ (Ω)	AOD (GA)	2.1847	1.6716	2.1687	2.5530	1.8137
	AOD (PSO)	3.1952	2.2143	2.9458	2.6392	
$R_{est,2}$ (Ω)	AOD (GA)	3.0388	2.9449	3.0528	3.0604	1.2657
	AOD (PSO)	3.0119	3.0331	2.9099	3.1512	
$m_{est,SLL}$ (pu)	AOD (GA)	0.005383	0.008429	0.008989	0.009232	1.8 %
	AOD (PSO)	0.006403	0.006701	0.002783	0.007541	
$m_{est,FWL}$ (pu)	AOD (GA)	0.006628	0.006345	0.006717	0.001409	7.8448 W
	AOD (PSO)	0.006280	0.005775	0.003462	0.004988	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 7.5 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก

		AOD				ECM
		Load I (54.2%)	Load II (78.1%)	Load III (90.6%)	Load IV (98.1%)	
$R_{est,1}$ (Ω)	AOD (GA)	2.1605	2.1769	2.3560	2.1882	2.4189
	AOD (PSO)	2.7500	2.6040	2.4752	2.2569	
$X_{est,1}$ (Ω)	AOD (GA)	8.2601	7.7354	8.1910	8.1905	4.6508
	AOD (PSO)	9.5300	16.252	10.585	10.154	
$X_{est,m}$ (Ω)	AOD (GA)	196.78	237.81	335.56	439.02	124.4
	AOD (PSO)	173.74	530.96	278.53	580.53	
$R_{est,c}$ (Ω)	AOD (GA)	724.81	695.19	707.08	724.58	1607.4
	AOD (PSO)	1205.0	1332.3	1339.9	1360.4	
$X_{est,2}$ (Ω)	AOD (GA)	7.7833	7.3269	7.7129	7.3597	4.6508
	AOD (PSO)	4.4670	4.1918	3.4231	4.1819	
$R_{est,2}$ (Ω)	AOD (GA)	2.0126	1.9409	1.9193	1.9336	1.8515
	AOD (PSO)	1.8758	1.7096	1.8387	1.8646	
$m_{est,SLL}$ (pu)	AOD (GA)	0.015858	0.014868	0.014932	0.015432	1.8 %
	AOD (PSO)	0.030000	0.028574	0.018678	0.025682	
$m_{est,FWL}$ (pu)	AOD (GA)	0.006663	0.006601	0.007194	0.006897	11.213 W
	AOD (PSO)	0.030000	0.029155	0.027620	0.028544	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พิกัด 2.2 kW ที่ได้จากวิธีการ AOD (GA) และ AOD (PSO) มีค่าใกล้เคียงกันทุกภาระทางกล เช่น ที่ Load II วิธีการ AOD (GA) และ AOD (PSO) ได้ค่า $R_{est,2}$ เท่ากับ 1.7816 Ω และ 1.7004 Ω ตามลำดับ สำหรับค่าพารามิเตอร์ $R_{est,1}$, $X_{est,m}$, $X_{est,2}$ และ $X_{est,1}$ ได้ผลเช่นเดียวกัน คือค่าที่ใกล้เคียงกันหรืออยู่ในช่วงของข้อมูลเดียวกันทุกภาระทางกล ยกเว้น $R_{est,c}$ มีค่าเท่ากับ 810.58 Ω และ 516.86 Ω ตามลำดับ สำหรับ $m_{est,SLL}$ และ $m_{est,FWL}$ มีค่าที่แตกต่างกันในบางภาระทางกล และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ ECM พบว่า $R_{est,1}$ และ $R_{est,2}$ มีค่าใกล้เคียงกันทุกภาระทางกล สำหรับ $X_{est,1}$, $X_{est,2}$, $R_{est,c}$ และ $X_{est,m}$ มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากรูปแบบของวงจรสมมูลที่ต่างกัน สำหรับค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์พิกัด 4.0 kW, 5.5 kW และ 7.5 kW ได้ผลเช่นเดียวกันกับกรณีมอเตอร์พิกัด 2.2 kW โดยได้แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบตามตารางที่ 4.7 - 4.9 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเรื่องค่าความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงและจากวิธีการ ECM ทำการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง ทางด้านสเตเตอร์ ความสูญเสียในขดลวดทางด้านโรเตอร์ ความสูญเสียของแกนเหล็ก ค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม และความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล รวมทั้งกำลังไฟฟ้า อินพุท กำลังเอาต์พุททางกล และกำลังสูญเสียรวม ทุกภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 4 พิกัด แสดงข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.10 – 4.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบการไหลของกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW, 6 ขั้วแม่เหล็ก

Power Flow of 2.2 kW Induction Motor		AOD			
		Load I	Load II	Load III	Load IV
Input Power (W)	AOD (GA)	1253.00	1785.00	2332.43	2974.00
	AOD (PSO)	1253.00	1785.00	2343.00	2974.00
	ECM	1147.65	1750.28	2288.47	3043.90
Output Power (W)	AOD (GA)	1023.27	1475.53	1931.20	2407.20
	AOD (PSO)	1027.21	1476.67	1931.11	2430.46
	ECM	898.62	1430.88	1879.73	2465.57
Stator copper loss (W)	AOD (GA)	82.93	111.66	148.65	295.24
	AOD (PSO)	92.05	146.98	199.54	225.51
	ECM	104.80	140.87	188.12	279.98
Rotor copper loss (W)	AOD (GA)	18.75	46.02	83.74	146.89
	AOD (PSO)	18.68	45.47	82.48	149.66
	ECM	16.69	44.78	81.25	152.96
Core loss (W)	AOD (GA)	116.53	123.86	121.10	115.25
	AOD (PSO)	111.41	106.90	112.01	136.63
	ECM	105.32	101.77	99.17	94.43
Stray load loss (W)	AOD (GA)	6.65	16.60	27.77	4.72
	AOD (PSO)	1.58	4.34	9.19	15.82
	ECM	16.58	26.33	34.56	45.30
Friction and windage losses (W)	AOD (GA)	4.87	11.32	19.95	4.70
	AOD (PSO)	2.08	4.63	8.67	15.93
	ECM	5.65	5.65	5.65	5.65
Total loss (W)	AOD (GA)	229.73	309.47	401.23	566.80
	AOD (PSO)	225.79	308.33	411.89	543.54
	ECM	249.03	319.40	408.75	578.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบการไหลของกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก

Power Flow of 4.0 kW Induction Motor		AOD			
		Load I	Load II	Load III	Load IV
Input Power (W)	AOD (GA)	2315.00	2835.00	3968.00	4493.00
	AOD (PSO)	2315.00	2835.00	3968.00	4493.00
	ECM	2312.87	2898.53	4079.05	4762.84
Output Power (W)	AOD (GA)	1953.97	2417.79	3421.86	3841.99
	AOD (PSO)	1965.90	2427.58	3392.40	3862.77
	ECM	1887.84	2412.68	3429.52	3992.60
Stator copper loss (W)	AOD (GA)	97.45	125.74	183.54	246.75
	AOD (PSO)	117.24	163.31	228.12	217.53
	ECM	107.07	135.98	216.21	275.98
Rotor copper loss (W)	AOD (GA)	38.19	61.98	132.47	179.00
	AOD (PSO)	38.53	62.47	132.23	181.21
	ECM	37.64	63.01	134.96	188.94
Core loss (W)	AOD (GA)	221.63	223.50	216.96	208.61
	AOD (PSO)	183.99	166.19	179.03	187.95
	ECM	238.54	235.47	228.32	224.96
Stray load loss (W)	AOD (GA)	1.78	2.93	6.55	8.18
	AOD (PSO)	4.61	7.48	24.51	21.90
	ECM	34.73	44.35	62.99	73.31
Friction and windage losses (W)	AOD (GA)	1.99	3.06	6.61	8.47
	AOD (PSO)	4.74	7.97	11.72	21.64
	ECM	7.05	7.05	7.05	7.05
Total loss (W)	AOD (GA)	361.03	417.21	546.14	651.01
	AOD (PSO)	349.10	407.42	575.60	630.23
	ECM	425.03	485.85	649.53	770.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบการไหลของกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5.5 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก

Power Flow of 5.5 kW Induction Motor		AOD			
		Load I	Load II	Load III	Load IV
Input Power (W)	AOD (GA)	3552.00	4752.00	5524.00	6400.00
	AOD (PSO)	3552.00	4752.00	5524.00	6400.00
	ECM	2835.28	3714.15	4160.25	5106.95
Output Power (W)	AOD (GA)	3014.52	4040.69	4477.61	5331.64
	AOD (PSO)	3065.21	4032.02	4695.19	5408.36
	ECM	2359.30	3115.62	3487.02	4246.81
Stator copper loss (W)	AOD (GA)	58.19	154.62	166.76	264.90
	AOD (PSO)	70.69	121.71	181.42	158.77
	ECM	174.00	239.40	279.88	382.31
Rotor copper loss (W)	AOD (GA)	73.53	136.12	172.89	262.60
	AOD (PSO)	74.79	135.61	179.94	266.88
	ECM	58.43	106.05	135.72	211.13
Core loss (W)	AOD (GA)	386.99	378.67	650.52	483.77
	AOD (PSO)	321.22	427.35	444.09	497.66
	ECM	192.32	187.97	185.72	180.86
Stray load loss (W)	AOD (GA)	8.09	23.44	31.75	49.53
	AOD (PSO)	9.78	18.56	10.23	41.11
	ECM	43.39	57.25	64.06	77.99
Friction and windage losses (W)	AOD (GA)	10.69	18.45	24.47	7.56
	AOD (PSO)	10.31	16.74	13.13	27.21
	ECM	7.84	7.84	7.84	7.84
Total loss (W)	AOD (GA)	537.48	711.31	1046.39	1068.36
	AOD (PSO)	486.79	719.98	828.81	991.64
	ECM	475.99	598.53	673.23	860.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบการไหลของกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 7.5 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก

Power Flow of 7.5 kW Induction Motor		AOD			
		Load I	Load II	Load III	Load IV
Input Power (W)	AOD (GA)	4787.36	6906.00	8071.00	8788.00
	AOD (PSO)	4777.06	6906.00	8071.00	8788.00
	ECM	5024.37	7114.33	8423.40	9052.89
Output Power (W)	AOD (GA)	3984.70	5799.00	6730.13	7318.81
	AOD (PSO)	4059.98	5845.52	6787.41	7320.06
	ECM	4377.52	6165.71	7232.28	7729.95
Stator copper loss (W)	AOD (GA)	154.36	294.98	427.49	450.64
	AOD (PSO)	201.38	352.84	449.13	464.78
	ECM	217.70	380.87	515.17	588.78
Rotor copper loss (W)	AOD (GA)	92.87	202.65	288.88	344.09
	AOD (PSO)	96.42	209.85	297.75	354.50
	ECM	103.03	216.45	310.55	362.24
Core loss (W)	AOD (GA)	511.72	519.32	493.08	517.09
	AOD (PSO)	296.48	244.96	251.76	254.1
	ECM	234.47	226.86	221.41	218.81
Stray load loss (W)	AOD (GA)	30.09	61.55	88.12	108.47
	AOD (PSO)	59.09	122.50	113.61	185.98
	ECM	80.45	113.22	132.77	141.90
Friction and windage losses (W)	AOD (GA)	13.62	28.50	43.30	48.89
	AOD (PSO)	63.70	130.33	171.34	208.50
	ECM	11.21	11.21	11.21	11.21
Total loss (W)	AOD (GA)	802.66	1107.00	1340.87	1469.19
	AOD (PSO)	717.08	1060.48	1283.59	1467.94
	ECM	646.85	948.62	1191.12	1322.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW ที่ได้จากวงจรสมมูล แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.10 พบว่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงทางด้านสเตเตอร์และความสูญเสียในขดลวดทางด้านโรเตอร์ ทั้งที่ได้จากวิธี AOD (GA) วิธี AOD (PSO) และวิธีการ ECM มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน เช่น ที่ Load III วิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) มีค่าเท่ากับ 148.65 วัตต์ 83.74 วัตต์ และ 199.54 วัตต์ 82.48 วัตต์ ตามลำดับ ส่วนวิธีการ ECM ได้ค่าเท่ากับ 188.12 วัตต์ 81.25 วัตต์ เป็นต้น สำหรับค่าความสูญเสียของแกนเหล็กของทั้งสามวิธีจะมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกลที่คำนวณได้จากทั้งสามวิธี มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อภาระทางกลเพิ่มขึ้น โดยทั้งสามวิธีจะมีค่าที่แตกต่างกัน สำหรับค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม จากวิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อภาระทางกลเพิ่มขึ้น แต่วิธีการ ECM กำหนดให้เป็นค่าคงที่ สำหรับกำลังไฟฟ้าอินพุท ที่ได้จากวิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) มีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับกำลังไฟฟ้าอินพุทที่ได้จากการวัด แต่วิธีการ ECM มีค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดพอสมควร มีค่าเท่ากับ 2332.43 วัตต์ 2343.0 วัตต์ และ 2288.47 วัตต์ ตามลำดับ สำหรับกำลังเอาต์พุททางกล ทั้งสามวิธีมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน 1931.20 วัตต์ 1931.11 วัตต์ และ 1879.73 วัตต์ ตามลำดับ เป็นต้น เมื่อพิจารณาในรูปของความสูญเสียรวมจะพบว่าค่าที่ได้จากทั้งสามวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าเท่ากับ 401.23 วัตต์ 411.89 วัตต์ และ 408.75 วัตต์ ตามลำดับ เป็นต้น

ความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 4.0 kW 5.5 kW และ 7.5 kW แสดงดังตารางที่ 4.11 - 4.13 ตามลำดับ พบว่า มีความสอดคล้องกับกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาในรูปของความสูญเสียรวมจะพบว่าค่าที่ได้จากทั้ง วิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) และวิธีการ ECM มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากวิธีที่นำเสนอจะพิจารณาจากวงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่พัฒนามาจากต้นแบบความสูญเสียรวมของมอเตอร์ ดังนั้นทำให้ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ สามารถนำมาเปรียบเทียบกัน

ได้ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดโดยตรงกับค่าที่ได้จากการประเมินหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งพบว่า ค่าความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทานไฟฟ้าของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ค่าที่ได้จากการวิธีการ AOD มีค่าใกล้เคียงกันทุกภาระทางกล เช่น ที่ Load III มอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 4.0 kW ค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ได้จากทั้ง วิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) มีค่าเท่ากับ 3.2301 Ω และ 4.0144 Ω ตามลำดับ ส่วนการทดสอบวัดความต้านทานของขดลวดมีค่าเท่ากับ 3.4648 Ω ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับกรณีต่างๆแสดงข้อมูลในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ความต้านทานไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์โดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 พิกัด

		Motor	2.2 kW	4.0 kW	5.5 kW	7.5 kW
Measured stator resistance at 28°C (Ω)			2.5672	3.4648	1.5747	2.4189
Estimated stator resistance (Ω)	Load I	AOD (GA)	1.9825	3.3578	1.1478	2.1605
		AOD (PSO)	1.9635	4.0397	1.3944	2.7500
	Load II	AOD (GA)	2.0481	3.5135	2.0011	2.1769
		AOD (PSO)	2.0716	4.5634	1.5752	2.6040
	Load III	AOD (GA)	2.0444	3.2301	1.6945	2.3560
		AOD (PSO)	2.7300	4.0144	1.8435	2.4752
	Load IV	AOD (GA)	2.9570	3.5696	2.0562	2.1882
		AOD (PSO)	2.0251	3.1468	1.2324	2.2569

สำหรับการประเมินพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับวงจรสมมูลที่ปรับปรุง สามารถสรุปวิธีการที่นำเสนอ ได้ดังนี้

วิธีการ AOD สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ตอบสนองต่อพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในแต่ละเงื่อนไขการใช้งานหรือที่ภาระทางกลต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการ ECM พบว่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ และ ความต้านทานไฟฟ้า

ทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงด้านสเตเตอร์ มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านสเตเตอร์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบวัดความต้านทานของขดลวด มีค่าความต้านทานอยู่ในช่วงเดียวกันทุกภาระทางกล สำหรับความต้านทานไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงด้านสเตเตอร์จะนำเสนอในหัวข้อ 4.5.2 แต่ค่าพารามิเตอร์ของ รีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วทางด้านสเตเตอร์ ความต้านทานไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงด้านสเตเตอร์, รีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์, ความต้านทานไฟฟ้าจากความสูญเสียที่แกนเหล็ก และ รีแอกแตนซ์จากการสร้างสนามแม่เหล็ก จะมีค่าที่แตกต่างกันเนื่องจากรูปแบบของวงจรสมมูลและค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นการเทียบเคียง (equivalent) ซึ่งไม่สามารถวัดค่าที่แท้จริงได้โดยตรง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ จะทำการเปรียบเทียบจากสมรรถนะที่ได้จากวงจรสมมูลกับที่ได้จากการวิธีการทดสอบภาระทางกล (LT) ได้แก่ กำลังไฟฟ้าอินพุท พบว่าวิธีการ AOD และวิธีการ LT มีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน สำหรับความสูญเสียต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พบว่าวิธีการ AOD มีค่าใกล้เคียงกับวิธีการ ECM ที่มีการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลและการทดสอบแบบจับยึดโรเตอร์ แต่วิธีการ AOD จะไม่มีการทดสอบใดๆ

วิธีการกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้สามารถนำมาใช้กำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ ในแต่ละเงื่อนไขการใช้งานหรือแต่ละระดับภาระทางกล ซึ่งผลต่อให้การประเมินหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ปรับปรุง ทำให้ได้คำตอบในแต่ละครั้งที่ทำการประเมินผล ซึ่งได้ทำการทดสอบ มีเงื่อนไขการหยุดการประมวลผลพิจารณาจากจำนวนรอบการทำงานซึ่งกำหนดให้ทำงานครบ 200 รอบ จึงหยุดการทำงานโดยทดสอบการประมวลผล 100 ครั้ง โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation : S.D.) พบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอแบบที่ 1 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับศูนย์ แสดงว่าไม่มีการกระจายของค่าพารามิเตอร์ ส่วนวิธีที่นำเสนอแบบที่ 2 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อย แสดงว่าการกระจายของค่าพารามิเตอร์เล็กน้อย แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.15 นอกจากนี้ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ ยังมีค่าใกล้เคียงกับการวัดจริง และกำลังไฟฟ้าอินพุทมีค่าใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเท่ากับที่วัดได้ นั้นแสดงว่าการหาขอบเขตที่เป็นไปได้ช่วยให้วิธีการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว นั้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพารามิเตอร์

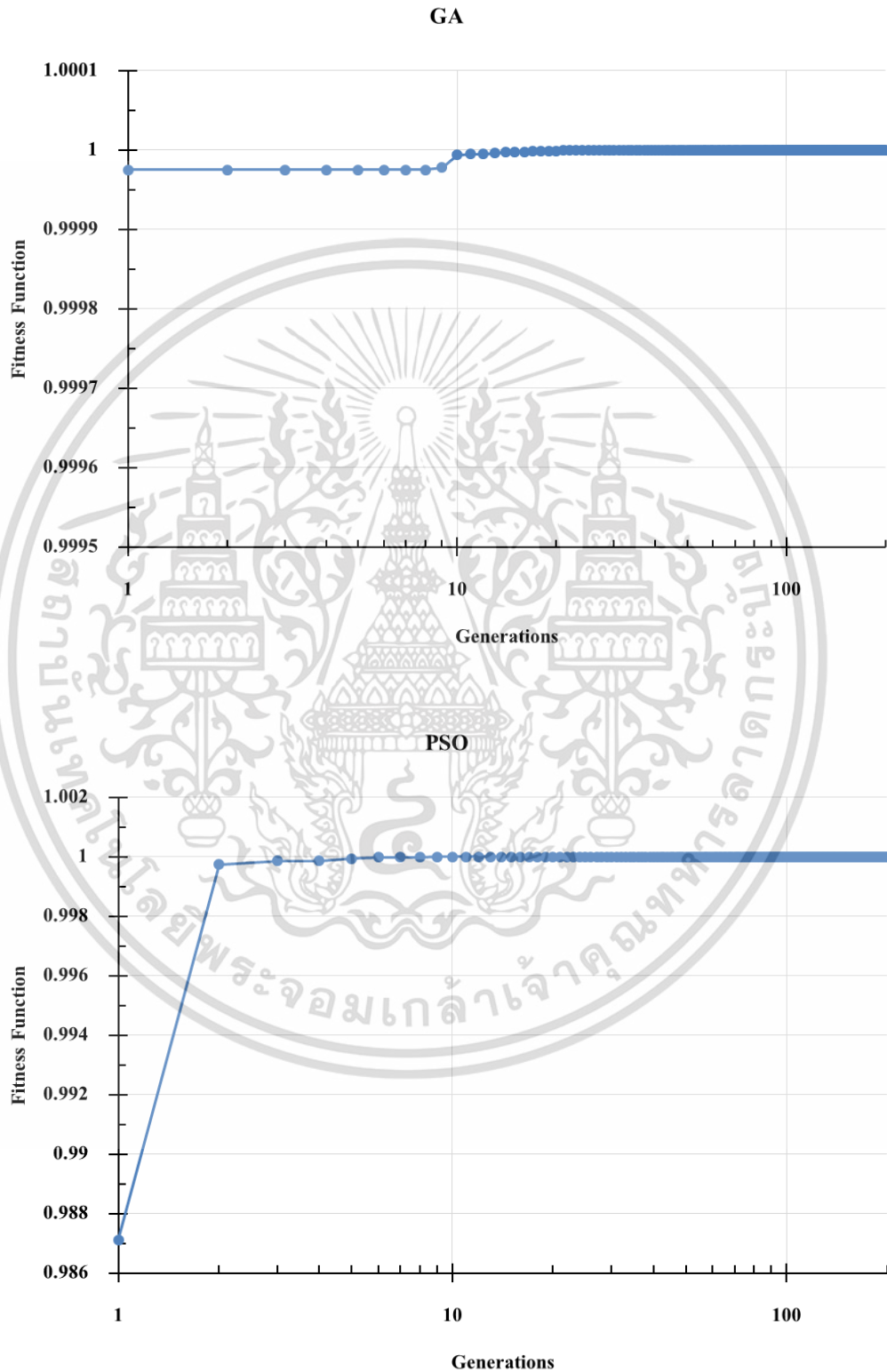
	AOD (GA)		AOD (PSO)	
	Average	S.D.	Average	S.D.
$R_{est,1} (\Omega)$	1.076645	0.0	1.20946	0.070589
$X_{est,1} (\Omega)$	3.209239	0.0	3.284025	0.15043
$X_{est,2} (\Omega)$	6.108359	0.0	6.224454	0.161063
$R_{est,c} (\Omega)$	100.8568	0.0	101.8886	1.825202
$X_{est,m} (\Omega)$	818.0	0.0	756.5384	19.94602
$R_{est,2} (\Omega)$	1.051094	0.0	1.045917	0.006645
$m_{est,SLL} (pu)$	0.007237	0.0	0.005077	0.00113
$m_{est,FWL} (pu)$	0.005122	0.0	0.004102	0.001205

เมื่อเปรียบเทียบ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค ที่ใช้ในกระบวนการขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม สำหรับประมวลผลในการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัวมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากัน และเมื่อพิจารณาเวลาสำหรับการประมวลผล เนื่องจากการหยุดการประมวลผลพิจารณาจากจำนวนรอบการทำงานซึ่งกำหนดให้ทำงานครบ 200 รอบ จึงหยุดการทำงานโดยทดสอบการประมวลผล 100 ครั้ง พบว่าวิธีเชิงพันธุกรรมใช้เวลาประมวลผลเฉลี่ยเท่ากับ 7.435 วินาที และ SD เท่ากับ 0.51 ส่วนวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคใช้เวลาประมวลผลเฉลี่ยเท่ากับ 264.698 วินาที และ SD เท่ากับ 3.93 ดังนั้นวิธีเชิงพันธุกรรมประมวลผลได้เร็วกว่าวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

มีการลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันความเหมาะสม รอบที่ 10 และ 7 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8



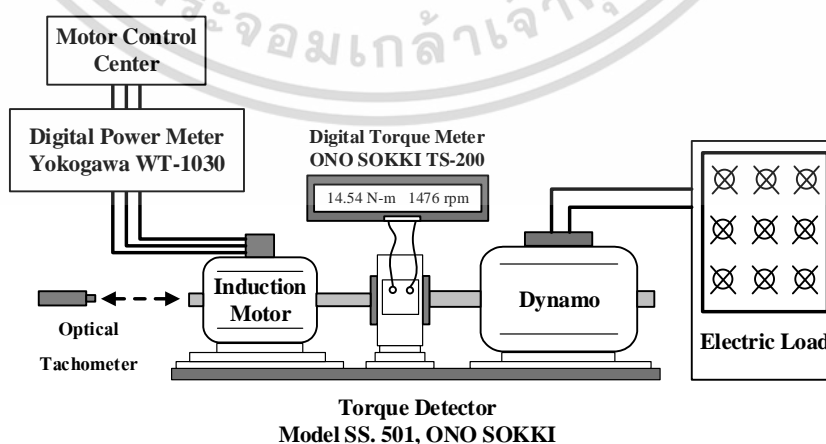
รูปที่ 4.8 การลู่เข้าหาคำตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวิธีการ AOD ในส่วนขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม สามารถใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบใดก็ได้ เนื่องจากมีขั้นตอนการกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ ทำให้สามารถหาคำตอบได้ทุกครั้งที่ทำกรประมวลผล ซึ่งจากการทดสอบ พบว่าวิธีเชิงพันธุกรรม ใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่าวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค ตามเงื่อนไขการทดสอบ ดังนั้นวิธีเชิงพันธุกรรมจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับวิธีการ AOD

4.5.2 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะใช้งาน

จากหัวข้อที่ 4.5.1 วิธีการ AOD สามารถหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ปรับปรุง ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าอินพุท มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับวิธีการ LT และกำลังสูญเสียต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีค่าใกล้เคียงกับวิธีการ ECM ดังนั้นวิธีการ AOD สามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะขับภาระทางกล ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบกำลังทางกลและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการ AOD กับวิธีการ LT วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.9 โดยจะทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 พิกัด ได้แก่ 2.2 kW 4.0 kW 5.5kW และ 7.5 kW วัดปริมาณทางไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าอินพุท) ด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบดิจิตอล สำหรับภาระทางกลของมอเตอร์จำลองโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ (dynamometer) ซึ่งมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดค่าแรงบิดทางกลและความเร็วของโรเตอร์วัดโดยเครื่องวัดความเร็วรอบแบบแสง



รูปที่ 4.9 วงจรการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 การเปรียบเทียบกำลังทางกลที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับการวัดโดยตรง

Motor 2.2 kW, 6-pole		Load I	Load II	Load III	Load IV
Output Power (W)	AOD (GA)	1023.27	1475.53	1931.20	2407.20
	AOD (PSO)	1027.21	1476.67	1931.11	2430.46
	LT	1030	1475	1931	2372
Relative Error (%)	AOD (GA)	0.6534	-0.0359	-0.0104	-1.4840
	AOD (PSO)	0.2709	-0.1132	-0.0057	2.4646
Motor 4.0 kW, 4-pole		Load I	Load II	Load III	Load IV
Output Power (W)	AOD (GA)	1953.97	2417.79	3421.86	3841.99
	AOD (PSO)	1965.90	2427.58	3392.40	3862.77
	LT	1954	2417	3420	3842
Relative Error (%)	AOD (GA)	0.0015	-0.0327	-0.0544	0.0003
	AOD (PSO)	-0.6090	-0.4377	0.8070	-0.5406
Motor 5.5 kW, 4-pole		Load I	Load II	Load III	Load IV
Output Power (W)	AOD (GA)	3014.52	4040.69	4477.61	5331.64
	AOD (PSO)	3065.21	4032.02	4695.19	5408.36
	LT	3005	4041	4592	5349
Relative Error (%)	AOD (GA)	-0.3168	0.0077	2.4911	0.3245
	AOD (PSO)	-2.0037	0.2222	-2.2472	-1.1097
Motor 7.5 kW, 4-pole		Load I	Load II	Load III	Load IV
Output Power (W)	AOD (GA)	3984.70	5799.00	6730.13	7318.81
	AOD (PSO)	4059.98	5845.52	6787.41	7320.06
	LT	4063	5852	6795	7357
Relative Error (%)	AOD (GA)	1.9271	0.9057	0.9547	0.5191
	AOD (PSO)	0.0743	0.1107	0.1117	0.5021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับการทดสอบ

Motor 2.2 kW, 6-pole		Load I	Load II	Load III	Load IV
Efficiency (%)	AOD (GA)	81.67	82.66	82.80	80.94
	AOD (PSO)	81.98	82.73	82.42	81.72
	LT	82.20	82.63	82.42	79.76
Absolute Error (%)	AOD (GA)	0.54	-0.03	-0.38	-1.18
	AOD (PSO)	0.22	-0.09	0.00	-1.97
Motor 4.0 kW, 4-pole		Load I	Load II	Load III	Load IV
Efficiency (%)	AOD (GA)	84.40	85.28	86.24	85.51
	AOD (PSO)	84.92	85.63	85.49	85.97
	LT	84.41	85.26	86.19	85.51
Absolute Error (%)	AOD (GA)	0.01	-0.03	-0.05	0.00
	AOD (PSO)	-0.51	-0.37	0.70	-0.46
Motor 5.5 kW, 4-pole		Load I	Load II	Load III	Load IV
Efficiency (%)	AOD (GA)	84.87	85.03	81.06	83.31
	AOD (PSO)	86.30	84.85	85.00	84.51
	LT	84.60	85.04	83.13	83.58
Absolute Error (%)	AOD (GA)	-0.27	0.01	2.07	0.27
	AOD (PSO)	-1.70	0.19	-1.87	-0.93
Motor 7.5 kW, 4-pole		Load I	Load II	Load III	Load IV
Efficiency (%)	AOD (GA)	83.23	83.97	83.39	83.28
	AOD (PSO)	84.99	84.64	84.10	83.30
	LT	84.87	84.74	84.19	83.72
Absolute Error (%)	AOD (GA)	1.64	0.77	0.80	0.43
	AOD (PSO)	-0.12	0.09	0.09	0.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW 4.0 kW 5.5kW และ 7.5 kW ที่ได้จากวิธีการ LT กับวิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative error) ประมาณ 3% เช่น ที่ Load IV มอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW วิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) มีค่าเท่ากับ 2407.20 วัตต์ และ 2430.46 วัตต์ ตามลำดับ วิธีการ LT เท่ากับ 2372 วัตต์ ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ -1.4840 % และ 2.4646 % ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของมอเตอร์ พบว่าวิธีที่นำเสนอทั้ง 2 แบบ มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (absolute error) ประมาณ 2% เช่น ที่ Load IV มอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 7.5 kW วิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) เท่ากับ 83.28 % และ 83.30% ตามลำดับ วิธีการ LT มีค่าเท่ากับ 83.72 % ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 0.43 % และ 0.42 % ตามลำดับ สำหรับข้อมูลของมอเตอร์พิกัดต่างๆ แสดงตามตารางที่ 4.17

เพื่อที่จะยืนยันวิธีที่นำเสนอสามารถใช้งานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดพิกัดต่างๆ ได้ ดังนั้นจึงได้อ้างอิงจากผลการทดสอบจากหน่วยงานภายนอก ได้แก่ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 11 kW [7] และ 75 kW [8] รายละเอียดของมอเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อ้างอิงผลการทดสอบจากหน่วยงานภายนอก

kW	V	A	rpm	PF	Hz	pole
11 kW	380	22.6	1450	0.86	50	4
75 kW	690 / 400	76 / 131	1488	0.86	50	4

ข้อมูลจากวิธีการ LT ที่ภาระทางกลต่าง ๆ ของมอเตอร์ขนาดพิกัด 11 kW และ 75 kW แสดงในตารางที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ การเปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 11 kW ที่ได้จากวิธีการ LT กับวิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 3 % ในกรณีที่ภาระทางกลตั้งแต่ 50 % - 100 % ของพิกัด แต่ใน

กรณีที่ Load I มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ -3.74 % เช่น กรณี Load IV มอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 11
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

kW วิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) มีค่าเท่ากับ 11,185.90 วัตต์ 11,185.90 วัตต์ ตามลำดับ
 วิธีการ LT เท่ากับ 11,137.41 วัตต์ ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ -0.44 % และ -0.03 %
 ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพ วิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) และวิธีการ LT มีค่าเท่ากับ
 87.64 %, 87.64 % และ 87.10 % ตามลำดับ ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 0.18 % และ -
 0.36 % ตามลำดับ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 2 % ในกรณีที่ภาระทางกลตั้งแต่ 50
 % - 100 % ของพิกัด แต่กรณีที่ภาระทางกล 25 % ของพิกัด มีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เป็น 2.13 %

ตารางที่ 4.19 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 11 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก

11 kW, 4-pole Motor Field Measurement	Load I 25 %	Load II 50 %	Load III 75 %	Load IV 100 %	
Line Voltage (V)	380.5	380.5	380.7	381.2	
Line Current (A)	9.67	13.06	17.51	22.56	
Input Power (W)	3395	6361	9514	12769	
Speed (rpm)	1487	1475	1461	1447	
Output Power (W)	LT	2746.87	5529.72	8338.25	11137.41
	AOD (GA)	2806.04	5549.80	8399.45	11185.90
	AOD (PSO)	2849.64	5515.82	8257.164	11140.44
Relative Error (%)	AOD (GA)	-2.15	-0.36	-0.73	-0.44
	AOD (PSO)	-3.74	0.25	0.97	-0.03
Efficiency (%)	LT	80.98	86.94	87.70	87.10
	AOD (GA)	82.66	87.29	88.32	87.64
	AOD (PSO)	83.11	86.76	86.82	87.28
Absolute Error (%)	AOD (GA)	2.13	-0.18	-0.88	0.18
	AOD (PSO)	0.45	-0.53	-1.50	-0.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 75 kW, 4 ขั้วแม่เหล็ก

75 kW Motor Field Measurement	Load I	Load II	Load III	Load IV	
	25 %	50 %	75 %	100 %	
Line Voltage (V)	400	400	400	400	
Line Current (A)	56.8	77.8	103.8	132.5	
Input Power (kW)	20.51	39.68	59.07	78.53	
Speed (rpm)	1497.5	1495	1492	1489	
Output Power (W)	IEEE112	19101.96	37894.36	56656.38	75219.47
	IEC-34-2	19040.81	37864.61	56607.95	75210.11
	AOD (GA)	18705.22	36803.16	55739.24	74313.53
	AOD (PSO)	18705.22	37542.11	56497.01	75149.3
Relative Error (IEEE112, %)	AOD (GA)	2.08	2.88	1.63	1.20
	AOD (PSO)	2.08	0.93	0.28	0.09
Relative Error (IEC-34-2, %)	AOD (GA)	1.76	2.80	1.53	1.19
	AOD (PSO)	1.76	0.85	0.20	0.08
Efficiency (%)	IEEE-112	93.2	95.5	95.9	95.8
	IEC-34-2	92.9	95.5	95.9	95.8
	AOD (GA)	91.24	92.79	94.40	94.67
	AOD (PSO)	91.24	94.65	95.68	95.73
Absolute Error (IEEE-112, %)	AOD (GA)	1.96	2.71	1.50	1.13
	AOD (PSO)	1.96	0.85	0.22	0.07
Absolute Error (IEC-34-2, %)	AOD (GA)	1.66	2.71	1.50	1.13
	AOD (PSO)	1.66	0.85	0.22	0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.20 มอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 75 kW การเปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตทางกล ระหว่างค่าที่ได้การทดสอบตามมาตรฐาน IEEE-112 method B การทดสอบตามมาตรฐาน IEC-34-2 กับวิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) พบว่ากำลังเอาต์พุตทางกลมีค่าใกล้เคียงกัน ดังเช่น กรณี Load IV วิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) มีค่าเท่ากับ 74,313.53 วัตต์ และ 75,149.3 วัตต์ ตามลำดับ ส่วนการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE-112 และ IEC-34-2 มีค่าเท่ากับ 75,219.47 วัตต์ และ 75,210.11 วัตต์ ตามลำดับ โดยความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 3 % ที่ทุกภาระทางกล สำหรับประสิทธิภาพ วิธี AOD (GA) และวิธี AOD (PSO) มีค่าเท่ากับ 94.67 % และ 95.73 % ตามลำดับ ส่วนการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE-112 และ IEC-34-2 มีค่าเท่ากับ 95.8 % และ 95.8 % ตามลำดับ ซึ่งความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 %

การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งาน สามารถสรุปได้ดังนี้ สำหรับ $R_{est,2}$ จากวงจรสมมูลที่ปรับปรุง จะแสดงผลอยู่ในรูปของกำลังทางแม่เหล็กไฟฟ้าและกำลังเอาต์พุตทางกล ซึ่งจากการทดสอบพบว่า กำลังเอาต์พุตทางกลที่ได้จากวงจรสมมูลที่ปรับปรุง มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 3 % ดังนั้น $R_{est,2}$ ที่ได้จากวิธีการ AOD สามารถตอบสนองกับพฤติกรรมจริงของมอเตอร์ได้ นอกจากนี้วิธีการ AOD สามารถพัฒนาเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อที่จะสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ในขณะทำงาน โดยที่ไม่ต้องปิดระบบ มีความสะดวกในการใช้งาน และมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีความแม่นยำ นอกจากนี้วิธีการ AOD สามารถนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งาน โดยที่มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 2 % ในกรณีที่ภาระทางกลตั้งแต่ 50 % - 100 % ของพิกัด ซึ่งเป็นช่วงการใช้งานของมอเตอร์ส่วนใหญ่ แต่เมื่อนำวิธีการ AOD มาประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งาน ที่ภาระทางกลต่ำกว่า 50 % ของพิกัด ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 % นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอยังสามารถนำมาหาสมรรถนะของมอเตอร์ ได้แก่ กำลังทางกลหรือแรงบิดเป็นต้น ซึ่งพบว่ากำลังเอาต์พุตทางกล มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 3 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การใช้วิธีการ AOD ร่วมกับการหาความเร็วของมอเตอร์ด้วย MCSA

การใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำมีการนำไปใช้งานหลายประเภท ซึ่งในบางกรณีมอเตอร์จะอยู่ภายในระบบทำให้ไม่สามารถที่จะวัดความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้โดยตรง เช่น ระบบปั๊มน้ำ ระบบระบายอากาศ เป็นต้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอการหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วย MCSA [58] เพื่อนำมาใช้ร่วมกับวิธีการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว ทำให้วิธีการที่นำเสนอสามารถใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอเฉพาะวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม เท่านั้น

ดังนั้นเพื่อยืนยันวิธีการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัวใช้ร่วมกับการหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วย MCSA ที่ได้นำเสนอ จึงได้ทำทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดห่อหุ้มฉนวนมิดชิด ทั้งหมด 2 พิกัด ได้แก่ 2.2 kW 6 ขั้วแม่เหล็ก และ 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งแสดงข้อมูลรายละเอียดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละพิกัด ตามตารางที่ 4.3 โดยจะเป็นการเปรียบเทียบแรงบิดและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการวัดโดยตรง (LT) กับวิธีการ AOD และมีการวัดความเร็วของมอเตอร์ 2 กรณี ได้แก่ วัดความเร็วโดยตรง เรียกว่า วิธีการ AOD (GA) กับการคำนวณความเร็วของมอเตอร์ด้วยเทคนิค MCSA เรียกว่า วิธีการ AOD (GA)-MCSA แสดงวงจรถดสอบ ดังรูปที่ 4.9

วิธี AOD (GA)-MCSA เมื่อพิจารณาค่าความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW แสดงดังตารางที่ 4.21 และมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 4.0 kW แสดงดังตารางที่ 4.22 พบว่าค่าความสูญเสียของมอเตอร์มีใกล้เคียงกับ ข้อมูลในตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณความเร็วด้วยเทคนิค MCSA เมื่อนำมาใช้ร่วมกับวิธีการที่นำเสนอสามารถนำมาใช้งานได้จริง

ตารางที่ 4.21 การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW โดยใช้วิธี AOD (GA)-MCSA

2.2 kW Motor (MCSA)	Load I (54.2%)	Load II (78.1%)	Load III (90.6%)	Load IV (98.1%)
Input Power (W)	1237.81	1785.00	2343.00	2974.00
Output Power (W)	979.53	1451.30	1927.83	2399.78
Stator copper loss (W)	99.06	159.56	198.36	294.97
Rotor copper loss (W)	17.95	44.50	83.51	147.83
Core loss (W)	140.10	126.72	127.90	122.22
Stray load loss (W)	0.56	1.37	2.64	4.56
Friction and windage losses (W)	0.63	1.56	2.76	4.64
Total loss (W)	258.29	333.70	415.17	574.22

ตารางที่ 4.22 การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW โดยใช้วิธี AOD (GA)-MCSA

4.0 kW Motor (MCSA)	Load I (49.4%)	Load II (61.3%)	Load III (85.5%)	Load IV (94.1%)
Input Power (W)	2315.00	2835.00	3968.00	4493.00
Output Power (W)	1939.12	2422.07	3410.50	3847.39
Stator copper loss (W)	98.72	127.24	183.55	225.38
Rotor copper loss (W)	37.13	62.26	130.64	176.82
Core loss (W)	236.33	217.38	231.19	226.41
Stray load loss (W)	1.84	3.02	5.99	8.37
Friction and windage losses (W)	1.85	3.03	6.13	8.64
Total loss (W)	375.88	412.93	557.50	645.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW โดยใช้ AOD (GA)-MCSA

2.2 kW Motor Field Measurement		Load I (44.7%)	Load II (64.9%)	Load III (85.5%)	Load IV (107%)
Line Voltage (V)		384.5	383.4	383.9	383.6
Line Current (A)		3.734	4.263	4.936	5.769
Input Power (W)		1253	1785	2343	2974
Speed (rpm)		982.2	970.3	959.4	942.7
Torque (N-m)	LT	10.00	14.51	19.22	24.02
	AOD (GA)	9.94	14.52	19.21	24.37
	AOD (GA)-MCSA	9.52	14.28	19.20	24.31
Relative Error (%)	AOD (GA)	0.60	-0.07	0.05	-1.46
	AOD (GA)-MCSA	4.80	1.59	0.10	-1.21
Efficiency (%)	LT	82.20	82.63	82.42	79.76
	AOD (GA)	81.67	82.66	82.80	80.94
	AOD (GA)-MCSA	79.13	81.31	82.28	80.69
Absolute Error (%)	AOD (GA)	0.53	-0.03	-0.38	-1.18
	AOD (GA)-MCSA	2.54	1.35	0.52	0.25

เมื่อพิจารณาแรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธี AOD (GA)-MCSA วิธี AOD (GA) กับวิธี LT สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดพิกัด 2.2 kW พบว่า แรงบิดจะมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 2 % และ 2 % ตามลำดับ แต่มีกรณีภาระทางกล 44.7 % ของพิกัด วิธี AOD (GA)-MCSA มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 4.80 % สำหรับประสิทธิภาพของมอเตอร์มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 2 % และ 1% ยกเว้นกรณีภาระทาง

กล 44.7 % ของพิกัด วิธี AOD (GA)-MCSA มีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 2.54 % แสดงตั้ง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 และ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดพิกัด 4.0 kW ได้ผลเช่นเดียวกันกับกรณี 2.2 kW แรงบิดจะมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 3 % และ 2 % ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพจะมีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 1 % ทั้งสองวิธี แสดงดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW โดยใช้ AOD (GA)-MCSA

4.0 kW Motor Field Measurement		Load I (49.4%)	Load II (61.3%)	Load III (85.5%)	Load IV (94.1%)
Line Voltage (V)		379.4	379.5	379.5	380.4
Line Current (A)		5.387	5.982	7.538	8.314
Input Power (W)		2315	2835	3968	4493
Speed (rpm)		1471.3	1462.6	1444.3	1433.5
Torque (N-m)	LT	12.93	16.17	22.74	25.61
	AOD (GA)	12.68	15.78	22.62	25.58
	AOD (GA)-MCSA	12.58	15.81	22.53	25.60
Relative Error (%)	AOD (GA)	1.93	2.41	0.53	0.12
	AOD (GA)-MCSA	2.71	2.23	0.92	0.04
Efficiency (%)	LT	84.41	85.26	86.19	85.51
	GA	84.40	85.28	86.24	85.51
	GA (MCSA)	83.76	85.43	85.95	85.63
Absolute Error (%)	GA	0.01	-0.02	-0.05	0
	GA (MCSA)	0.64	-0.15	0.29	-0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.25 และ 4.26 เป็นการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสวิธีต่างๆ ได้แก่ CM SM IEEE Std 112 method B IEEE Std 112 method E1 IEEE Std 112 method F1 วิธี AOD (GA) วิธี AOD (GA)-MCSA เทียบกับวิธีการ LT ซึ่งทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดพิกัด 2.2 kW และ 4.0 kW ที่ภาระทางกลเท่ากับ 25 % 50 % 75 % และ 100 % ของพิกัด ซึ่งแสดงข้อมูลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ พบว่า วิธี CM ในช่วงภาระทางกลที่ 25% และ 50% มีค่าประสิทธิภาพเกิน 100 % ซึ่งไม่เป็นจริง เนื่องจากการคำนวณหาภาระทางกลใช้อัตราส่วนของกระแสที่วัดกับกระแสที่พิกัด ซึ่งในมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัดขนาดเล็กกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ในสภาวะไม่มีภาระทางกล มีค่าประมาณ 50 % ของกระแสพิกัด ทำให้มีผลต่อการคำนวณ จึงมีการปรับปรุงโดยนำกระแสในสภาวะไม่มีภาระทางกล มาพิจารณาในสมการ แต่ในทางปฏิบัติจะไม่ทราบค่ากระแสในสภาวะไม่มีภาระทางกล และช่วงภาระทางกลที่ 75% ประสิทธิภาพมีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงมาก (13% และ 8%) และ ที่ภาระทางกลที่พิกัด ประสิทธิภาพมีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์อยู่ประมาณ 2 - 5 % สำหรับวิธี SM ในช่วงภาระทางกลที่ 25% 50% 75% และ 100% ประสิทธิภาพมีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงมาก อยู่ระหว่าง 6 - 14 % ในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดพิกัด 2.2 kW และ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดพิกัด 4.0 kW ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงมาก อยู่ระหว่าง 3 - 8 % เมื่อเทียบกับการวัดแรงบิดโดยตรง

สำหรับวิธีการหาประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตามมาตรฐาน IEEE-112 method B, E1 และ F1 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากทั้งสามวิธีจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับโดยมีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 % และเมื่อเทียบกับการวัดแรงบิดโดยตรง พบว่า ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ อยู่ระหว่าง 2 - 6 % ในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดพิกัด 2.2 kW และ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดพิกัด 4.0 kW ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ อยู่ระหว่าง 2 - 6 %

ส่วนวิธี AOD (GA) และ วิธี AOD (GA)-MCSA ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 % ทั้งกรณี
มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดพิกัด 2.2 kW และ 4.0 kW

ตารางที่ 4.25 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ 2.2 kW ที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีต่าง ๆ

2.2 kW Motor Field Measurement	Load I (25%)	Load II (50%)	Load III (75%)	Load IV (100%)	
Line Voltage (V)	380.5	381.04	380.4	380.6	
Line Current (A)	3.398	3.833	4.556	5.547	
Input Power (W)	730.9	1319.6	1978.6	2706.8	
Speed (rpm)	989.2	977.2	963.2	946.7	
Efficiency (%)	CM	185.96	116.19	92.11	81.97
	SM	54.18	63.35	68.20	72.20
	IEEE-112 B	73.20	80.55	81.45	80.37
	IEEE-112 E1	73.41	80.62	81.27	79.81
	IEEE-112 F1	72.35	81.27	82.98	82.02
	AOD (GA)	71.88	80.67	81.67	80.95
	AOD (GA)-MCSA	71.43	79.13	81.29	80.71
	LT	68.20	77.45	79.12	78.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.26 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ 4.0 kW ที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีต่างๆ

4.0 kW Motor Field Measurement	Load I (25%)	Load II (50%)	Load III (75%)	Load IV (100%)	
Line Voltage (V)	382.1	381.7	381.6	380.9	
Line Current (A)	4.537	5.372	6.516	8.364	
Input Power (W)	1312.4	2212.7	3153.6	4454.4	
Speed (rpm)	1484.8	1471.9	1458.0	1438.0	
Efficiency (%)	CM	157.14	110.35	93.92	85.35
	SM	77.21	84.66	88.79	92.79
	IEEE-112 B	79.75	85.67	86.83	86.17
	IEEE-112 E1	79.52	84.96	85.58	84.15
	IEEE-112 F1	80.19	85.57	86.68	85.94
	AOD (GA)	75.37	84.40	85.76	85.45
	AOD (GA)-MCSA	74.13	83.76	85.69	85.56
	LT	74.47	83.41	85.31	84.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 บทสรุป

สำหรับวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นไซน์ ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ถ้าพิจารณาการไหลของกำลังที่ได้จากวงจรสมมูล ได้แก่ กำลังไฟฟ้าอินพุท ซึ่งพบว่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่ได้จากวิธีการ AOD เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ LT มีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน สำหรับความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พบว่ามีค่าที่ได้จากวิธีการ AOD มีค่าใกล้เคียงกับวิธีการ ECM เมื่อนำเปรียบเทียบกำลังเอาต์พุททางกลที่ได้จากวิธีการ LT พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 3 % ในแต่ละเงื่อนไขการใช้งาน ดังนั้นแสดงว่าวงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่พัฒนาจากต้นแบบความสูญเสียสามารถตอบสนองกับพฤติกรรมจริงของมอเตอร์ได้ และถ้าพิจารณาค่าพารามิเตอร์ พบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุง โดยเมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์จากวิธีการ ECM มีค่าใกล้เคียงกัน

2. วิธีการกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ สามารถนำมาใช้กำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละพิกัด และในแต่ละภาระทางกล ซึ่งผลต่อให้การประเมินหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ปรับปรุง โดยพบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธี AOD (GA) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับศูนย์ แสดงว่าไม่มีการกระจายของค่าพารามิเตอร์ ส่วนวิธี AOD (PSO) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อย แสดงว่ามีการกระจายของค่าพารามิเตอร์เล็กน้อย นั่นแสดงว่าการหาขอบเขตที่เป็นไปได้ช่วยให้วิธีการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัวนั้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) สามารถใช้งานในขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมได้ โดยที่การลู่เข้าหา

คำตอบมีผลใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพที่ได้จากทั้งสองวิธีใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงว่าขั้นตอนหาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมนั้นสามารถใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้หลายประเภท แต่วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม ใช้เวลาในการประมวลผลที่น้อยกว่า

4. วิธีการ AOD สามารถนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในขณะที่ใช้งาน โดยที่มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 2 % ในกรณีที่ภาระทางกลตั้งแต่ 50 % - 100 % ของพิกัด ซึ่งเป็นช่วงการใช้งานของมอเตอร์ส่วนใหญ่ แต่เมื่อนำวิธีที่นำเสนอมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะที่ใช้งาน ที่ภาระทางกลต่ำกว่า 50 % ของพิกัด ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 % นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอยังสามารถนำมาหาสมรรถนะของมอเตอร์ ได้แก่ กำลังทางกลหรือแรงบิดเป็นต้น ซึ่งพบว่ากำลังทางกล มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 3 % ที่ภาระทางกลตั้งแต่ 25 % - 100 % ของพิกัด

5. วิธีการที่นำเสนอ ยังเป็นวิธีที่มีขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ไม่ยุ่งยาก โดยที่ไม่ต้องทำการหยุดระบบการทำงานหรือสามารถประเมินประสิทธิภาพในขณะที่มอเตอร์ยังทำงาน ใช้เวลาไม่นาน มีความสะดวก แต่มีความแม่นยำใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน

6. วิธีการ AOD เหมาะสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีลักษณะภาระทางกลคงที่ และไม่เหมาะสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีลักษณะภาระทางกลเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะที่ใช้งานเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์ โดยมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก และมีความแม่นยำเทียบเท่าวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ตามมาตรฐาน IEEE Std 112 method F/F1 มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 3% และผู้เขียนวิทยานิพนธ์ได้มีการนำเสนอ “Low-intrusive Approach for Parameters Estimation of Induction Motor Using Adaptive Optimal Design Algorithm Based on On-site Measurements” [57]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ขณะใช้งานเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

5.1 บทนำ

บทที่ 4 ได้นำเสนอวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งานเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์ วิธีการที่ได้นำเสนอมีขั้นตอนพอสังเขป คือ ใช้หลักการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลโดยใช้ข้อมูลในขณะทำงานร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่มีการกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ ทำให้วงจรสมมูลสามารถตอบสนองพฤติกรรมจริงของมอเตอร์ได้ จากแนวความคิดดังกล่าวสามารถนำไปประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือเครื่องจักรไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ ได้ ถ้ามีวงจรสมมูลหรือต้นแบบที่มีความน่าเชื่อถือ

ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยนำเสนอวงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ การออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัวสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ การทดสอบวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ด้วยวิธีการ AOD กับวิธีการ LT และสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ

5.2 วงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

โดยทั่วไปวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ได้จากขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐานไม่มีการพิจารณาผลของแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์และกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์ที่ส่งผลกระทบต่อ

ประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แต่มีงานวิจัยบางส่วนได้นำเสนอการทดสอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบไม่มีภาระทางกล และการทดสอบจับยึดโรเตอร์โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์ [59], [60] โดยทั่วไปการพิจารณาผลของฮาร์โมนิกส์ของวงจรสมมูล จะใช้ทฤษฎีบทการทับซ้อน ซึ่งหลักการดังกล่าวจะแยกวงจรสมมูลออกเป็นส่วนของแต่ละความถี่ ตั้งแต่ความถี่หลักมูล (fundamental frequency) จนถึงความถี่อนันต์ (infinity frequency) แล้วนำมารวมกันสามารถแสดงวงจรสมมูลตามทฤษฎีบทการทับซ้อนได้ดังรูปที่ 5.1 ก) [38], [61] แต่วิธีการนี้จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลในแต่ละความถี่ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ในแต่ละความถี่ด้วย ทำให้ขั้นตอนที่ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแต่ละความถี่มีความยุ่งยาก และวงจรสมมูลดังกล่าวยังไม่มีส่วนของพารามิเตอร์ความสูญเสียของแกนเหล็กซึ่งกำหนดให้มีค่าความสูญเสียคงที่ โดยที่รูปคลื่นพีคดับเบิลยูเอ็มจะทำให้เกิดผลของแรงดันที่เพี้ยน (voltage distortion effects) และผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ ส่งผลกระทบต่อค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก [62] - [65] และขดลวดสเตเตอร์ [64] ซึ่งทำให้ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลมีความยุ่งยากมากขึ้น

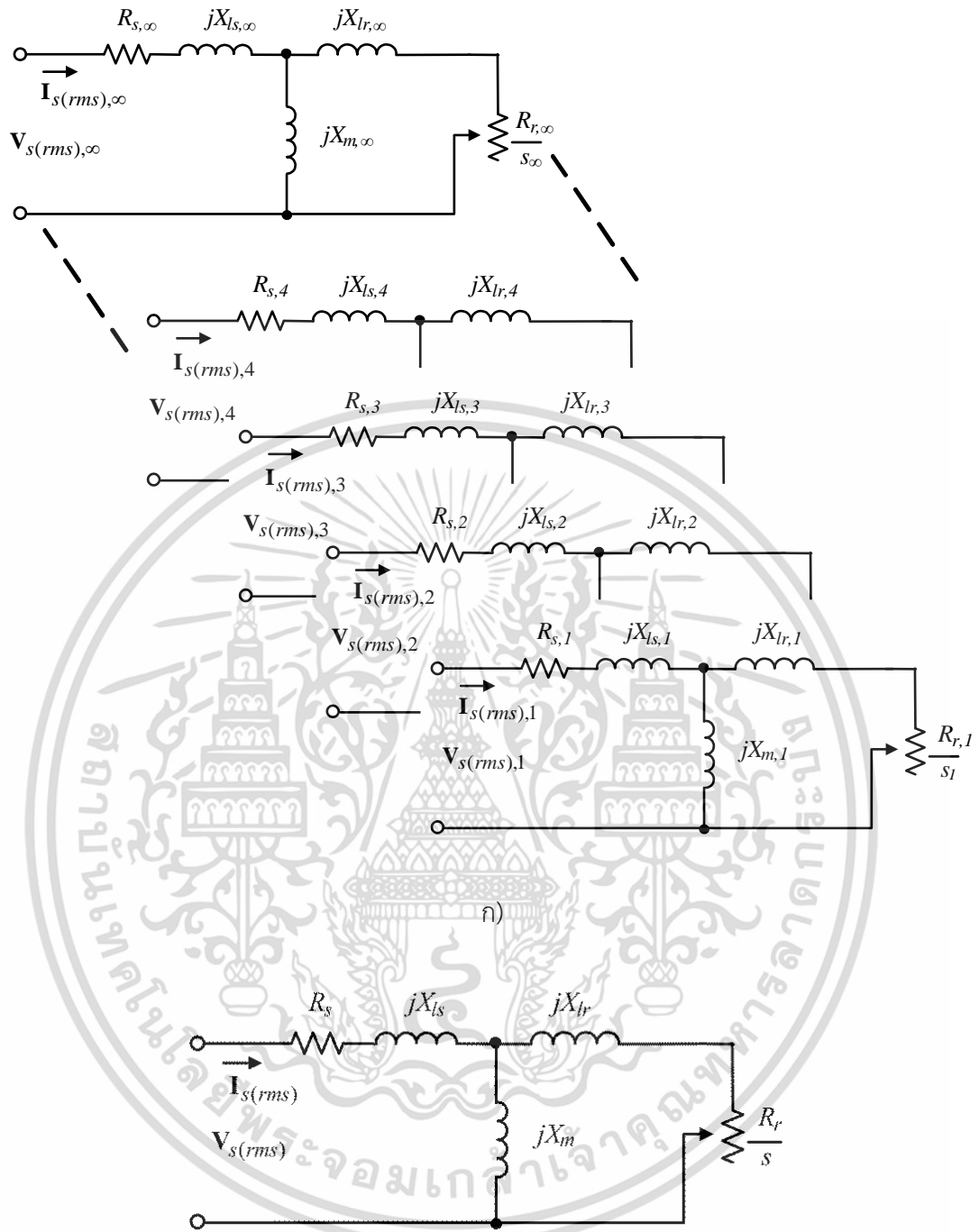
ถ้าพิจารณาอยู่ในรูปแบบของพารามิเตอร์วงจรถูกก้อน (lumped circuit parameter) [66], [67] ซึ่งจะสามารถลดตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลให้น้อยลง ทำให้กระบวนการคำนวณลดความยุ่งยาก ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์ ให้อยู่ในรูปแบบของพารามิเตอร์ถูกก้อน โดยพิจารณาจากค่าของกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต แรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต และกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตของมอเตอร์ร่วมกับการประเมินหาค่าที่เหมาะสม

จากรูปที่ 5.1 ค่าสลิป สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์

$$s_k = \frac{k\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (5.1)$$

เมื่อ s_k หมายถึง ค่าสลิปเนื่องจากฮาร์โมนิกส์ที่ k ส่วน ω_s และ ω_r หมายถึง ความเร็วเชิงมุมเชิงโครนัสและความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ ตามลำดับ และ k เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $1, 2, 3, \dots, \infty$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข)

รูปที่ 5.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของแรงดันไฟฟ้าของฮาร์โมนิกส์ที่ k ($V_{s(rms),k}$) และกระแสไฟฟ้าของฮาร์โมนิกส์ที่ k ($I_{s(rms),k}$) ดังสมการที่ (5.2) และ (5.3) ตามลำดับ

$$V_{s(rms),k} = \sqrt{\frac{1}{T_k} (v_k(t))^2} \quad (5.2)$$

$$I_{s(rms),k} = \sqrt{\frac{1}{T_k} (i_k(t))^2} \quad (5.3)$$

เมื่อพิจารณาปริมาณของฮาร์โมนิกส์ ตั้งแต่ความถี่หลักจนถึงความถี่อื่น ๆ ดังนั้นสามารถหาค่าประสิทธิภาพของแรงดันไฟฟ้า ($V_{s(rms)}$) และกระแสไฟฟ้า ($I_{s(rms)}$) ได้ดังนี้

$$V_{s(rms)} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (V_{s(rms),k})^2} \quad (5.4)$$

$$I_{s(rms)} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_{s(rms),k})^2} \quad (5.5)$$

เมื่อแยกส่วนประกอบของค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าจะได้กระแสไฟฟ้าในส่วนของความถี่หลัก และกระแสไฟฟ้าในส่วนของฮาร์โมนิกส์ แสดงดังสมการที่ (5.6)

$$I_{s(rms)} = \sqrt{(I_{s(rms),1})^2 + (I_{s,harmonic})^2} \quad (5.6)$$

ค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าของความถี่หลัก ($I_{s(rms),1}$) แสดงดังสมการที่ (5.7)

$$\begin{aligned} I_{s(rms),1} &= \sqrt{\left(\frac{V_{s(rms),1}}{Z_{total,1}} \right)^2} \\ &= \frac{V_{s(rms),1}}{Z_{total,1}} \end{aligned} \quad (5.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าของฮาร์โมนิกส์ ($I_{s,harmonic}$) แสดงดังสมการที่ (5.8)

$$\begin{aligned} I_{s,harmonic} &= \sqrt{\sum_{k=2,3,4,\dots}^{\infty} (I_{s(rms),k})^2} \\ &= \sqrt{\sum_{k=2,3,4,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_{(rms),k}}{Z_{total,k}} \right)^2} \\ &= \sum_{k=2,3,4,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_{(rms),k}}{Z_{total,k}} \right) \end{aligned} \quad (5.8)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (5.8) สามารถจัดรูปความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_{s(rms)} &= \sqrt{\left(\frac{V_{s(rms),1}}{Z_{total,1}} \right)^2 + \left(\sum_{k=2,3,4,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_{s(rms),k}}{Z_{total,k}} \right) \right)^2} \\ &= \frac{V_{(rms),1}}{Z_{total,1}} + \sum_{k=2,3,4,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_{(rms),k}}{Z_{total,k}} \right) \\ &= I_{s(rms),1} + I_{s(rms),2} + I_{s(rms),3} + \dots + I_{s(rms),\infty} \end{aligned} \quad (5.9)$$

ถ้าจัดให้แรงดันไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์อยู่ในรูปแบบของพารามิเตอร์กลุ่มก้อน จะได้ความสัมพันธ์ใหม่
ของค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ (5.10)

$$I_{s(rms)} = \sum_{k=1,2,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_{s(rms),k}}{Z_{total,k}} \right) = \frac{V_{rms}}{Z_{total}} \quad (5.10)$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าอินพุตสามารถหาได้จาก

$$P_{input} = \sum_{k=1}^{\infty} P_k = \sum_{k=1}^{\infty} (v_k(t) \cdot i_k(t)) \quad (5.11)$$

ค่าประกอบกำลังไฟฟ้าของฮาร์โมนิกส์ที่ k ของมอเตอร์ สามารถคำนวณหาได้จากอิมพีแดนซ์รวม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฮาร์โมนิกส์ที่ k ของมอเตอร์ และกำลังไฟฟ้าจริงของฮาร์โมนิกส์ที่ k ได้จากสมการที่ (5.12)

และ (5.13) ตามลำดับ

$$PF_k = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_{total,k})}{\text{Re}(\mathbf{Z}_{total,k})} \right) \right) \quad (5.12)$$

$$P_k = V_{s(rms),k} I_{s(rms),k} (PF_k) = (v_k(t) \cdot i_k(t)) \quad (5.13)$$

แต่ถ้าจัดอยู่ในรูปของอยู่ในรูปแบบของพารามิเตอร์กลุ่มก้อน จะได้

$$P_{input} = V_{s(rms)} I_{s(rms)} (PF) \quad (5.14)$$

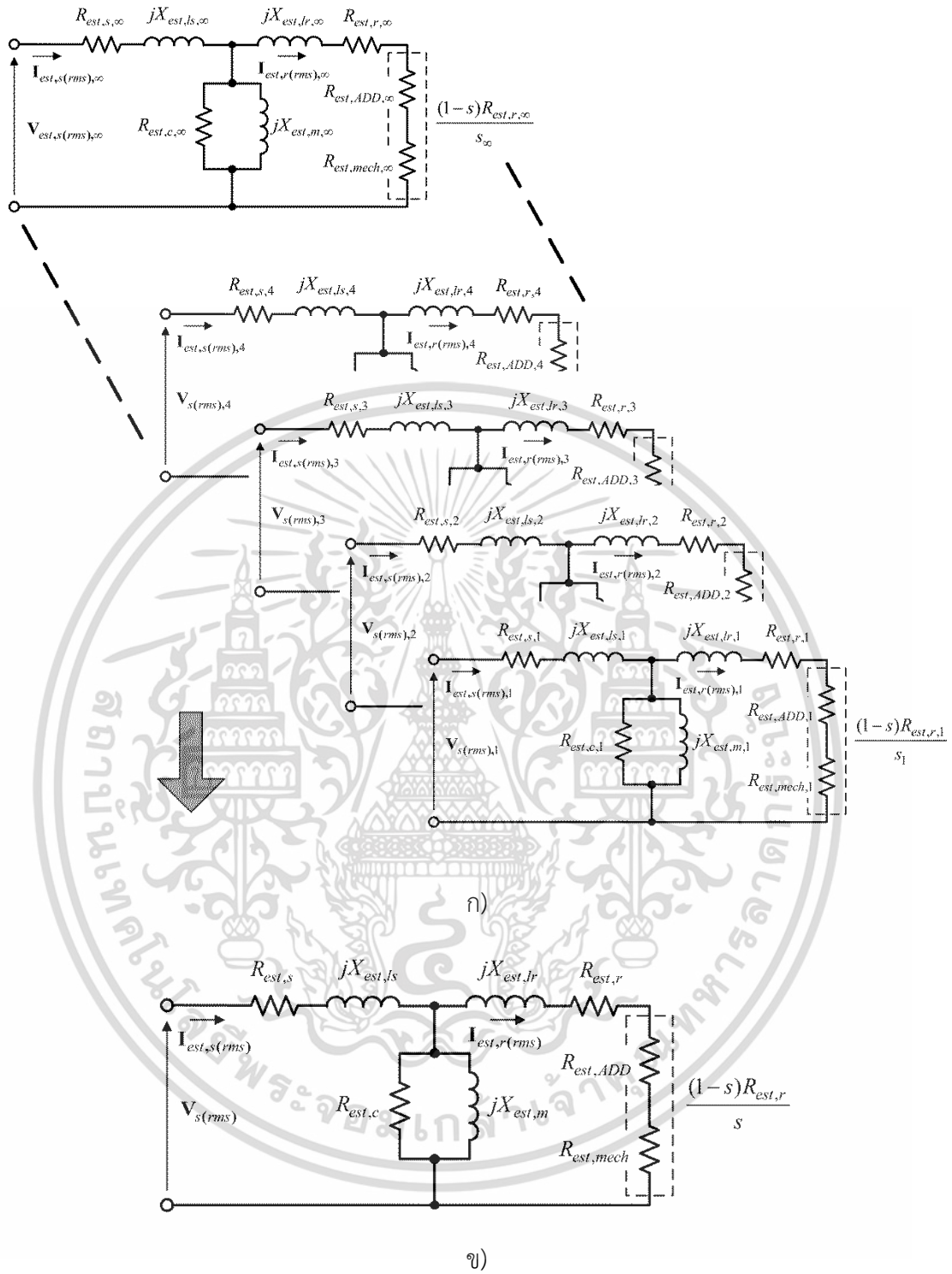
$$PF = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_{total})}{\text{Re}(\mathbf{Z}_{total})} \right) \right) \quad (5.15)$$

เมื่อ $V_{s(rms),k}$, $I_{s(rms),k}$ และ P_k เป็นปริมาณของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และ กำลังไฟฟ้าจริงของฮาร์โมนิกส์ที่ k โดยกำหนดให้ $v_k(t)$ และ $i_k(t)$ เป็นฟังก์ชันขณะหนึ่ง (instantaneous function) ของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ฮาร์โมนิกส์ที่ k ตามลำดับ

จากทฤษฎีบทการทับซ้อน ซึ่งเป็นหลักการแยกวงจรสมมูลออกเป็นส่วนของแต่ละความถี่ แต่เมื่อนำมาพิจารณาให้อยู่ในรูปแบบของพารามิเตอร์วงจรกลุ่มก้อน แสดงดังรูปที่ 5.1 ข) สามารถที่จะนำมาประเมินผลหรือคำนวณหาสมรรถนะของมอเตอร์ได้ แสดงดังสมการที่ (5.2) – (5.15) จากต้นแบบความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบดั้งเดิมเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ไม่มีการพิจารณาผลของความสูญเสียของแกนเหล็ก ความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกลและค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวงจรสมมูลที่ปรับปรุงโดยเพิ่มพารามิเตอร์ของค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก ความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล [68] และค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรง

ต้านลม เพื่อให้สามารถตอบสนองพฤติกรรมจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แสดงวงจรสมมูลดังรูปที่ 5.2

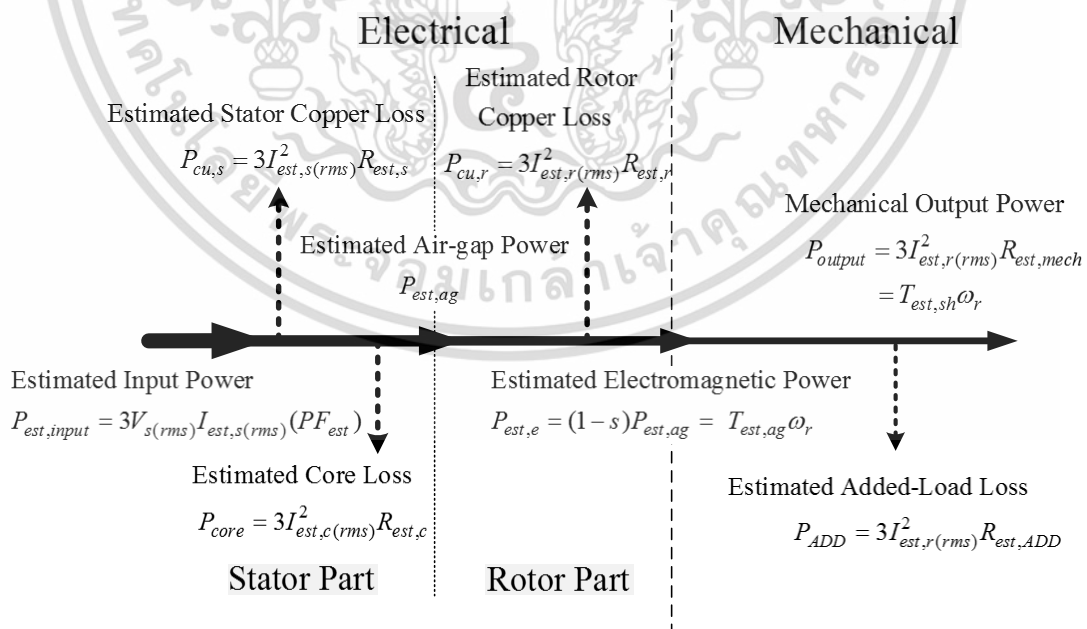
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 ก) พารามิเตอร์ประมาณของวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ปรับปรุง เมื่อ $R_{est,s}, X_{est,ls}, R_{est,r}, X_{est,lr}, R_{est,c}$ และ $X_{est,m}$ ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดทางด้านสเตเตอร์, รีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วทางด้านสเตเตอร์, ความต้านทานไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงด้านสเตเตอร์, รีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์, ความต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากความสูญเสียของแกนเหล็ก, และรีแอกแตนซ์จากการสร้างสนามแม่เหล็กตามลำดับ วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ ต้นแบบความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 5.3 โดยได้ปรับปรุงด้วยการเพิ่มความสูญเสียจากการเพิ่มภาระทางกลโดยประมาณ (estimated added-load loss) แทนด้วยพารามิเตอร์ $R_{est,ADD}$ ซึ่งความสูญเสียดังกล่าว เป็นผลรวมของความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล และความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลม เพื่อให้ต้นแบบความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแสดงพฤติกรรมได้อย่างถูกต้อง และจะส่งผลต่อความแม่นยำในการประเมินหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ปรับปรุง ดังรูปที่ 5.2 ข)



รูปที่ 5.3 ต้นแบบความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล และความสูญเสียจากเสียดทานกับแรง

ต้านลม จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) เมื่อนำมารวมกัน จะได้ดังสมการที่ (5.16)

$$R_{est,ADD} = m_{est,SLL} \frac{(1-s_{fl})R_{est,r}}{s_{fl}} + m_{est,FWL} a_{FWL} \left(\frac{n_r}{n_{fl}} \right)^3 \frac{(1-s_{fl})R_{est,r}}{s_{fl}} \quad (5.16)$$

จากสมการที่ (5.16) สามารถจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังสมการที่ (5.17)

$$R_{est,ADD} = m_{est,ADD} \frac{(1-s_{fl})R_{est,r}}{s_{fl}} \quad (5.17)$$

$$\therefore m_{est,ADD} = m_{est,SLL} + m_{est,FWL} a_{FWL} \left(\frac{n_r}{n_{fl}} \right)^3$$

เมื่อ $m_{est,ADD}$ เป็น พารามิเตอร์ประมาณต่อหน่วยของความสูญเสียเนื่องจากการเพิ่มภาระทางกล เป็น s_{fl} เป็นค่าสลิปที่พิกัดภาระทางกล n_{fl} สำหรับวงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่ได้นำเสนอตั้งรูปที่ 5.2 ข) สามารถเขียนสมการของพารามิเตอร์กำลังโรเตอร์เอาท์พุทโดยประมาณ (estimated rotor output parameter) ได้ดังนี้

$$\frac{(1-s)R_{est,r}}{s} = R_{est,ADD} + R_{est,mech} \quad (5.18)$$

และพารามิเตอร์กำลังทางกลโดยประมาณ ($R_{est,mech}$) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$R_{est,mech} = \frac{(1-s)R_{est,r}}{s} - R_{est,ADD} \quad (5.19)$$

จากรูปที่ 5.2 ข) ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์รวมโดยประมาณ ($Z_{est,total}$) ของมอเตอร์ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Z_{est,ss} = R_{est,s} + jX_{est,ls} \quad (5.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{Z}_{est,rr} = R_{est,mech} + R_{est,ADD} + R_{est,r} + jX_{est,lr} \quad (5.21)$$

$$\mathbf{Z}_{est,mc} = \frac{R_{est,c}jX_{est,m}}{R_{est,c} + jX_{est,m}} \quad (5.22)$$

$$\mathbf{Z}_{est,rmc} = \frac{\mathbf{Z}_{est,rr}\mathbf{Z}_{est,mc}}{\mathbf{Z}_{est,rr} + \mathbf{Z}_{est,mc}} \quad (5.23)$$

$$\mathbf{Z}_{est,total} = \mathbf{Z}_{est,ss} + \mathbf{Z}_{est,rmc} \quad (5.24)$$

ตัวประกอบกำลังโดยประมาณ (PF_{est}) คำนวณได้จากอิมพีแดนซ์รวมโดยประมาณของมอเตอร์ ดังนี้

$$PF_{est} = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_{est,total})}{\text{Re}(\mathbf{Z}_{est,total})} \right) \right) \quad (5.25)$$

เฟสเซอร์กระแสไฟฟ้าอินพุทโดยประมาณ ($\mathbf{I}_{est,s(rms)}$) สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$\mathbf{I}_{est,s(rms)} = \frac{\mathbf{V}_{s(rms)}}{\mathbf{Z}_{est,total}} \quad (5.26)$$

กำลังไฟฟ้าอินพุทโดยประมาณ หาได้ดังนี้

$$P_{est,input} = 3V_{s(rms)} I_{est,s(rms)} (PF_{est}) \quad (5.27)$$

เมื่อ $V_{s(rms)}$ และ $I_{est,s(rms)}$ เป็นค่าประสิทธิภาพของแรงดันไฟฟ้าอินพุทต่อเฟสและกระแสไฟฟ้า

อินพุทโดยประมาณ ตามลำดับ

ดังนั้นเฟสเซอร์ของกระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์โดยประมาณ แทนด้วย $\mathbf{I}_{est,r(rms)}$

สามารถคำนวณหาได้จากสมการนี้

$$\mathbf{I}_{est,r(rms)} = \frac{\mathbf{I}_{est,s(rms)}\mathbf{Z}_{est,rmc}}{\mathbf{Z}_{est,rr} + \mathbf{Z}_{est,rmc}} \quad (5.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ดังรูปที่ 5.2 ข) เมื่อนำมาแสดงการไหลกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ดังรูปที่ 5.3 สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

ความสูญเสียที่ขดลวดทางด้านสเตเตอร์โดยประมาณ

$$P_{est,cu,s} = 3I_{est,s(rms)}^2 R_{est,s} \quad (5.29)$$

ความสูญเสียที่แกนเหล็กโดยประมาณ

$$P_{est,core} = 3I_{est,c(rms)}^2 R_{est,c} \quad (5.30)$$

เมื่อ $I_{est,c(rms)}$ เป็นค่าประสิทธิผลของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความสูญเสียที่แกนเหล็กโดยประมาณกำลังที่ช่องอากาศโดยประมาณ

$$P_{est,ag} = P_{input} - P_{est,cu,s} - P_{est,core} \quad (5.31)$$

ความสูญเสียที่ขดลวดทางด้านโรเตอร์โดยประมาณ

$$P_{est,cu,r} = 3I_{est,r(rms)}^2 R_{est,r} \quad (5.32)$$

กำลังทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยประมาณ

$$P_{est,e} = P_{est,ag} - P_{est,cu,r} \quad (5.33)$$

ความสูญเสียจากการเพิ่มภาระทางกลโดยประมาณ

$$P_{est,ADD} = 3I_{est,r(rms)}^2 R_{est,ADD} \quad (5.34)$$

เมื่อ $I_{est,r(rms)}$ เป็นค่าประสิทธิผลของกระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์โดยประมาณ

กำลังเอาต์พุตทางกลโดยประมาณ

$$P_{est,output} = P_{est,e} - P_{est,ADD} \quad (5.35)$$

หรือ
$$P_{est,output} = 3I_{r(rms)}^2 R_{est,mech} \quad (5.36)$$

แรงบิดที่เพลลาโดยประมาณ ($T_{est,sh}$)

$$T_{est,sh} = \frac{P_{est,output}}{\omega_r} \quad (5.37)$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง กำลังทางกลโดยประมาณที่ได้จากสมการที่ (5.35) หรือ (5.36) กับ กำลังไฟฟ้าอินพุตโดยประมาณที่คำนวณได้จากสมการที่ (5.27) แสดงดังสมการที่ (5.39)

$$\eta_{est} = \frac{P_{est,output}}{P_{est,input}} \quad (5.38)$$

5.3 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์โดยวิธีการ AOD

ในบทนี้นำเสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะมีขั้นตอนที่เหมือนกันกับในบทที่ 4 แต่จะใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 5.2 โดยจะต้องมีการปรับปรุงหรือแก้ไขฟังก์ชันเป้าหมาย กับฟังก์ชันความเหมาะสมของขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ สำหรับการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ จะใช้ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม แสดงค่าเริ่มต้นดังตารางที่ 5.1 โดยรูปที่ 5.4 แสดงกระบวนการของขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลของวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้

Parameters of GA			
Number of Population	20,000	Crossover function	Heuristic Crossover
Number of Generation	200	Mutation function	Non-uniform mutation
Selection Function	Normalized Geometric	Variables	7

Initial ranges of design variables			
Parameters	Ranges	Parameters	Ranges
$R_{est,1}$ (Ω)	0.001 - 20	$X_{est,1}$ (Ω)	0.01 - 20
$X_{est,m}$ (Ω)	1 - 2000	$R_{est,c}$ (Ω)	1 - 2000
$X_{est,2}$ (Ω)	0.01 - 20	$R_{est,2}$ (Ω)	0.001 - 10
$m_{est,ADD}$ (p.u.)	0.001 - 0.03		

ขั้นตอนที่ 1) ขั้นตอนกำหนดกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ ที่นำเสนอมีแนวความคิดที่จะทำการหาขอบเขตของตัวแปรออกแบบให้เหมาะสม โดยข้อมูลอินพุตมีเงื่อนไขแตกต่างกัน ซึ่งแสดงกระบวนการดังรูปที่ 5.4 เริ่มต้นโดยการกำหนดตัวแปรออกแบบสำหรับวงจรสมมูลที่ปรับปรุงได้แก่ $R_{est,s}$, $X_{est,ls}$, $R_{est,r}$, $X_{est,lr}$, $R_{est,c}$, $X_{est,m}$ และ $R_{est,ADD}$

ขั้นตอนที่ 2) จากรูปที่ 5.4 จำลองการทำงานของมอเตอร์ที่พิกัดทางกล โดยกำหนดให้ความเร็วและความถี่มีค่าเท่ากับป้ายพิกัด แล้วคำนวณหา กระแสไฟฟ้าอินพุตโดยประมาณที่พิกัดภาระทางกล ($I_{est,fl}$) แรงบิดโดยประมาณที่พิกัด ($T_{est,fl}$) กำลังไฟฟ้าอินพุตโดยประมาณที่พิกัดภาระทางกล ($P_{est,fl}$) ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าโดยประมาณที่พิกัดภาระทางกล ($PF_{est,fl}$) และประสิทธิภาพโดยประมาณที่พิกัดภาระทางกล ($\eta_{est,fl}$) โดยใช้ค่าตัวแปรออกแบบที่ได้จากกระบวนการที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากข้อมูลจากป้ายข้อมูล (A)

โดยใช้สมการเป้าหมาย ($F_{obj, boundary}$) แสดงดังสมการที่ (5.39)

$$\begin{aligned}
 F_{obj, boundary} = & \frac{1}{2} \left[\frac{I_{est, fl}}{I_{nameplate, fl}} - 1 \right]^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{T_{est, fl}}{T_{nameplate, fl}} - 1 \right]^2 \\
 & + \frac{1}{2} \left[\frac{P_{est, fl}}{P_{nameplate, fl}} - 1 \right]^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{\eta_{est, fl}}{\eta_{nameplate, fl}} - 1 \right]^2 \\
 & + \frac{1}{2} \left[\frac{PF_{est, fl}}{PF_{nameplate, fl}} - 1 \right]^2
 \end{aligned} \quad (5.39)$$

โดยให้ฟังก์ชันความเหมาะสม จากสมการที่ (5.40) มีค่าสูงสุด

$$Fitness = \frac{1}{1 + F_{obj, boundary}} \quad (5.40)$$

เมื่อ ตัวห้อย fl หมายถึง พิกัดภาระทางกล และ $nameplate$ หมายถึง ค่าที่ได้จากการป้ายพิกัด หรือข้อมูลจากผู้ผลิต และขอบเขตตัวแปรออกแบบที่เป็นไปได้ (E) สามารถประมวลผลด้วยวิธีการที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนที่ 3) จากนั้น กำหนดขอบเขตต่ำสุดและขอบเขตสูงสุดของตัวแปรออกแบบสำหรับวงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่เป็นไปได้ (F) โดยการปรับพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลให้อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ (f_{op}) เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5.41) - (5.46) ดังนี้

$$a_R R_{bound, s} \leq R_{est, s} \leq b_R R_{bound, s} \quad (5.41)$$

$$a_R R_{bound, c} \leq R_{est, c} \leq b_R R_{bound, c} \quad (5.42)$$

$$a_R \left(\frac{f_b}{f_{op}} \right) R_{bound, r} \leq R_{est, r} \leq b_R \left(\frac{f_b}{f_{op}} \right) R_{bound, r} \quad (5.43)$$

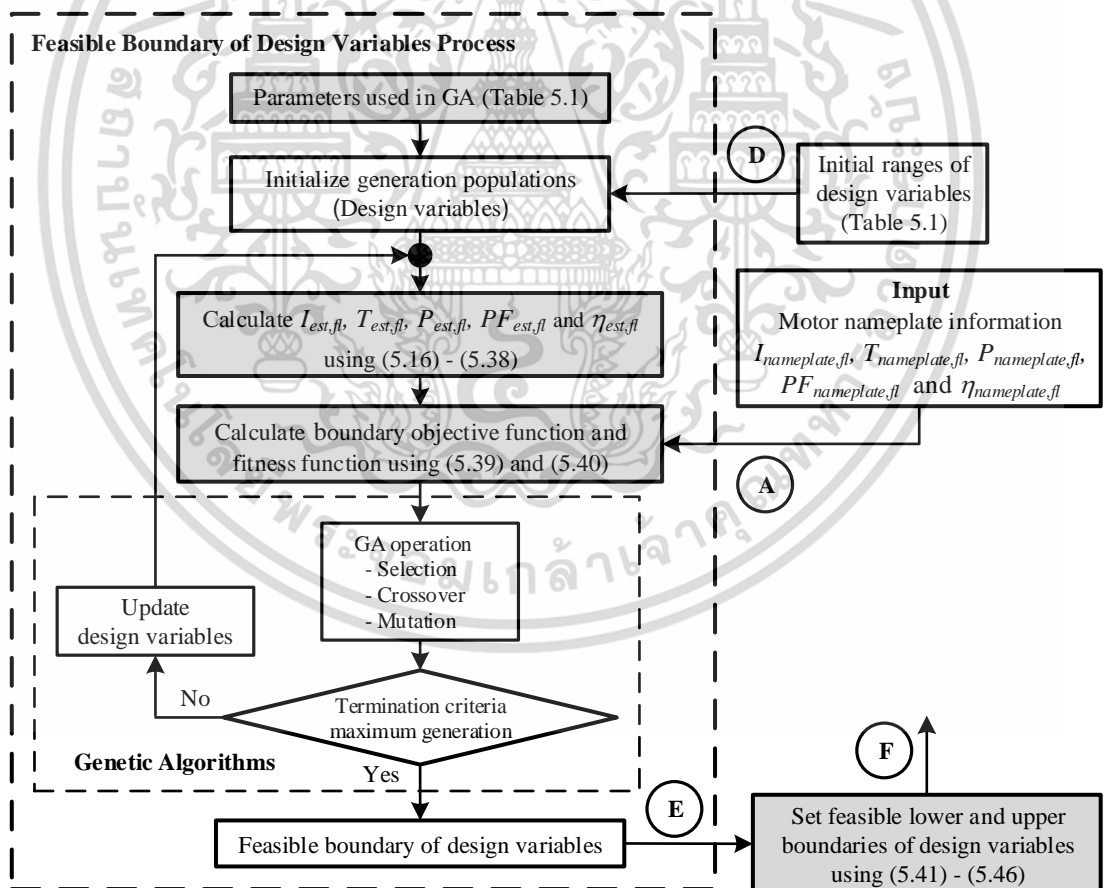
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_X \left(\frac{f_{op}}{f_b} \right) X_{bound,ls} \leq X_{est,ls} \leq b_X \left(\frac{f_{op}}{f_b} \right) X_{bound,ls} \tag{5.44}$$

$$a_X \left(\frac{f_{op}}{f_b} \right) X_{bound,lr} \leq X_{est,lr} \leq b_X \left(\frac{f_{op}}{f_b} \right) X_{bound,lr} \tag{5.45}$$

$$a_X \left(\frac{f_{op}}{f_b} \right) X_{bound,m} \leq X_{est,m} \leq b_X \left(\frac{f_{op}}{f_b} \right) X_{bound,m} \tag{5.46}$$

กำหนดให้ a_R : ค่าต่อหน่วยของขอบล่าง และ b_R : ค่าต่อหน่วยของขอบบน ของพารามิเตอร์ที่อยู่ในรูปของค่าต้านทานไฟฟ้า สำหรับ a_X : ค่าต่อหน่วยของขอบล่าง และ b_X : ค่าต่อหน่วยของขอบบนของพารามิเตอร์ที่อยู่ในรูปของรีแอกแตนซ์



รูปที่ 5.4 ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลเริ่มต้นของขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม

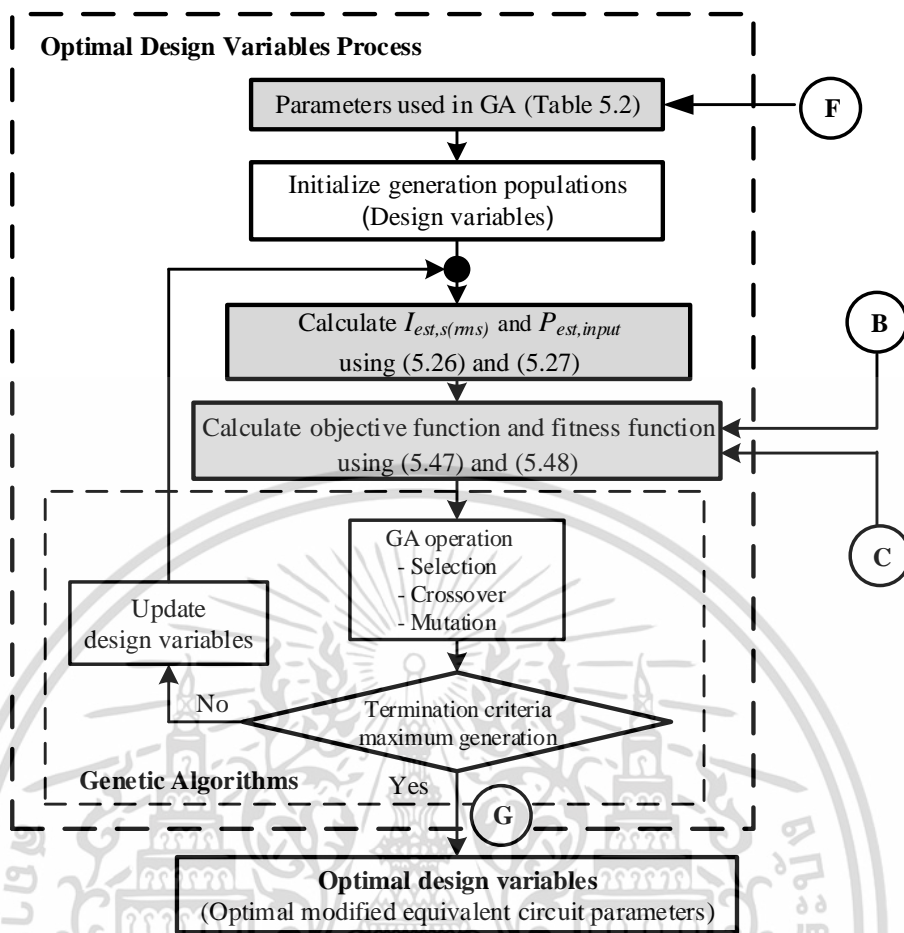
Parameters of GA			
Number of Population	20,000	Crossover function	Heuristic Crossover
Number of Generation	200	Mutation function	Non-uniform mutation
Selection Function	Normalized Geometric	Variables	7

สำหรับในบทนี้จะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรมเท่านั้น เนื่องจากข้อสรุปในบทที่ 4 ดังนั้นวิธีการหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม จะใช้ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม แสดงค่าเริ่มต้นดังตารางที่ 5.2 สำหรับวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 5.5 - 5.6 ตามลำดับ โดยรูปที่ 5.5 แสดงกระบวนการขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม และวิธีการ AOD เสนอในรูปที่ 5.6 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดตัวแปรออกแบบ สำหรับวงจรสมมูลที่ปรับปรุง ได้แก่ $R_{est,s}$, $X_{est,ls}$, $R_{est,r}$, $X_{est,lr}$, $R_{est,c}$, $X_{est,m}$ และ $R_{est,ADD}$ จากนั้นป้อนข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าอินพุท และความเร็วของมอเตอร์ (**A**, **B** และ **C**) โดยข้อมูลทางไฟฟ้าจะวัดด้วยเครื่องมือวัดแบบค่าประสิทธิภาพที่เป็นจริง (true rms) และข้อมูลของมอเตอร์จากป้ายพิกัด

ขั้นตอนที่ 2) วิธีการ AOD ประกอบด้วย 2 กระบวนการ ได้แก่ ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ และขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม โดยวิธีที่นำเสนอจะเริ่มจากการหาช่วงของขอบเขตที่เป็นไปได้ (**A**) ด้วยขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ ซึ่งจะได้ขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ (**F**)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

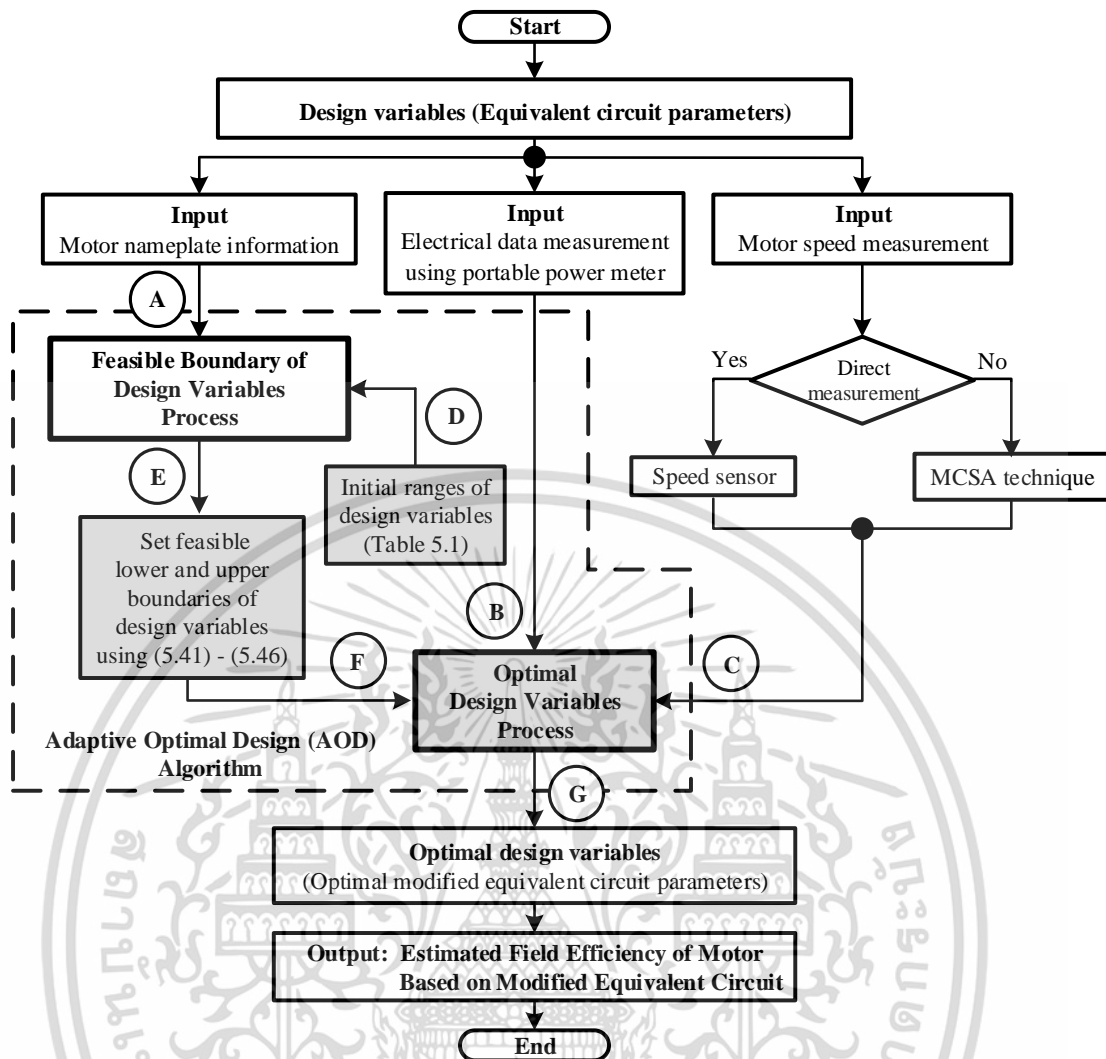


รูปที่ 5.5 ขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 3) จากนั้นขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.5 จะหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุง เพื่อคำนวณกระแสไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าอินพุต ตามสมการที่ (5.26) และ (5.27) ตามลำดับ ขั้นตอนต่อมา ทำการเปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าอินพุตที่จากการคำนวณ กับกระแสไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าอินพุตที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงาน (B และ C) ตามสมการเป้าหมาย ดังสมการที่ (5.47)

$$F_{obj} = \frac{1}{2} \left| \frac{I_{est,s(rms)}}{I_{mea,s(rms)}} - 1 \right|^2 + \frac{1}{2} \left| \frac{P_{est,input}}{P_{mea,input}} - 1 \right|^2 \quad (5.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 ขั้นตอนของการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว

เมื่อ $I_{est,s(rms)}$ และ $P_{est,input}$ หมายถึง กระแสไฟฟ้าอินพุตโดยประมาณ และ กำลังไฟฟ้ายินพุตโดยประมาณ ตามลำดับ $I_{mea,s(rms)}$ และ $P_{mea,input}$ หมายถึง กระแสไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้ายินพุตที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงานตามลำดับ ตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม (G) ได้จากการประมวลผลโดยใช้กระบวนการวิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อให้ฟังก์ชันความเหมาะสม ดังสมการที่ (5.48) มีค่าสูงสุด

$$Fitness = \frac{1}{1 + F_{obj}} \quad (5.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4) จากรูปที่ 5.6 นำค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ประมาณของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่ได้ จากขั้นตอนที่ 3 และข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และความเร็วของมอเตอร์ มาหาคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์ เหนี่ยวนำในขณะใช้งาน โดยมีขั้นตอนดังสมการที่ (5.16) – (5.38)

5.4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

เพื่อเป็นยืนยันวิธีการที่นำเสนอ จึงได้ทำทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 พิกัด ได้แก่ 2.2 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งแสดงข้อมูลรายละเอียดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังตารางที่ 5.3 โดยอินเวอร์เตอร์ กำหนดความถี่การสวิตช์ (switch frequency) เท่ากับ 2 kHz

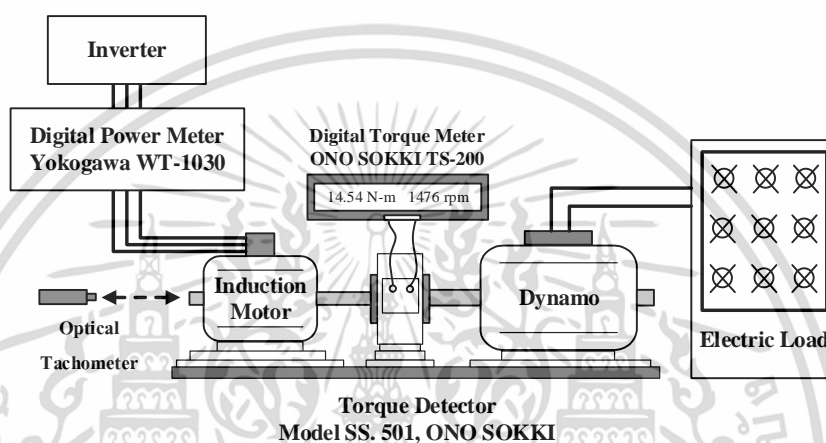
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากป้ายพิกัด

Motor	2.2 kW	4.0 kW
Hz	50	50
V	220/380	380
A	8.7/5.0	8.8
r/min	1420	1440
p.f.	0.82	0.82
Pole	4	4

การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีการ AOD เริ่มต้นจากการนำข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในตารางที่ 5.3 ใช้ในขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบเพื่อหาขอบเขตต่ำสุดและสูงสุด จากนั้นจำลองการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยกำหนดความถี่ของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 30 Hz, 40 Hz, และ 50 Hz ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแรงบิดคงที่ โดยจะขับภาระทางกลตั้งแต่ประมาณ 30% - 100% ของแรงบิดที่พิกัด และควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 60 Hz ซึ่งอยู่ในโหมดกำลังทางกลคงที่ โดยจะขับภาระ

ทางกลตั้งแต่ประมาณ 30% - 100% ของกำลังทางกลที่พิกัด แล้ววัดข้อมูลในขณะที่มอเตอร์ทำงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุท กำลังไฟฟ้าอินพุท และความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.4 และ 5.5 สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW และ 4.0 kW ตามลำดับ ข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงาน เป็นข้อมูลสำหรับขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงเพื่อนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ จากนั้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้วิธีการ CM กับวิธีการ LT แสดงวงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 วงจรการทดสอบภาระทางกลเมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

แรงบิดที่ได้จากวิธีการ AOD ของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ที่ควบคุมความถี่เท่ากับ 30 Hz 40 Hz 50 Hz และ 60 Hz กรณีความถี่ 30 Hz ที่ Load V วิธีการ AOD เท่ากับ 14.90 N-m วิธีการ CM เท่ากับ 25.92 N-m และแรงบิดที่ได้จากวิธีการ LT เท่ากับ 14.99 N-m จะพบว่าวิธีการ CM มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ -72.92 % และวิธีการ AOD มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ 0.60 % และกรณีความถี่ 60 Hz ที่ Load III พบว่าวิธีการ CM และวิธีการ AOD มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 5.76 % และ 0.32 % ตามลำดับ สำหรับที่ความถี่ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5.6 พบว่าวิธีการ AOD มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 2 % สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 4.0 kW ได้ผลเช่นเดียวกับกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW วิธีการ AOD มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 2 % แสดงดังตารางที่ 5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW, 4-pole เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

Load	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Speed (rpm)	Torque (N-m)
Frequency : 30 Hz					
I	351.80	2.881	700	875	5.00
II	355.09	3.355	980	864	7.50
III	357.69	3.875	1260	852	10.00
IV	360.29	4.449	1570	838	12.49
V	363.23	5.074	1891	823	14.99
Frequency : 40 Hz					
I	405.50	2.877	900	1173	5.00
II	407.76	3.345	1260	1161	7.50
III	410.03	3.892	1640	1148	10.00
IV	410.73	4.457	2010	1136	12.49
V	413.16	5.104	2430	1120	14.99
Frequency : 50 Hz					
I	445.30	2.878	1090	1473	5.00
II	447.20	3.353	1550	1460	7.50
III	448.41	3.933	2010	1447	10.00
IV	448.58	4.487	2480	1432	12.50
V	449.62	5.130	2980	1415	14.99
Frequency : 60 Hz					
I	452.10	2.58	1240	1767	5.00
II	450.03	3.214	1770	1750	7.50
III	449.17	3.968	2340	1729	10.00
IV	448.13	4.778	2920	1706	12.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW, 4-pole เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

Load	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Speed (rpm)	Torque (N-m)
Frequency : 30 Hz					
I	350.0	5.287	1164	881	9.00
II	354.2	6.182	1648	872	13.49
III	359.2	7.155	2141	865	17.99
IV	365.4	8.187	2658	857	22.49
V	368.7	9.237	3178	850	26.99
Frequency : 40 Hz					
I	399.4	5.176	1509	1180	9.00
II	403.0	6.041	2130	1170	13.49
III	406.1	6.996	2767	1162	17.99
IV	409.4	8.006	3423	1154	22.49
V	413.6	9.035	4095	1145	26.99
Frequency : 50 Hz					
I	444.3	5.100	1863	1478	9.00
II	444.2	5.887	2621	1468	13.49
III	444.2	6.791	3394	1458	17.99
IV	444.5	7.816	4190	1446	22.49
V	444.0	8.890	4977	1434	26.99
Frequency : 60 Hz					
I	451.9	4.396	2132	1770	9.00
II	450.3	5.517	3138	1756	13.49
III	448.9	6.807	3968	1741	17.99
IV	447.9	8.249	4948	1722	22.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW ที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ

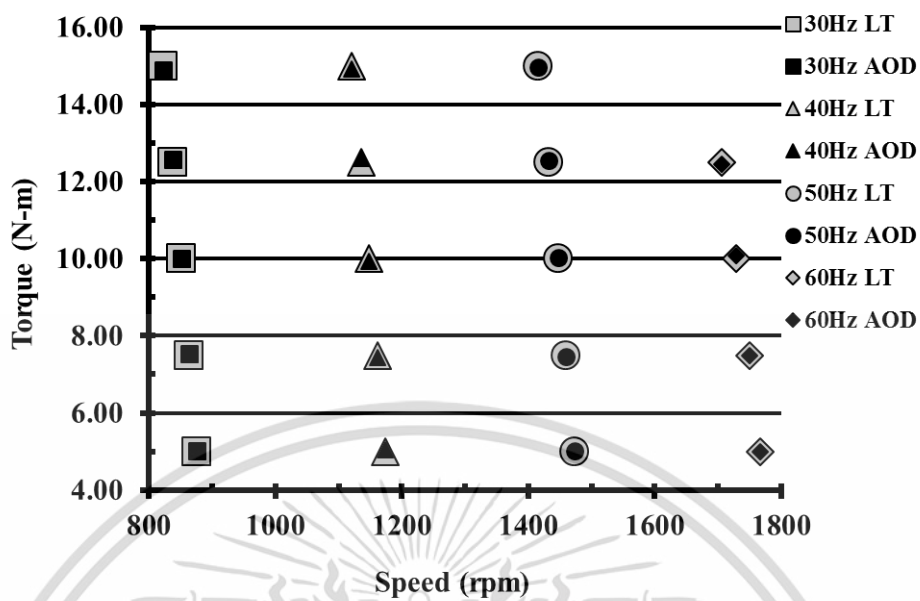
Load		Load I	Load II	Load III	Load IV	Load V
Frequency : 30 Hz						
Torque (N-m)	CM	13.84	16.32	19.12	22.32	25.92
	AOD	5.01	7.52	10.00	12.58	14.90
	LT	5.00	7.50	10.00	12.49	14.99
Relative Error (%)	CM	-176.80	-117.60	-91.20	-78.70	-72.92
	AOD	-0.20	-0.27	0.00	-0.72	0.60
Frequency : 40 Hz						
Torque (N-m)	CM	10.31	12.11	14.25	16.49	19.16
	AOD	5.04	7.43	9.92	12.59	14.91
	LT	5.00	7.50	10.00	12.49	14.99
Relative Error (%)	CM	-106.20	-61.47	-42.50	-32.03	-27.82
	AOD	-0.80	0.93	0.80	-0.80	0.53
Frequency : 50 Hz						
Torque (N-m)	CM	8.21	9.65	11.43	13.17	15.24
	AOD	5.02	7.46	10.02	12.55	14.97
	LT	5.00	7.50	10.00	12.50	14.99
Relative Error (%)	CM	-64.20	-28.67	-14.30	-5.36	-1.67
	AOD	-0.40	0.53	-0.20	-0.40	0.13
Frequency : 60 Hz						
Torque (N-m)	CM	6.14	7.72	9.65	11.77	-
	AOD	4.98	7.48	10.07	12.45	-
	LT	5.00	7.50	10.00	12.49	-
Relative Error (%)	CM	-22.80	-2.93	3.50	5.76	-
	AOD	0.40	0.27	-0.70	0.32	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

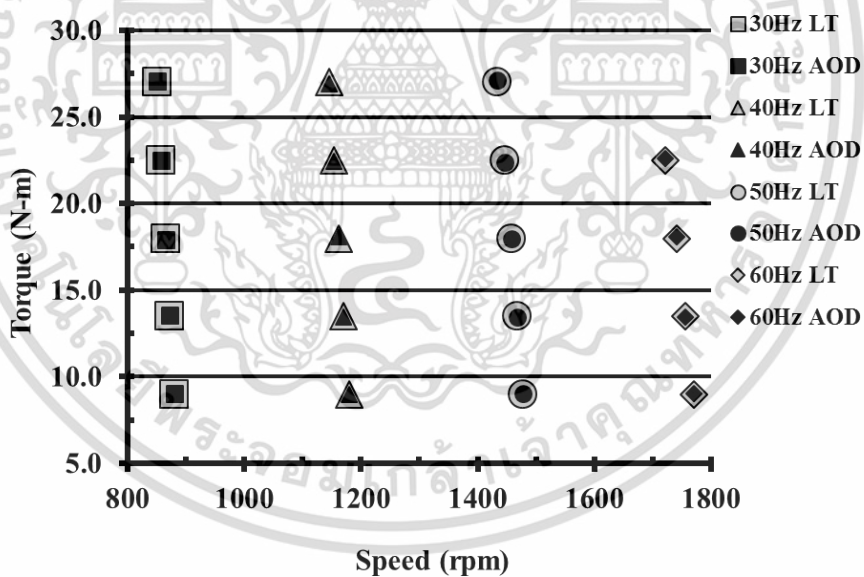
ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW ที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ

Load		Load I	Load II	Load III	Load IV	Load V
Frequency : 30 Hz						
Torque (N-m)	CM	25.23	29.80	34.77	40.16	45.68
	AOD	9.03	13.57	17.91	22.48	27.07
	LT	9.00	13.49	17.99	22.49	26.99
Relative Error (%)	CM	-180.33	-120.90	-93.27	-78.57	-69.25
	AOD	-0.33	-0.59	0.44	0.04	-0.30
Frequency : 40 Hz						
Torque (N-m)	CM	18.44	21.71	25.31	29.16	33.17
	AOD	8.95	13.45	18.09	22.44	26.91
	LT	9.00	13.49	17.99	22.49	26.99
Relative Error (%)	CM	-104.89	-60.93	-40.69	-29.66	-22.90
	AOD	-0.56	0.30	-0.56	0.22	0.30
Frequency : 50 Hz						
Torque (N-m)	CM	14.51	16.86	19.58	22.72	26.06
	AOD	9.04	13.46	17.94	22.40	27.11
	LT	9.00	13.49	17.99	22.49	26.99
Relative Error (%)	CM	-61.22	-24.98	-8.84	-1.02	3.45
	AOD	-0.44	0.22	0.28	0.40	-0.44
Frequency : 60 Hz						
Torque (N-m)	CM	10.44	13.21	16.44	20.14	-
	AOD	9.03	13.46	18.09	22.60	-
	LT	9.00	13.49	17.99	22.49	-
Relative Error (%)	CM	-16.00	2.08	8.62	10.45	-
	AOD	-0.33	0.22	-0.56	-0.49	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) พิกัด 2.2kW



ข) พิกัด 4.0 kW

รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW และ 4.0 kW

เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรูปที่ 5.8 เป็นการเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW และ 4.0 kW เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่เท่ากับ 30 Hz 40 Hz 50 Hz และ 60 Hz ระหว่างวิธีการ AOD กับวิธีการ LT

จากตารางที่ 5.8 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการ AOD ของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW กรณีความถี่เท่ากับ 30 Hz ที่ Load V ได้ผลดังนี้ วิธีการ AOD เท่ากับ 67.93 % วิธีการ CM เท่ากับ 118.06 % และวิธีการ LT เท่ากับ 68.36 % ซึ่งจะพบว่าวิธีการ CM มีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ -49.70 % และวิธีการ AOD มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ 0.43 % เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความถี่ 60 Hz ที่ Load III พบว่าวิธีการ CM และวิธีการ AOD มีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 2.76 % และ -0.62 % ตามลำดับ สำหรับที่ความถี่ต่างๆ มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 2 % สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 4.0 kW เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ที่ควบคุมความถี่เท่ากับ 30 Hz 40 Hz 50 Hz และ 60 Hz ได้ผลเหมือนกับกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 2 % แสดงข้อมูลดังตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.9 เป็นการเปรียบเทียบแรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์พิกัด 4.0 kW เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ที่ควบคุมความถี่เท่ากับ 30 Hz 40 Hz 50 Hz และ 60 Hz ระหว่างวิธีการ AOD กับวิธีการ LT

วิธีการ AOD สามารถนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพและแรงบิด เมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ที่ควบคุมความถี่เท่ากับ 30 Hz 40 Hz และ 50 Hz (แรงบิดคงที่) กับ 60 Hz (กำลังทางกลคงที่) กรณีประสิทธิภาพมีความผิดพลาดสัมบูรณ์ประมาณ 2 % และแรงบิดมีความผิดพลาดสัมพัทธ์ประมาณ 2 % ซึ่งแสดงว่าวงจรสมมูลปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ สามารถตอบสนองต่อพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้

ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW ที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ

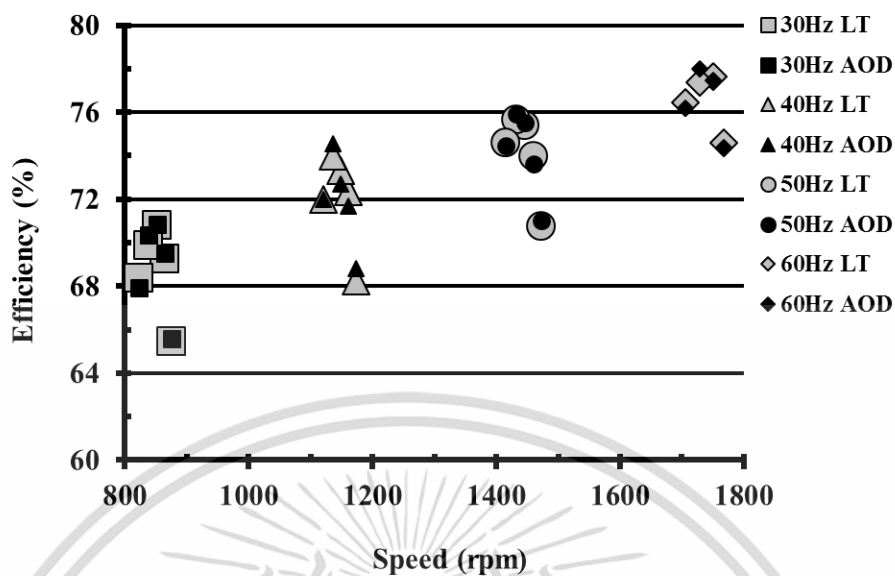
Load		Load I	Load II	Load III	Load IV	Load V
Frequency : 30 Hz						
Efficiency (%)	CM	181.09	150.63	135.32	124.69	118.06
	AOD	65.58	69.50	70.82	70.34	67.93
	LT	65.45	69.24	70.80	69.86	68.36
Absolute Error (%)	CM	-115.64	-81.39	-64.52	-54.83	-49.70
	AOD	-0.13	-0.26	-0.02	-0.48	0.43
Frequency : 40 Hz						
Efficiency (%)	CM	140.65	116.81	104.42	97.57	92.42
	AOD	68.83	71.66	72.70	74.54	71.98
	LT	68.24	72.36	73.30	73.98	72.01
Absolute Error (%)	CM	-72.41	-44.45	-31.12	-23.59	-20.41
	AOD	-0.59	0.70	0.60	-0.56	0.03
Frequency : 50 Hz						
Efficiency (%)	CM	116.18	95.18	86.10	79.61	75.74
	AOD	71.03	73.62	75.54	75.93	74.46
	LT	70.75	73.97	75.38	75.64	74.58
Absolute Error (%)	CM	-45.43	-21.21	-10.72	-3.97	-1.16
	AOD	-0.28	0.35	-0.16	-0.29	0.12
Frequency : 60 Hz						
Efficiency (%)	CM	91.55	79.90	74.61	72.00	-
	AOD	74.39	77.47	77.99	76.20	-
	LT	74.61	77.65	77.37	76.47	-
Absolute Error (%)	CM	-16.94	-2.25	2.76	4.47	-
	AOD	0.22	0.18	-0.62	0.27	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

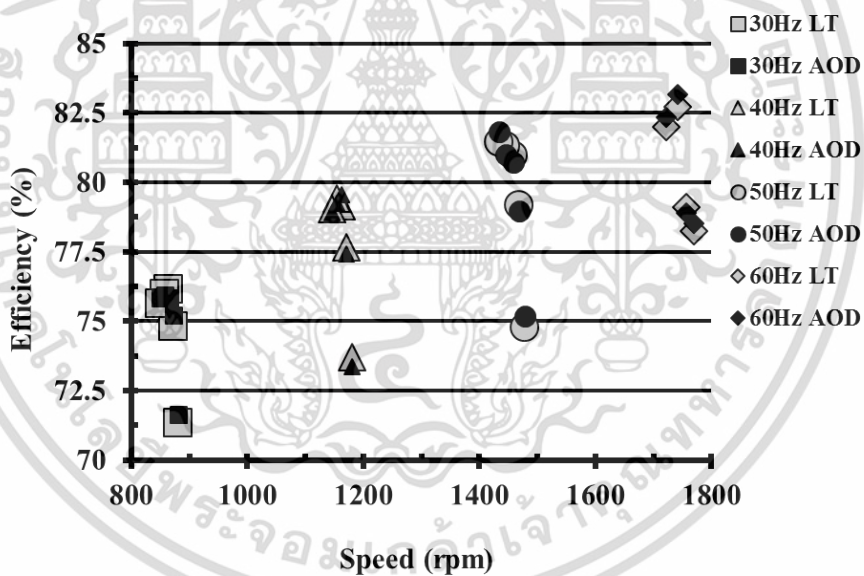
ตารางที่ 5.9 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW ที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ

Load		Load I	Load II	Load III	Load IV	Load V
Frequency : 30 Hz						
Efficiency (%)	CM	199.85	165.05	147.04	135.53	127.89
	AOD	71.62	75.23	75.82	75.94	75.84
	LT	71.33	74.8	76.15	75.96	75.62
Absolute Error (%)	CM	-128.52	-90.25	-70.89	-59.57	-52.27
	AOD	-0.29	-0.43	0.33	0.02	-0.22
Frequency : 40 Hz						
Efficiency (%)	CM	150.92	124.79	111.25	102.91	97.08
	AOD	73.36	77.41	79.57	79.24	78.89
	LT	73.69	77.65	79.15	79.43	79.05
Absolute Error (%)	CM	-77.23	-47.14	-32.10	-23.48	-18.03
	AOD	-0.33	0.24	-0.42	0.19	0.16
Frequency : 50 Hz						
Efficiency (%)	CM	120.45	98.83	88.04	82.08	78.59
	AOD	75.16	78.96	80.73	81.01	81.82
	LT	74.77	79.18	80.97	81.31	81.46
Absolute Error (%)	CM	-45.68	-19.65	-7.07	-0.77	2.87
	AOD	-0.39	0.22	0.24	0.30	-0.36
Frequency : 60 Hz						
Efficiency (%)	CM	90.72	77.36	75.48	73.35	-
	AOD	78.50	78.91	83.16	82.35	-
	LT	78.24	79.11	82.70	82.00	-
Absolute Error (%)	CM	-12.48	1.75	7.22	8.65	-
	AOD	-0.26	0.20	-0.46	-0.35	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) พิกัด 2.2 kW



ข) พิกัด 4.0 kW

รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW และ 4.0 kW

เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 การใช้วิธีการ AOD ร่วมกับการหาความเร็วของมอเตอร์ด้วย MCSA

เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

เพื่อเป็นยืนยันวิธีการที่นำเสนอสามารถนำมาประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ จึงได้ทำทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 2.2 kW 6 ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.10 สำหรับรายละเอียดในการทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบแรงบิดและประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการ AOD กับวิธีการ LT สำหรับวิธีการ AOD โดยจะเลือกใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรมในขั้นตอนหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรออกแบบร่วมกับการคำนวณความเร็วของมอเตอร์ด้วยเทคนิค MCSA เรียกว่า “AOD (MCSA)” แสดงวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.7

ตารางที่ 5.10 ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากป้ายพิกัด

	4.0 kW	2.2 kW
Hz	50	50
V	380	380 / 220
A	8.8	5.5 / 9.5
r/min	1440	940
p.f.	0.82	0.75
Pole	4	6

โดยที่ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทั้ง 2 พิกัด โดยทำการควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 40 Hz, และ 50 Hz ซึ่งเป็นการควบคุมในโหมดแรงบิดคงที่ โดยจะขับภาระทางกลตั้งแต่ประมาณ 30% - 100% ของแรงบิดที่พิกัด และ ควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 60 Hz ซึ่งอยู่ในโหมดกำลังทางกลคงที่ โดยจะขับภาระทางกลตั้งแต่ประมาณ 30% -

100% ของกำลังทางกลที่พิกัด แล้ววัดข้อมูลในขณะที่มอเตอร์ทำงานได้แก่ แรงดันไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าอินพุท และกำลังไฟฟ้าอินพุท สำหรับความเร็วของมอเตอร์ได้จากการคำนวณโดยใช้เทคนิค MCSA ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.11 และ 5.12 แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงาน เป็นข้อมูลสำหรับวิธีการ AOD แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการ CM และวิธีการ LT

ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW 6 ขั้วแม่เหล็ก

เมื่อความเร็วของมอเตอร์ได้จากการคำนวณโดยใช้เทคนิค MCSA [47]

Load	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Speed (rpm)	Torque (N-m)
Frequency : 40 Hz					
I	268.7	3.463	777	789.84	7.45
II	271.5	3.826	1128	778.13	11.18
III	267.5	4.306	1459	771.09	14.91
IV	267.7	4.846	1874	761.72	18.64
V	280.3	5.468	2280	750.00	22.36
Frequency : 50 Hz					
I	276.4	3.421	954	984.37	7.45
II	281.8	3.794	1374	977.34	11.18
III	277.2	4.273	1822	970.31	14.91
IV	274.6	4.788	2255	960.93	18.64
V	282.9	5.413	2758	949.22	22.36
Frequency : 60 Hz					
I	277.9	2.940	1045	1178.90	7.45
II	277.6	3.505	1555	1167.18	11.18
III	276.6	4.187	2085	1155.16	14.91
IV	276.4	5.016	2682	1139.06	18.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก

เมื่อความเร็วของมอเตอร์ได้จากการคำนวณโดยใช้เทคนิค MCSA [47]

Load	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Speed (rpm)	Torque (N-m)
Frequency : 40 Hz					
I	398.1	4.871	1364	1181.25	9.02
II	399.0	5.666	1994	1171.88	13.53
III	400.1	6.543	2597	1162.50	18.05
IV	402.0	7.514	3223	1153.13	22.56
V	403.9	8.500	3825	1141.40	27.07
Frequency : 50 Hz					
I	443.5	4.813	1628	1481.27	9.02
II	444.2	5.608	2398	1471.88	13.53
III	445.7	6.474	3144	1462.50	18.05
IV	446.8	7.450	3918	1450.78	22.56
V	446.4	8.507	4707	1439.06	27.07
Frequency : 60 Hz					
I	444.4	4.000	1809	1774.22	9.02
II	444.6	5.156	2733	1757.81	13.53
III	447.1	6.428	3649	1743.75	18.05
IV	442.5	7.904	4621	1722.65	22.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.13 เป็นการเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW พบว่าวิธี AOD (MCSA) มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 4 % เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ LT ดังเช่นกรณีทำงานที่ความถี่ 40 Hz ที่ Load III วิธี AOD (MCSA) เท่ากับ 15.0 N-m วิธีการ CM เท่ากับ 21.32 N-m และวิธีการ LT เท่ากับ 14.91 N-m พบว่าวิธีการ CM มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ -42.99 % และวิธี AOD (MCSA) มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ -0.60 % และเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความถี่ 60 Hz ที่ Load IV พบว่าวิธีการ CM และวิธีการ AOD (MCSA) มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 9.76 % และ -2.04 % ตามลำดับ สำหรับที่ความถี่ต่างๆ ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพ พบว่าวิธี AOD (MCSA) มีค่าเท่ากับ 83.04 % วิธีการ CM เท่ากับ 118.05 % และวิธีการ LT เท่ากับ 82.53 % เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ LT พบว่าวิธีการ CM มีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ -35.52 % และวิธี AOD (MCSA) มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ -0.51 % เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความถี่ 60 Hz ที่ Load IV พบว่าวิธีการ CM และวิธี AOD (MCSA) มีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 8.08 % และ -1.72 % ตามลำดับ สำหรับที่ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.14 ซึ่งจะได้ว่าวิธีการ AOD เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการ LT มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 %

ตารางที่ 5.13 แรงบิดที่ได้จากวิธีการ AOD (MCSA) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW

Load		Load I	Load II	Load III	Load IV	Load V
Frequency : 40 Hz						
Torque (N-m)	CM	16.80	18.74	21.32	24.26	27.79
	AOD (MCSA)	7.19	11.25	15.0	18.27	22.02
	LT	7.45	11.18	14.91	18.64	22.36
Relative Error (%)	CM	-125.50	-67.62	-42.99	-30.15	-24.28
	AOD (MCSA)	3.49	-0.63	-0.60	1.98	1.52
Frequency : 50 Hz						
Torque (N-m)	CM	13.26	14.81	16.83	19.05	21.76
	AOD (MCSA)	7.63	11.26	14.50	18.52	22.89
	LT	7.45	11.18	14.91	18.64	22.36
Relative Error (%)	CM	-77.99	-32.47	-12.88	-2.20	2.68
	AOD (MCSA)	-2.42	-0.72	2.75	0.64	-2.37
Frequency : 60 Hz						
Torque (N-m)	CM	9.52	11.47	13.83	16.82	-
	AOD (MCSA)	7.40	11.46	14.91	19.02	-
	LT	7.45	11.18	14.91	18.64	-
Relative Error (%)	CM	-27.79	-2.59	7.24	9.76	-
	AOD (MCSA)	0.67	-2.50	0.00	-2.04	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.14 ประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการ AOD (MCSA) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW

Load		Load I	Load II	Load III	Load IV	Load V
Frequency : 40 Hz						
Efficiency (%)	CM	178.28	135.67	118.05	103.44	95.93
	AOD (MCSA)	76.57	81.42	83.04	77.75	75.87
	LT	79.04	80.90	82.53	79.44	77.15
Absolute Error (%)	CM	-99.24	-54.77	-35.52	-24.00	-18.78
	AOD (MCSA)	2.47	-0.52	-0.51	1.69	1.28
Frequency : 50 Hz						
Efficiency (%)	CM	143.44	110.45	93.81	84.93	78.51
	AOD (MCSA)	79.49	83.47	80.86	82.65	82.49
	LT	80.53	83.35	83.08	83.07	80.63
Absolute Error (%)	CM	-62.91	-27.10	-10.73	-1.86	2.12
	AOD (MCSA)	1.05	-0.12	2.22	0.42	-1.86
Frequency : 60 Hz						
Efficiency (%)	CM	112.54	90.16	80.33	74.81	-
	AOD (MCSA)	86.11	89.66	86.51	84.61	-
	LT	88.04	87.86	86.53	82.89	-
Absolute Error (%)	CM	-24.50	-2.30	6.20	8.08	-
	AOD (MCSA)	1.93	-1.80	0.02	-1.72	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.15 การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 4.0 kW พบว่าวิธี AOD (MCSA) มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 4 % เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ LT ดังเช่น กรณีทำงานที่ความถี่ 40 Hz ที่ Load III วิธี AOD (MCSA) เท่ากับ 18.12 N-m วิธีการ CM เท่ากับ 24.46 N-m และวิธีการ LT เท่ากับ 18.05 N-m พบว่าวิธีการ CM มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ -35.51 และวิธี AOD (MCSA) มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ -0.39 % และเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความถี่ 60 Hz ที่ Load IV พบว่าวิธีการ CM และวิธีการ AOD (MCSA) มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 11.75 % และ 1.37 % ตามลำดับ สำหรับที่ความถี่ต่างๆ ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพ พบว่าวิธี AOD (MCSA) มีค่าเท่ากับ 84.95 % วิธีการ CM เท่ากับ 114.52 % และวิธีการ LT เท่ากับ 84.50 % เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ LT พบว่าวิธีการ CM มีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ -30.02 % และวิธี AOD (MCSA) มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ -0.45 % เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความถี่ 60 Hz ที่ Load IV พบว่าวิธีการ CM และวิธี AOD (MCSA) มีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 10.37 % และ -1.08 % ตามลำดับ สำหรับที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.16 ซึ่งจะได้ว่าวิธีการที่ทำเสนอเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการวัดโดยตรง มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 %

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 4.0 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก สามารถเปรียบเทียบระหว่างวิธี AOD กับวิธี AOD (MCSA) ในกรณีของแรงบิด วิธี AOD มีคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 2 % และเมื่อพิจารณาตลอดย่านการใช้งานที่ความถี่เท่ากับ 40 Hz, 50Hz และ 60 Hz จะมีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.19 % ส่วนวิธี AOD (MCSA) มีคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 4 % และค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.80 % ในกรณีของประสิทธิภาพ วิธี AOD มีคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 2 % และค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.15 % ส่วนวิธี AOD (MCSA) มีคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 % และค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.70 % จะพบว่าวิธี AOD มีความแม่นยำกว่าวิธี AOD (MCSA) ทั้งกรณีแรงบิดและประสิทธิภาพ โดยมีความ

คลาดเคลื่อนเฉลี่ยแตกต่างกับประมาณ 1 % เนื่องจากผลของความเร็วที่ได้จาก MCSA มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1 - 2 rpm เมื่อเปรียบเทียบกับการวัดความเร็วโดยตรง ที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 3.4

ตารางที่ 5.15 แรงบิดที่ได้จากวิธีการ AOD (MCSA) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 4.0 kW

Load		Load I	Load II	Load III	Load IV	Load V
Frequency : 40 Hz						
Torque (N-m)	CM	17.89	20.99	24.46	28.29	32.32
	AOD (MCSA)	9.08	13.72	18.12	21.81	27.20
	LT	9.02	13.53	18.05	22.56	27.07
Relative Error (%)	CM	-98.34	-55.14	-35.51	-25.39	-19.39
	AOD (MCSA)	-0.67	-1.40	-0.39	3.32	-0.48
Frequency : 50 Hz						
Torque (N-m)	CM	14.11	16.55	19.23	22.27	25.67
	AOD (MCSA)	8.92	13.13	17.78	22.44	27.12
	LT	9.02	13.53	18.05	22.56	27.07
Relative Error (%)	CM	-56.43	-22.32	-6.54	1.29	5.17
	AOD (MCSA)	1.11	2.96	1.50	0.53	-0.18
Frequency : 60 Hz						
Torque (N-m)	CM	9.79	12.73	16.01	19.91	-
	AOD (MCSA)	8.71	13.06	17.38	22.87	-
	LT	9.02	13.53	18.05	22.56	-
Relative Error (%)	CM	-8.54	5.91	11.30	11.75	-
	AOD (MCSA)	3.44	3.47	3.71	1.37	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.16 ประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการ AOD (MCSA) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4.0 kW

Load		Load I	Load II	Load III	Load IV	Load V
Frequency : 40 Hz						
Efficiency (%)	CM	162.32	129.16	114.52	105.97	101.01
	AOD (MCSA)	82.35	84.42	84.95	81.71	84.99
	LT	81.83	83.25	84.50	84.49	84.62
Absolute Error (%)	CM	-80.49	-45.91	-30.02	-21.48	-16.39
	AOD (MCSA)	-0.52	-1.17	-0.45	2.79	-0.37
Frequency : 50 Hz						
Efficiency (%)	CM	134.38	106.30	93.59	86.43	82.15
	AOD (MCSA)	85.02	84.39	86.60	87.00	86.84
	LT	85.94	86.90	87.85	87.55	86.63
Absolute Error (%)	CM	-48.44	-19.40	-5.74	1.12	4.48
	AOD (MCSA)	-0.92	2.51	1.26	0.55	-0.20
Frequency : 60 Hz						
Efficiency (%)	CM	100.51	85.75	80.07	77.75	-
	AOD (MCSA)	89.50	88.58	87.24	89.20	-
	LT	92.6	91.12	90.3	88.12	-
Absolute Error (%)	CM	-7.91	5.37	10.23	10.37	-
	AOD (MCSA)	3.10	2.54	3.06	-1.08	-

การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยวิธีการ AOD (MCSA) สามารถนำมาใช้งานได้จริง ทั้งกรณีการควบคุมแบบแรงบิดคงที่ และแบบกำลังทางกลคงที่ ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดโดยตรง มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 % ส่วนวิธีการ CM มีความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ที่มีการปรับเปรียบความถี่ไปจากความถี่หลักมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การประยุกต์ใช้งานกับมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์

วิธีการ AOD สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติกับมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยไม่รบกวนการทำงานของมอเตอร์เพียงอาศัยข้อมูลที่วัดได้จริงขณะใช้งานร่วมกับวิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ ตามที่ได้ทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของวิธีประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีที่นำเสนอกับวิธีการทดสอบแบบมีภาระนั้น ได้ผลลัพธ์ที่นำมาสู่การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ที่มีการขับเคลื่อนโดยใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง

ในส่วนนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ขณะใช้งานที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ มอเตอร์พัดลมระบายอากาศแต่ละตัวมีการใช้งานใน 2 ทิศทางการหมุนที่ภาระทางกลต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของลม (flow rate) มอเตอร์พัดลมระบายอากาศนี้ติดตั้งอยู่ในสถานีรถไฟใต้ดินจำนวน 4 ตัวต่อหนึ่งสถานี (F100, F101, F150, and F151) แสดงดังรูปที่ 5.10 และสำหรับรายละเอียดของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ แสดงดังตารางที่ 5.17 ขับเคลื่อนมอเตอร์โดยอินเวอร์เตอร์หรืออุปกรณ์ควบคุมความเร็ว (variable speed drive; VSD) ของ ABB type ACS 604-0140-3 ขนาด 140 kVA, 380/400/415 V

ตารางที่ 5.17 ป้ายพิกัดมอเตอร์พัดลมระบายอากาศ

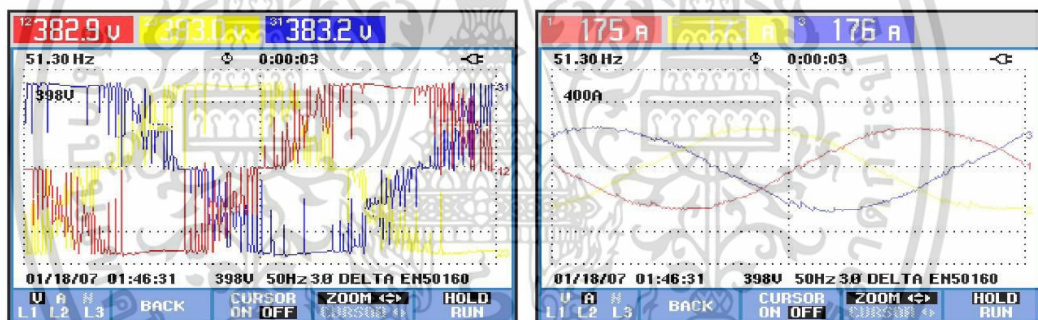
108 kW (145 hp)	
Hz	50
V	380
A	205
rpm	985
Pole	6
pf	0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 มอเตอร์สำหรับระบายอากาศในอุโมงค์ของระบบรถไฟใต้ดิน

การวัดปริมาณทางไฟฟ้าสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ ใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า (three phase power quality analyzer; PQA; Fluke 434; true RMS) แสดงข้อมูลทางไฟฟ้าและสัญญาณทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 การวัดปริมาณทางไฟฟ้าใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ขณะใช้งาน ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ กรณีมอเตอร์ F100 ทำหน้าที่ Supply ประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 93.76 % วิธีการ CM ประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 107.21 % ซึ่งเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นวิธีการใช้ค่ากระแส ไม่สามารถนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ และได้จากวิธีการวัดด้วย VSD มีค่าเท่ากับ 95.14 % เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดด้วย VSD พบว่า วิธี AOD มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 1.38 % และเมื่อทำหน้าที่ Exhaust วิธี AOD ประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 96.96 % วิธีการ CM ประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 111.03 % และได้จากวิธีการวัดด้วย VSD มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเท่ากับ 94.73 % เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดด้วย VSD พบว่า วิธี AOD มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ -2.23 % สำหรับกรณีมอเตอร์ F101, F150 และ F151 วิธี AOD มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 2 % ส่วนวิธีการ CM ไม่สามารถนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์เนื่องจากประสิทธิภาพที่ได้มากกว่า 100 % แสดงข้อมูลดังตารางที่ 5.18

ดังนั้นวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ไม่ว่าจะเป็นแบบ SPWM หรือ DTC สามารถที่จะหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2 % สำหรับวิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้านั้นไม่สามารถหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ได้ใกล้เคียงความเป็นจริงเนื่องจากอินเวอร์เตอร์ปรับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ให้แตกต่างกันไปจากภาวะขับเคลื่อนโดยใช้แหล่งจ่ายตามปกติเพื่อให้ได้ความเร็วและกำลังทางกลตามที่ต้องการ และนอกจากนั้นสำหรับการวัดปริมาณทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า จะวัดอยู่ในรูปแบบของค่าประสิทธิผล ดังสมการที่ (5.4) และ (5.5) ตามลำดับ ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ วัดอยู่ในรูปแบบค่าเฉลี่ย ดังสมการที่ (5.14) โดยที่ไม่ได้ใช้ปริมาณทางไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของความถี่หลักมูล ทำให้ง่ายต่อการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 5.18 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ขณะใช้งาน

Bangkok subway		F100		F101	
Field Measurement		Supply	Exhaust	Supply	Exhaust
Line Voltage (V)		367	340	373	330
Line Current (A)		177	145	172	135
Input Power (kW)		84.00	61.56	84.00	53.45
Frequency(Hz)		51.04	44.37	51.02	44.35
Speed (rpm)		1010	880	1010	880
Efficiency (%)	VSD	95.14	94.73	93.85	96.98
	AOD	93.76	96.96	94.57	97.24
	CM	107.21	111.03	105.88	115.55
Absolute Error (%)	AOD	1.38	-2.23	-0.72	-0.26
	CM	-12.07	-16.3	-12.03	-18.57
Bangkok subway		F150		F151	
Field Measurement		Supply	Exhaust	Supply	Exhaust
Line Voltage (V)		368	337.4	370	339
Line Current (A)		160	144	170	145
Input Power (kW)		75.38	59.59	84.00	61.98
Frequency(Hz)		50.45	44.38	51.27	44.37
Speed (rpm)		1000	880	1015	880
Efficiency (%)	VSD	95.99	96.69	93.85	94.09
	AOD	95.27	97.26	94.18	95.14
	CM	108.29	113.04	103.81	109.95
Absolute Error (%)	AOD	0.72	-0.57	-0.33	-1.05
	CM	-12.3	-16.35	-9.96	-15.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 สรุป

สำหรับวิธีการสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. วิธีการ AOD สามารถประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ในขณะที่ใช้งาน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW และ 4.0 kW ที่ได้จากวิธีการ LT พบว่าที่ภาระทางกลตั้งแต่ประมาณ 30 % - 100 % ของพิกัด มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 2 % และเมื่อพิจารณาแรงบิด ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน คือมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 2 % ดังนั้นวิธีการ AOD สามารถนำมาใช้ในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ในขณะที่ใช้งาน ได้อย่างไม่ยุ่งยากเนื่องจากใช้ข้อมูลอินพุต ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าอินพุตประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้า ความถี่ใช้งาน ความเร็วมอเตอร์ และข้อมูลจากป้ายพิกัดของมอเตอร์ นอกจากนั้นวงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ สามารถใช้งานได้โดยแสดงความสูญเสียจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ ทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นจากวงจรสมมูลแบบดั้งเดิม

2. วงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ สามารถใช้งานได้โดยแสดงความสูญเสียจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ และเนื่องจากอยู่ในรูปแบบของพารามิเตอร์วงจรถ่วงก่อน ทำให้การนำข้อมูลทางไฟฟ้า เพื่อใช้ในการคำนวณหรือประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ ทำได้ง่ายขึ้น เพราะอยู่ในรูปค่าประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องใช้ค่าทางไฟฟ้าในรูปแบบของความถี่หลักมูล ส่งผลต่อขั้นตอนการวัด ไม่ยุ่งยาก นอกจากนั้นไม่ต้องพิจารณาผลของฮาร์โมนิกส์แรงดัน และฮาร์โมนิกส์กระแส และความแม่นยำมากขึ้นจากวงจรสมมูลแบบดั้งเดิม

3. การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยวิธีการ AOD (MCSA) สามารถนำมาใช้งานได้จริง ทั้งกรณีการควบคุมแบบแรงบิดคงที่ และกรณีการควบคุมแบบกำลังทาง

กลคองที่ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับที่ได้จากวิธีการ LT มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ประมาณ 3 %

4. การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ของรถไฟฟ้าใต้ดิน ขนาด 108 kW ขณะใช้งานที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบเทคนิคการควบคุมแบบควบคุมแรงบิด ทำการเปรียบเทียบกำลังทางกลที่ได้จากวิธีการ AOD กับค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ขับเคลื่อน (VSD) และวิธีการ CM ปรากฏว่าวิธีการ AOD มีความใกล้เคียงกับค่าจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนมากกว่า และจากนั้นประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เปรียบเทียบกันระหว่างวิธีการ AOD กับวิธีการ CM ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ได้จาก วิธีการ AOD มีความเป็นได้มากกว่าวิธีการ CM ที่ได้ค่าประสิทธิภาพออกมาสูงผิดปกติ เช่นกัน

5. วิธีการ AOD เหมาะสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีลักษณะภาระทางกลคงที่ และไม่เหมาะสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีลักษณะภาระทางกลเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

และจากวิทยานิพนธ์หัวข้อนี้ผู้เขียนได้มีการนำเสนอ “Nonintrusive Method for Estimating Field Efficiency of Inverter-Fed Induction Motor Using Measured Values”

[69]

บทที่ 6

การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ขณะใช้งานเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน

6.1 บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว [70] (single-phase induction motor) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ขนาดเล็กทั้งในที่อยู่อาศัยและอุตสาหกรรม โดยมีพิกัดตั้งแต่ 37.5 W จนถึง 7500 W ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของมอเตอร์ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส (split-phase), มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท (capacitor start), มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่า (two-value capacitor) เป็นต้น ถึงแม้มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะมีพิกัดที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แต่ก็มีเมื่อนำไปใช้งานกันอย่างหลากหลาย เช่น เครื่องทำความเย็นแบบต่างๆ ปั๊มน้ำ พัดลม เป็นต้น ในเรื่องของการประหยัดพลังงานแนวทางหนึ่งที่ควรพิจารณา คือ การตัดสินใจเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งจำเป็นจะมีการตรวจสอบถึงจุดคุ้มทุนหรือระยะเวลาในการคืนทุนเมื่อต้องมีการเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ จะเห็นได้ว่าการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวในขณะใช้งาน จะเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยตรวจสอบข้อมูลที่สำคัญนี้ได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพซึ่งจะใช้พื้นฐานของวงจรมุมมอโตร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวประมวลผลร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะมอเตอร์ใช้งานอยู่

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและการสร้างวงจร

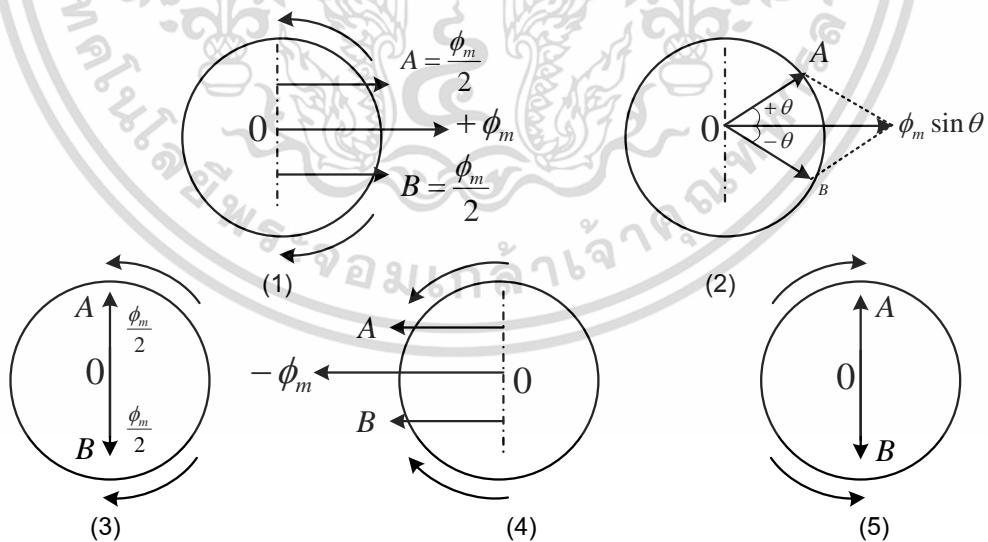
สมมูลที่อ้างอิงตามทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ (double revolving field) [70], [71] โดยจะเน้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสและแบบคาปาซิเตอร์สองค่า โดยนำเสนอแนวคิดในการพัฒนางจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวทั้งสองประเภท เพื่อให้วงจรสมมูลที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถแสดงพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงของมอเตอร์ในขณะทำงาน และนำมาใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งาน

6.2 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่

หลักการการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวสามารถอธิบายการทำงานโดยใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ เมื่อพิจารณาจากสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากกระแสไฟฟ้าในขดลวดทางด้านสเตเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นแบบพัลส์ (pulsating) เกิดจากผลรวมของสนามแม่เหล็ก 2 สนาม ได้แก่ สนามแม่เหล็กที่หมุนไปข้างหน้า (forward) และหมุนย้อนกลับ (backward) โดยมีทิศทางการหมุนตรงกันข้ามกัน ด้วยความเร็วในการหมุนเท่ากับความเร็วซิงโครนัส แสดงดังรูปที่ 6.1 ซึ่งจะพบว่าผลรวมของสนามแม่เหล็กทั้ง 2 สนามจะมีค่าสูงสุดที่มุม 0 และ 180 องศาทางไฟฟ้า และจะมีค่าเท่ากับศูนย์ที่มุม 90 และ 270 องศาทางไฟฟ้า

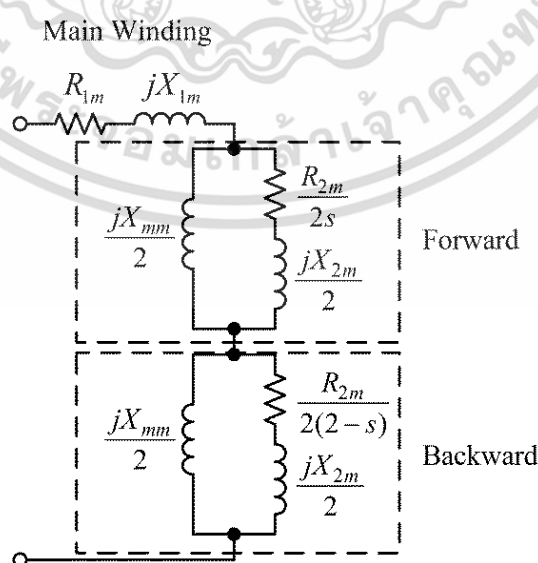


รูปที่ 6.1 การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุนคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กที่หมุนไปข้างหน้าซึ่งหมุนด้วยค่าสลิปเท่ากับ s และสนามแม่เหล็กที่หมุนย้อนกลับซึ่งหมุนด้วยค่าสลิปเท่ากับ $2-s$ จากหลักการดังกล่าวจะสามารถนำเสนอรูปแบบของวงจรสมมูลโดยอยู่บนพื้นฐานของสนามแม่เหล็กหมุนคู่ได้โดยประกอบด้วย ส่วนของอิมพีแดนซ์ทางด้านขดลวดหลัก (main winding) และอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กที่หมุนไปข้างหน้าและที่หมุนย้อนกลับ [72], [73] แสดงได้ดังรูปที่ 6.2

อิมพีแดนซ์ทางด้านขดลวดหลักจะเป็นผลรวมของค่าความต้านทานไฟฟ้าและรีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วของขดลวดหลัก ส่วนอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์จะเป็นวงจرخานระหว่างรีแอกแตนซ์จากการสร้างสนามแม่เหล็กกับความต้านทานไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ที่อนุกรมกับรีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วทางด้านโรเตอร์ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ อิมพีแดนซ์เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กที่หมุนไปข้างหน้าและที่หมุนย้อนกลับ กำหนดให้ R_{1m} เป็นความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดหลัก X_{1m} เป็นรีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วของขดลวดหลัก X_{mm} เป็นรีแอกแตนซ์จากการสร้างสนามแม่เหล็กของขดลวดหลัก R_{2m} เป็นความต้านทานไฟฟ้าของโรเตอร์ที่อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ของขดลวดหลัก และ X_{2m} เป็นรีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วของโรเตอร์อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ของขดลวดหลัก



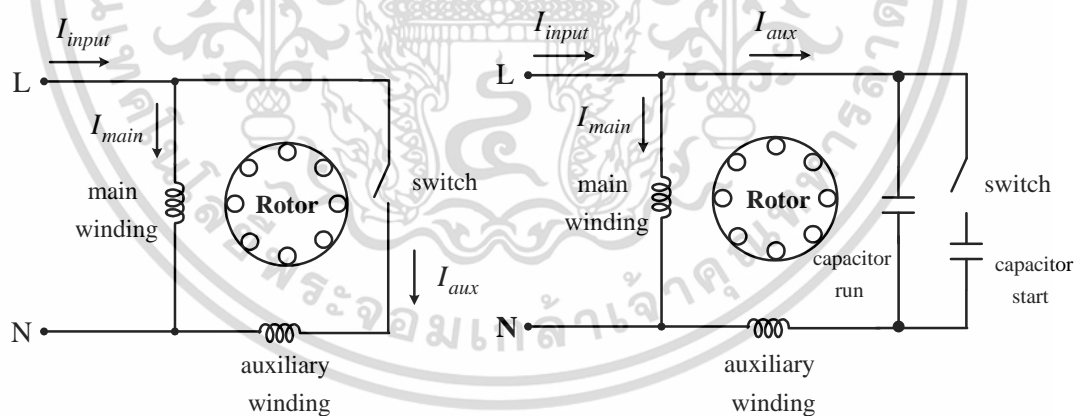
รูปที่ 6.2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวอ้างอิงจากทฤษฎีสถนามแม่เหล็กหมุนคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว [74] – [77] ในรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่า ความสูญเสียของแกนเหล็ก ความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล และความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลม จะไม่มีการพิจารณาอยู่ในวงจรสมมูล แต่จะมองเป็นผลรวมของความสูญเสียที่เรียกว่า ความสูญเสียจากการหมุน (rotational losses : $P_{rotational}$) ซึ่งในทางปฏิบัติจะกำหนดให้มีค่าคงที่ การกำหนดค่าดังกล่าวจะต้องใช้ประสบการณ์หรือค่าที่ได้จากการทดสอบ

6.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่มีเฉพาะขดลวดหลักนั้นโดยหลักการแล้วจะไม่เกิดแรงบิดในการเริ่มต้นหมุน [70] จึงได้มีการเพิ่มขดลวดช่วย (auxiliary winding) ซึ่งติดตั้งห่างจากขดลวดหลัก 90 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวส่วนใหญ่จะมีด้วยกัน 2 ขดลวด ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 2 ประเภท ได้แก่ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสดังรูปที่ 6.3 ก) และมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่าดังรูปที่ 6.3 ข)



ก) แบบแยกเฟส

ข) แบบคาปาซิเตอร์สองค่า

รูปที่ 6.3 วงจรการต่อของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

จากรูปที่ 6.3 ก) เป็นวงจรการต่อของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ในขณะที่ใช้งานจะมีขดลวดหลักเพียงขดลวดเดียวเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่อ้างอิงจากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ ดังนั้นวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส จะมีลักษณะดังรูปที่ 6.2 สำหรับค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจะพิจารณาหาได้จากการทดสอบ [78], [79] ได้แก่ การทดสอบหาความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด การทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล และการทดสอบแบบจับยึดโรเตอร์ สำหรับค่าความสูญเสียจากการหมุนจะพิจารณาโดยการกำหนดให้เป็นค่าคงที่จากประสบการณ์หรือการทดสอบซึ่งค่าความสูญเสียจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในวงจรสมมูลนี้

จากรูปที่ 6.2 การหาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสมีขั้นตอนการพิจารณาเริ่มต้นจากค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนของขดลวดหลัก ($Z_{total,m}$) [80], [81] ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$Z_{1m} = R_{1m} + jX_{1m} \quad (6.1)$$

$$Z_{fm} = R_{fm} + jX_{fm} = \frac{jX_{nm}}{2} // \left(\frac{R_{2m}}{2s} + \frac{jX_{2m}}{2} \right) \quad (6.2)$$

$$Z_{bm} = R_{bm} + jX_{bm} = \frac{jX_{nm}}{2} // \left(\frac{R_{2m}}{2(2-s)} + \frac{jX_{2m}}{2} \right) \quad (6.3)$$

$$Z_{total,m} = Z_{1m} + Z_{fm} + Z_{bm} \quad (6.4)$$

กระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดหลักพิจารณาได้จาก

$$I_{input,m} = \frac{V_{input}}{Z_{total,m}} \quad (6.5)$$

จากสมการที่ (6.5) และวงจรสมมูลรูปที่ 6.2 สามารถคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าของขดลวดหลักจากสมามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{I}_{fm} = \mathbf{I}_{input,m} \frac{\frac{jX_{mm}}{2}}{\left(\frac{R_{2m}}{2s} + \frac{jX_{2m}}{2} + \frac{jX_{mm}}{2} \right)} \quad (6.6)$$

และค่ากระแสไฟฟ้าของขดลวดหลักจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

$$\mathbf{I}_{bm} = \mathbf{I}_{input,m} \frac{\frac{jX_{mm}}{2}}{\left(\frac{R_{2m}}{2(2-s)} + \frac{jX_{2m}}{2} + \frac{jX_{mm}}{2} \right)} \quad (6.7)$$

ดังนั้น ค่ากำลังเอาต์พุทของขดลวดหลักจะคำนวณได้จาก

$$P_{output,m} = (1-s) \left(\frac{I_{fm}^2 R_{2m}}{2s} - \frac{I_{bm}^2 R_{2m}}{2(2-s)} \right) - P_{rotational} \quad (6.8)$$

และแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์

$$T_{output} = \frac{P_{output,m}}{\omega_r} \quad (6.9)$$

ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของขดลวดหลักสามารถพิจารณาได้จาก

$$PF_m = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(Z_{total,m})}{\text{Re}(Z_{total,m})} \right) \right) \quad (6.10)$$

จากสมการที่ (6.5) และ (6.10) ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของขดลวดหลักคำนวณได้จาก

$$P_{input,m} = V_{input} I_{input,m} (PF_m) \quad (6.11)$$

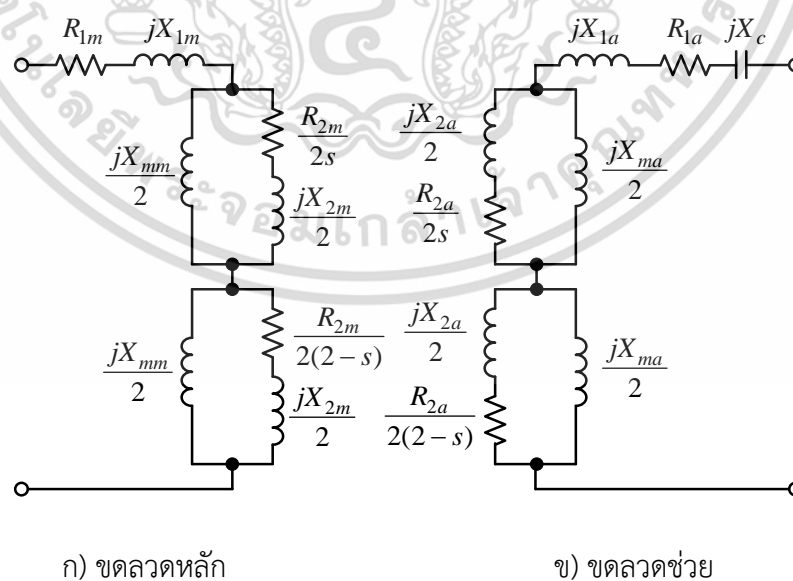
ดังนั้น ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสจะกำหนดได้จาก

$$\eta = \frac{P_{output,m}}{P_{input,m}} \quad (6.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า

จากรูปที่ 6.3 ข) เป็นวงจรการต่อของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า ในขณะที่ใช้งานจะประกอบด้วยขดลวดหลักและขดลวดช่วย โดยจะมีการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดทั้งสองซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราส่วนจำนวนรอบประสิทธิผล (effective turns ratio; a) เมื่ออ้างอิงกับขดลวดหลัก ดังนั้นจากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ จะได้วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่าแสดงดังรูปที่ 6.4 ซึ่งประกอบด้วยวงจรสมมูลของขดลวดหลักดังรูปที่ 6.4 ก) และวงจรสมมูลของขดลวดช่วยดังรูปที่ 6.4 ข) สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลจะพิจารณาได้จากการทดสอบ [78], [79] เช่นเดียวกันกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส แต่มีการทดสอบหาค่าอัตราส่วนจำนวนรอบประสิทธิผลเพิ่ม จากวงจรสมมูลรูปที่ 6.4 กำหนดให้ R_{1a} เป็นความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดช่วย X_{1a} เป็นรีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วของขดลวดช่วย X_{ma} เป็นรีแอกแตนซ์จากการสร้างสนามแม่เหล็กของขดลวดช่วย R_{2a} เป็นความต้านทานไฟฟ้าของโรเตอร์ที่อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ของขดลวดช่วย และ X_{2a} เป็นรีแอกแตนซ์จากฟลักซ์รั่วของโรเตอร์ที่อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ของขดลวดช่วย



รูปที่ 6.4 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.4 ก) ขดลวดหลักจะมีขั้นตอนการคำนวณ [80], [81] เช่นเดียวกันกับการคำนวณของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส เริ่มจากการคำนวณอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักตามสมการที่ (6.1) - (6.4) การคำนวณหากระแสไฟฟ้าอินพุตตามสมการที่ (6.5) และกำลังไฟฟ้าอินพุตตามสมการที่ (6.11) สำหรับกำลังเอาต์พุตของขดลวดหลักจะสามารถหาได้จาก

$$P_{output,m} = (1-s) \left(\frac{I_{fm}^2 R_{2m}}{2s} - \frac{I_{bm}^2 R_{2m}}{2(2-s)} \right) \quad (6.13)$$

ในกรณีขดลวดช่วย ค่าอิมพีแดนซ์ขดลวดช่วย ($Z_{total,a}$) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Z_{1a} = R_{1a} + jX_{1a} - jX_c \quad (6.14)$$

$$Z_{fa} = R_{fa} + jX_{fa} = \frac{jX_{ma}}{2} // \left(\frac{R_{2a}}{2s} + \frac{jX_{2a}}{2} \right) \quad (6.15)$$

$$Z_{ba} = R_{ba} + jX_{ba} = \frac{jX_{ma}}{2} // \left(\frac{R_{2a}}{2(2-s)} + \frac{jX_{2a}}{2} \right) \quad (6.16)$$

$$Z_{total,a} = Z_{1a} + Z_{fa} + Z_{ba} \quad (6.17)$$

ค่ากระแสไฟฟ้าอินพุตของขดลวดช่วย

$$I_{input,a} = \frac{V_{input}}{Z_{total,a}} \quad (6.18)$$

ค่ากระแสไฟฟ้าของขดลวดช่วยจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

$$I_{fa} = I_{input,a} \frac{\frac{jX_{ma}}{2}}{\left(\frac{R_{2a}}{2s} + \frac{jX_{2a}}{2} + \frac{jX_{ma}}{2} \right)} \quad (6.19)$$

และค่ากระแสไฟฟ้าของขดลวดช่วยจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{I}_{ba} = \mathbf{I}_{input,a} \frac{\frac{jX_{ma}}{2}}{\left(\frac{R_{2a}}{2(2-s)} + \frac{jX_{2a}}{2} + \frac{jX_{ma}}{2} \right)} \quad (6.20)$$

ค่ากำลังเอาต์พุตของขดลวดช่วยสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{output,a} = (1-s) \left(\frac{I_{fa}^2 R_{2a}}{2s} - \frac{I_{ba}^2 R_{2a}}{2(2-s)} \right) \quad (6.21)$$

ดังนั้นค่ากำลังเอาต์พุตของมอเตอร์สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์

$$P_{output} = (P_{output,m} + P_{output,a}) - P_{rotational} \quad (6.22)$$

และแรงบิดที่เพลาของมอเตอร์คำนวณได้จาก

$$T_{output} = \frac{P_{output}}{\omega_r} \quad (6.23)$$

ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของขดลวดช่วย

$$PF_a = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(Z_{total,a})}{\text{Re}(Z_{total,a})} \right) \right) \quad (6.24)$$

และค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตของขดลวดช่วยสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{input,a} = V_{input} I_{input,a} (PF_a) \quad (6.25)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต (P_{input}) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่าจะมีค่าเท่ากับผลรวมของ

ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตของขดลวดหลักและขดลวดช่วย ดังนี้

$$P_{input} = P_{input,m} + P_{input,a} \quad (6.26)$$

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่าพิจารณาได้จาก

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \quad (6.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 วงจรสมมูลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

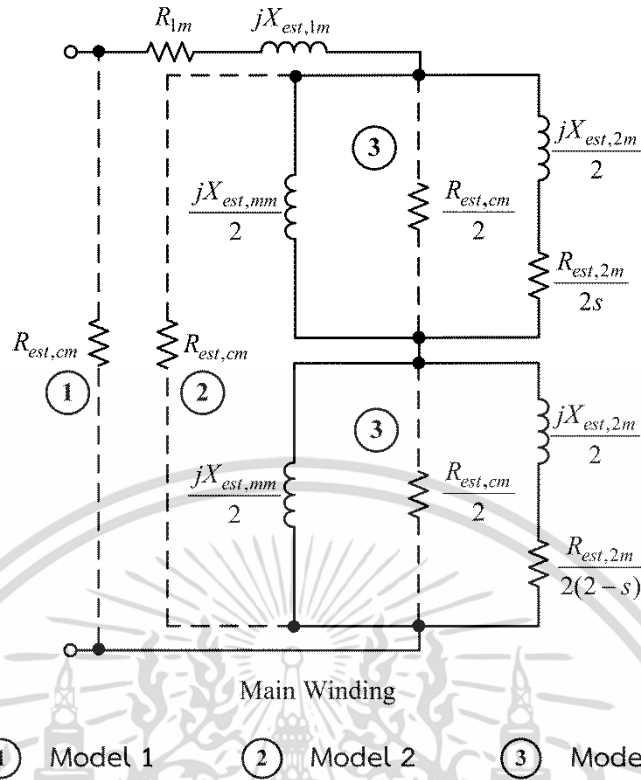
จากหัวข้อที่ 6.3 จะเห็นได้ว่าวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวทั้งแบบแยกเฟส และแบบคาปาซิเตอร์สองค่าที่อ้างอิงจากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ไม่มีการพิจารณาถึงผลของความสูญเสียแกนเหล็ก ความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล และความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน และแรงต้านลม ซึ่งจะมีผลต่อการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพที่แท้จริงของมอเตอร์ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้อวงจรสมมูลมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ในบทนี้จะนำเสนอวงจรสมมูลที่พัฒนา (improved equivalent circuit) [71], [72] โดยการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ผลรวมของความสูญเสียเหล่านี้โดยประมาณ ซึ่งแทนด้วยตัวแปร $R_{est,cm}$ และ $R_{est,ca}$ ในขดลวดหลักและขดลวดช่วย ตามลำดับ วงจรสมมูลที่พัฒนานี้จะมีการนำเสนออยู่ 3 รูปแบบ เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบแนวคิดในการสร้างวงจรสมมูลที่สามารถตอบสนองพฤติกรรมให้ได้ใกล้เคียงกับมอเตอร์ขณะทำงานจริง และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งาน

6.4.1 วงจรสมมูลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

วงจรสมมูลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสโดยการเพิ่มพารามิเตอร์ $R_{est,cm}$ เข้าไปในวงจรสมมูลรูปที่ 6.2 ซึ่งมีการนำเสนอ 3 รูปแบบแสดงดังรูปที่ 6.5 ได้แก่

- 1) วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 1 (Model 1) เป็นการต่อ $R_{est,cm}$ ขนานกับอิมพีแดนซ์ขดลวดหลัก
- 2) วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 2 (Model 2) เป็นการต่อ $R_{est,cm}$ ขนานกับผลรวมของอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้ากับหมุนย้อนกลับ
- 3) วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 3 (Model 3) เป็นการต่อ $\frac{R_{est,cm}}{2}$ ขนานกับอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า และต่อ $\frac{R_{est,cm}}{2}$ ขนานกับอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักของสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 วงจรสมมูลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

จากรูปที่ 6.5 การคำนวณหาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสโดยใช้วงจรสมมูลที่พัฒนาทั้ง 3 รูปแบบ มีรายละเอียดดังนี้

6.4.1.1 วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 1

ค่าอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักของวงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 1 ($Z_{total,m1}$) สามารถคำนวณ

ได้จาก

$$Z_{1m} = R_{1m} + jX_{est,1m} \tag{6.28}$$

$$Z_{fm} = R_{fm} + jX_{fm} = \frac{jX_{est,mm}}{2} // \left(\frac{R_{est,2m}}{2s} + \frac{jX_{est,2m}}{2} \right) \tag{6.29}$$

$$Z_{bm} = R_{bm} + jX_{bm} = \frac{jX_{est,mm}}{2} // \left(\frac{R_{est,2m}}{2(2-s)} + \frac{jX_{est,2m}}{2} \right) \tag{6.30}$$

$$Z_{fbm} = Z_{fm} + Z_{bm} \tag{6.31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{Z}_{1fbm} = \mathbf{Z}_{1m} + \mathbf{Z}_{fbm} \quad (6.32)$$

$$\mathbf{Z}_{total,m1} = \frac{\mathbf{Z}_{1fbm} R_{est,cm}}{\mathbf{Z}_{1fbm} + R_{est,cm}} \quad (6.33)$$

กระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดหลัก

$$\mathbf{I}_{input,m1} = \frac{\mathbf{V}_{input}}{\mathbf{Z}_{total,m1}} \quad (6.34)$$

กระแสไฟฟ้าของขดลวดหลักจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

$$\mathbf{I}_{fm} = \mathbf{I}_{input,m1} \left(\frac{R_{est,2m}}{\mathbf{Z}_{1fbm} + R_{est,2m}} \right) \left(\frac{\frac{jX_{est,mm}}{2}}{\left(\left(\frac{R_{est,2m}}{2s} + \frac{jX_{est,2m}}{2} \right) + \frac{jX_{est,mm}}{2} \right)} \right) \quad (6.35)$$

กระแสไฟฟ้าของขดลวดหลักจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

$$\mathbf{I}_{bm} = \mathbf{I}_{input,m1} \left(\frac{R_{est,2m}}{\mathbf{Z}_{1fbm} + R_{est,2m}} \right) \left(\frac{\frac{jX_{est,mm}}{2}}{\left(\left(\frac{R_{est,2m}}{2(2-s)} + \frac{jX_{est,2m}}{2} \right) + \frac{jX_{est,mm}}{2} \right)} \right) \quad (6.36)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดหลัก

$$\mathbf{I}_{input} = \mathbf{I}_{input,m1} \quad (6.37)$$

6.4.1.2 วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 2

จากสมการที่ (6.28) – (6.32) ค่าอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักของวงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบ

ที่ 2 ($\mathbf{Z}_{total,m2}$) คำนวณได้จาก

$$\mathbf{Z}_{total,m2} = \mathbf{Z}_{1m} + \frac{\mathbf{Z}_{fbm} R_{est,c}}{\mathbf{Z}_{fbm} + R_{est,c}} \quad (6.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดหลัก

$$\mathbf{I}_{input,m2} = \frac{\mathbf{V}_{input}}{\mathbf{Z}_{total,m2}} \quad (6.39)$$

กระแสไฟฟ้าของขดลวดหลักจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

$$\mathbf{I}_{fm} = \mathbf{I}_{input,m2} \left(\frac{R_{est,2m}}{\mathbf{Z}_{fbm} + R_{est,2m}} \right) \left(\frac{\frac{jX_{est,mm}}{2}}{\left(\left(\frac{R_{est,2m}}{2s} + \frac{jX_{est,2m}}{2} \right) + \frac{jX_{est,mm}}{2} \right)} \right) \quad (6.40)$$

กระแสไฟฟ้าของขดลวดหลักจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

$$\mathbf{I}_{bm} = \mathbf{I}_{input,m2} \left(\frac{R_{est,2m}}{\mathbf{Z}_{fbm} + R_{est,2m}} \right) \left(\frac{\frac{jX_{est,mm}}{2}}{\left(\left(\frac{R_{est,2m}}{2(2-s)} + \frac{jX_{est,2m}}{2} \right) + \frac{jX_{est,mm}}{2} \right)} \right) \quad (6.41)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดหลัก

$$\mathbf{I}_{input} = \mathbf{I}_{input,m2} \quad (6.42)$$

6.4.1.3 วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 3

ค่าอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักของวงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 3 ($\mathbf{Z}_{total,m3}$) คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{fm,3} &= R_{fm,3} + jX_{fm,3} \\ &= \frac{jX_{est,mm}}{2} // \frac{R_{est,cm}}{2} // \left(\frac{R_{est,2m}}{2s} + \frac{jX_{est,2m}}{2} \right) \end{aligned} \quad (6.43)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{bm,3} &= R_{bm,3} + jX_{bm,3} \\ &= \frac{jX_{est,mm}}{2} // \frac{R_{est,cm}}{2} // \left(\frac{R_{est,2m}}{2(2-s)} + \frac{jX_{est,2m}}{2} \right) \end{aligned} \quad (6.44)$$

$$\mathbf{Z}_{fbm,3} = \mathbf{Z}_{fm,3} + \mathbf{Z}_{bm,3} \quad (6.45)$$

$$\mathbf{Z}_{total,m3} = \mathbf{Z}_{1m} + \mathbf{Z}_{fbm,3} \quad (6.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดหลัก

$$\mathbf{I}_{input,m3} = \frac{\mathbf{V}_{input}}{\mathbf{Z}_{total,m3}} \quad (6.47)$$

กระแสไฟฟ้าของขดลวดหลักจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

$$\mathbf{I}_{fm} = \mathbf{I}_{input,m3} \frac{\left(\frac{R_{est,cm} jX_{est,mm}}{4} \right)}{\left[\left(\frac{R_{est,2m}}{2s} + \frac{jX_{est,2m}}{2} \right) \left(\frac{R_{est,cm}}{2} + \frac{jX_{est,mm}}{2} \right) + \left(\frac{R_{est,cm} jX_{est,mm}}{4} \right) \right]} \quad (6.48)$$

กระแสไฟฟ้าของขดลวดหลักจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

$$\mathbf{I}_{bm} = \mathbf{I}_{input,m3} \frac{\left(\frac{R_{est,cm} jX_{est,mm}}{4} \right)}{\left[\left(\frac{R_{est,2m}}{2(2-s)} + \frac{jX_{est,2m}}{2} \right) \left(\frac{R_{est,cm}}{2} + \frac{jX_{est,mm}}{2} \right) + \left(\frac{R_{est,cm} jX_{est,mm}}{4} \right) \right]} \quad (6.49)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดหลัก

$$\mathbf{I}_{input} = \mathbf{I}_{input,m3} \quad (6.50)$$

จากวงจรสมมูลรูปที่ 6.5 ค่ากำลังเอาต์พุทของทั้ง 3 ต้นแบบ สามารถพิจารณาได้จาก

$$P_{output} = (1-s) \left(\frac{I_{fm}^2 R_{est,2m}}{2s} - \frac{I_{bm}^2 R_{est,2m}}{2(2-s)} \right) \quad (6.51)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของทั้ง 3 ต้นแบบ สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{input} = \text{Re}(\mathbf{V}_{input} \mathbf{I}_{input}^*) \quad (6.52)$$

และค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสทั้ง 3 ต้นแบบสามารถคำนวณได้

โดยใช้สมการ (6.27)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4.2 วงจรสมมูลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า

วงจรสมมูลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่าโดยการต่อพารามิเตอร์

$R_{est,cm}$ (ที่วงจรขดลวดหลัก) และ $R_{est,ca}$ (ที่วงจรขดลวดช่วย) เพิ่มเข้าไปในวงจรสมมูลรูปที่ 6.4 ซึ่งมีการนำเสนอ 3 รูปแบบแสดงดังรูปที่ 6.6 ได้แก่

1) วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 1 (Model 1) เป็นการต่อ $R_{est,cm}$ ขนานกับอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักและต่อ $R_{est,ca}$ ขนานกับอิมพีแดนซ์ขดลวดช่วย

2) วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 2 (Model 2) เป็นการต่อ $R_{est,cm}$ ขนานกับผลรวมของอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้ากับหมุ่ยย้อนกลับ และต่อ $R_{est,ca}$ ขนานกับผลรวมของอิมพีแดนซ์ขดลวดช่วยของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้ากับหมุ่ยย้อนกลับ

3) วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 3 (Model 3) เป็นการต่อ $\frac{R_{est,cm}}{2}$ ขนานกับอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและต่อ $\frac{R_{est,cm}}{2}$ ขนานกับอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักของสนามแม่เหล็กหมุ่ยย้อนกลับ ในส่วนขดลวดช่วยเป็นการต่อ $\frac{R_{est,ca}}{2}$ ขนานกับอิมพีแดนซ์ขดลวดช่วยของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและต่อ $\frac{R_{est,ca}}{2}$ ขนานกับอิมพีแดนซ์ขดลวดช่วยของสนามแม่เหล็กหมุ่ยย้อนกลับ

จากรูปที่ 6.6 การคำนวณหาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่าโดยใช้วงจรสมมูลที่พัฒนาทั้ง 3 รูปแบบ มีรายละเอียดดังนี้

6.4.2.1 วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 1

การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์และกระแสไฟฟ้าของขดลวดหลัก จะมีขั้นตอนการคำนวณเช่นเดียวกันกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสตามสมการที่ (6.28) - (6.33)

ค่าอิมพีแดนซ์ขดลวดช่วยของวงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 1 ($Z_{total,al}$) คำนวณได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{Z}_{1a} = R_{1a} + jX_{est,1a} - jX_c \tag{6.53}$$

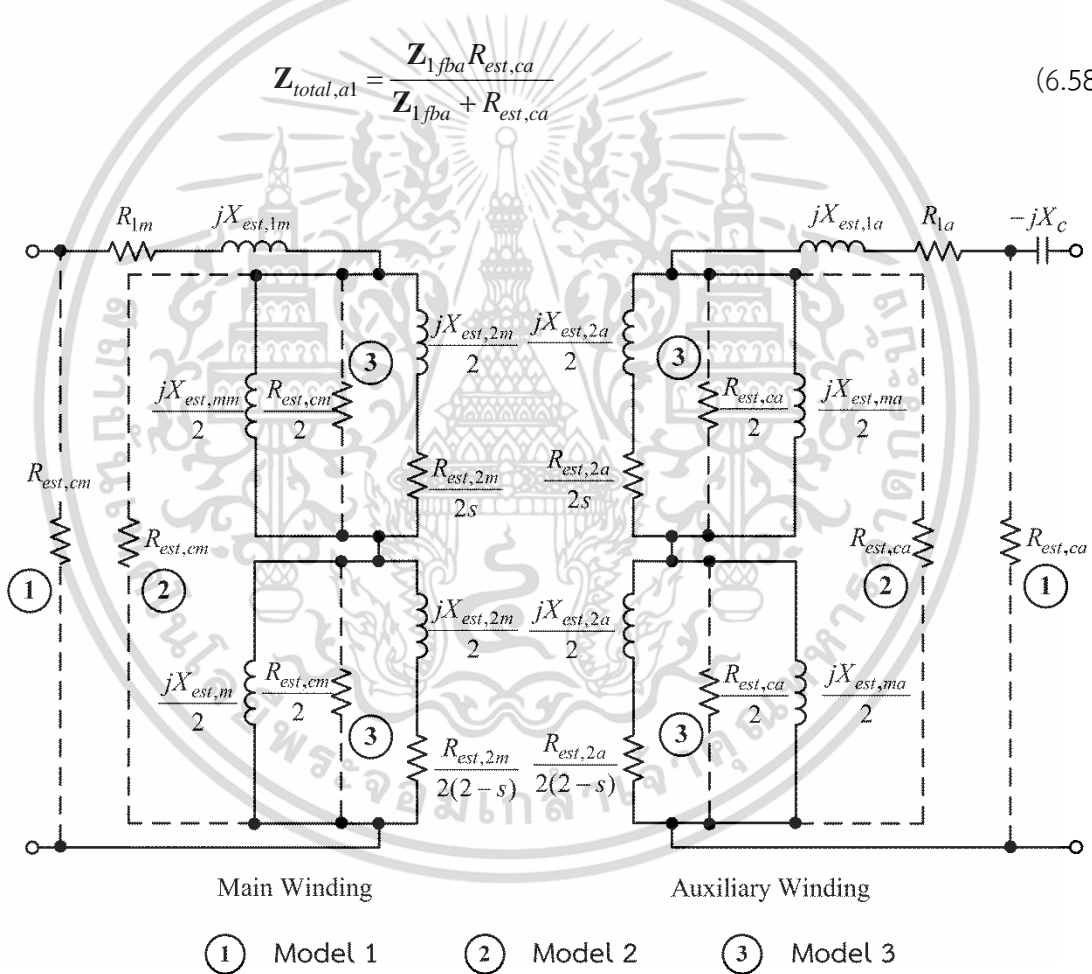
$$\mathbf{Z}_{fa} = R_{fa} + jX_{fa} = \frac{jX_{est,ma}}{2} // \left(\frac{R_{est,2a}}{2s} + \frac{jX_{est,2a}}{2} \right) \tag{6.54}$$

$$\mathbf{Z}_{ba} = R_{ba} + jX_{ba} = \frac{jX_{est,ma}}{2} // \left(\frac{R_{est,2a}}{2(2-s)} + \frac{jX_{est,2a}}{2} \right) \tag{6.55}$$

$$\mathbf{Z}_{fba} = \mathbf{Z}_{fa} + \mathbf{Z}_{ba} \tag{6.56}$$

$$\mathbf{Z}_{1fba} = \mathbf{Z}_{1a} + \mathbf{Z}_{fba} \tag{6.57}$$

$$\mathbf{Z}_{total,a1} = \frac{\mathbf{Z}_{1fba} R_{est,ca}}{\mathbf{Z}_{1fba} + R_{est,ca}} \tag{6.58}$$



รูปที่ 6.6 วงจรสมมูลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า

กระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดช่วย

$$\mathbf{I}_{input,a1} = \frac{\mathbf{V}_{input}}{\mathbf{Z}_{total,a1}} \tag{6.59}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าของขดลวดช่วยจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

$$\mathbf{I}_{fa} = \mathbf{I}_{input,a1} \left(\frac{R_{est,2a}}{\mathbf{Z}_{1fba} + R_{est,2a}} \right) \left(\frac{\frac{jX_{est,ma}}{2}}{\left(\left(\frac{R_{est,2a}}{2s} + \frac{jX_{est,2a}}{2} \right) + \frac{jX_{est,ma}}{2} \right)} \right) \quad (6.60)$$

กระแสไฟฟ้าของขดลวดช่วยจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

$$\mathbf{I}_{fa} = \mathbf{I}_{input,a1} \left(\frac{R_{est,2a}}{\mathbf{Z}_{1fba} + R_{est,2a}} \right) \left(\frac{\frac{jX_{est,ma}}{2}}{\left(\left(\frac{R_{est,2a}}{2(2-s)} + \frac{jX_{est,2a}}{2} \right) + \frac{jX_{est,ma}}{2} \right)} \right) \quad (6.61)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าอินพุท จะมีค่าเท่ากับ

$$\mathbf{I}_{input} = \mathbf{I}_{input,m1} + \mathbf{I}_{input,a1} \quad (6.62)$$

6.4.2.2 วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 2

จากสมการที่ (6.28) – (6.32) สามารถคำนวณหาอิมพีแดนซ์ขดลวดหลักได้ กระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดหลักสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (6.38) - (6.39) และจากสมการที่ (6.53) – (6.57) ค่าอิมพีแดนซ์ขดลวดช่วยพิจารณาได้โดย

$$\mathbf{Z}_{total,a2} = \mathbf{Z}_{1a} + \frac{\mathbf{Z}_{fba} R_{est,ca}}{\mathbf{Z}_{fba} + R_{est,ca}} \quad (6.63)$$

กระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดช่วย

$$\mathbf{I}_{input,a2} = \frac{\mathbf{V}_{input}}{\mathbf{Z}_{total,a2}} \quad (6.64)$$

กระแสไฟฟ้าของขดลวดช่วยจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

$$\mathbf{I}_{fa} = \mathbf{I}_{input,a2} \left(\frac{R_{est,2a}}{\mathbf{Z}_{fba} + R_{est,2a}} \right) \left(\frac{\frac{jX_{est,ma}}{2}}{\left(\left(\frac{R_{est,2a}}{2s} + \frac{jX_{est,2a}}{2} \right) + \frac{jX_{est,ma}}{2} \right)} \right) \quad (6.65)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าทางด้านขดลวดช่วยแบบสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

$$\mathbf{I}_{ba} = \mathbf{I}_{input,a2} \left(\frac{R_{est,2a}}{\mathbf{Z}_{fba} + R_{est,2a}} \right) \left(\frac{\frac{jX_{est,ma}}{2}}{\left(\left(\frac{R_{est,2a}}{2(2-s)} + \frac{jX_{est,2a}}{2} \right) + \frac{jX_{est,ma}}{2} \right)} \right) \quad (6.66)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าอินพุทจะมีค่าเท่ากับ

$$\mathbf{I}_{input} = \mathbf{I}_{input,m2} + \mathbf{I}_{input,a2} \quad (6.67)$$

6.3.2.3 วงจรสมมูลที่พัฒนาต้นแบบที่ 3

อิมพีแดนซ์ขดลวดหลักและกระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดหลักสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (6.28) และสมการที่ (6.43) - (6.47) ตามลำดับ ค่าอิมพีแดนซ์ขดลวดช่วยพิจารณาจาก

$$\mathbf{Z}_{fa3} = R_{fa} + jX_{fa} = \frac{jX_{est,ma}}{2} // \frac{R_{est,ca}}{2} // \left(\frac{R_{est,2a}}{2s} + \frac{jX_{est,2a}}{2} \right) \quad (6.68)$$

$$\mathbf{Z}_{ba3} = R_{ba} + jX_{ba} = \frac{jX_{est,ma}}{2} // \frac{R_{est,ca}}{2} // \left(\frac{R_{est,2a}}{2(2-s)} + \frac{jX_{est,2a}}{2} \right) \quad (6.69)$$

$$\mathbf{Z}_{fba3} = \mathbf{Z}_{fa3} + \mathbf{Z}_{ba3} \quad (6.70)$$

$$\mathbf{Z}_{total,a3} = \mathbf{Z}_{1a} + \mathbf{Z}_{fba3} \quad (6.71)$$

กระแสไฟฟ้าอินพุทของขดลวดช่วย

$$\mathbf{I}_{input,a3} = \frac{\mathbf{V}_{input}}{\mathbf{Z}_{total,a3}} \quad (6.72)$$

กระแสไฟฟ้าของขดลวดช่วยจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

$$\mathbf{I}_{fa} = \mathbf{I}_{input,a3} \left[\frac{\left(\frac{R_{est,ca} jX_{est,ma}}{4} \right)}{\left[\left(\frac{R_{est,2a}}{2s} + \frac{jX_{est,2a}}{2} \right) \left(\frac{R_{est,ca}}{2} + \frac{jX_{est,ma}}{2} \right) + \left(\frac{R_{est,ca} jX_{est,ma}}{4} \right) \right]} \right] \quad (6.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าของขดลวดช่วยจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

$$\mathbf{I}_{ba} = \mathbf{I}_{input,a3} \frac{\left(\frac{R_{est,ca} jX_{est,ma}}{4} \right)}{\left[\left(\frac{R_{est,2a}}{2(2-s)} + \frac{jX_{est,2a}}{2} \right) \left(\frac{R_{est,ca}}{2} + \frac{jX_{est,ma}}{2} \right) + \left(\frac{R_{est,ca} jX_{est,ma}}{4} \right) \right]} \quad (6.74)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าอินพุท จะมีค่าเท่ากับ

$$\mathbf{I}_{input} = \mathbf{I}_{input,m3} + \mathbf{I}_{input,a3} \quad (6.75)$$

จากวงจรสมมูลรูปที่ 6.6 กำลังเอาต์พุทของขดลวดหลักทั้ง 3 ต้นแบบพิจารณาได้จาก

$$P_{output,m} = (1-s) \left(\frac{I_{jm}^2 R_{est,2m}}{2s} - \frac{I_{bm}^2 R_{est,2m}}{2(2-s)} \right) \quad (6.76)$$

กำลังเอาต์พุทของขดลวดช่วยทั้ง 3 ต้นแบบสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{output,a} = (1-s) \left(\frac{I_{fa}^2 R_{est,2a}}{2s} - \frac{I_{ba}^2 R_{est,2a}}{2(2-s)} \right) \quad (6.77)$$

กำลังเอาต์พุททั้ง 3 ต้นแบบสามารถพิจารณาได้จาก

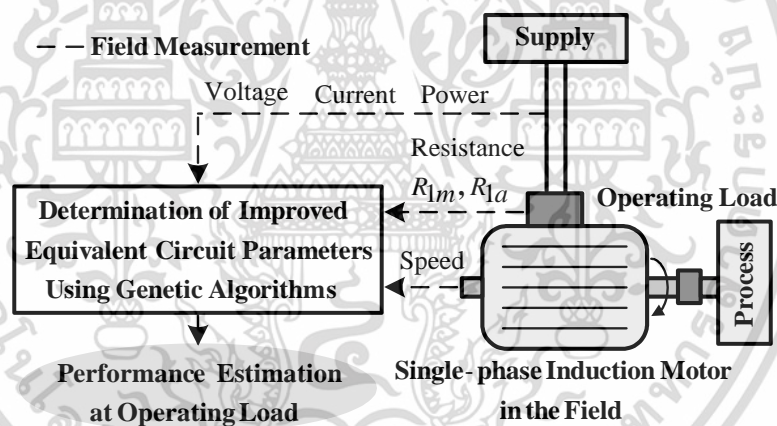
$$P_{output} = (P_{output,m} + P_{output,a}) \quad (6.78)$$

สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่าทั้ง 3 ต้นแบบ สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (6.52) และ (6.27) ตามลำดับ

6.5 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

หลักการของวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งานที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 และ บทที่ 5 นั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวได้ เริ่มต้นจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงในขณะที่ใช้งาน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความเร็วของมอเตอร์ รวมทั้งการทดสอบวัดความต้านทานของขดลวด จากนั้นทำการประมวลผลด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม โดยไม่ต้องทำการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลและแบบจับยึดโรเตอร์ เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลโดยประมาณแล้วก็จะสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวได้ จากรูปที่ 6.7 แสดงวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งาน โดยใช้แนวทางการประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงในขณะใช้งานสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลโดยประมาณ การกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับวิธีเชิงพันธุกรรม และขอบเขตของตัวแปรออกแบบแสดงได้ดังตารางที่ 6.1 และ 6.2 ตามลำดับ



รูปที่ 6.7 วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งาน

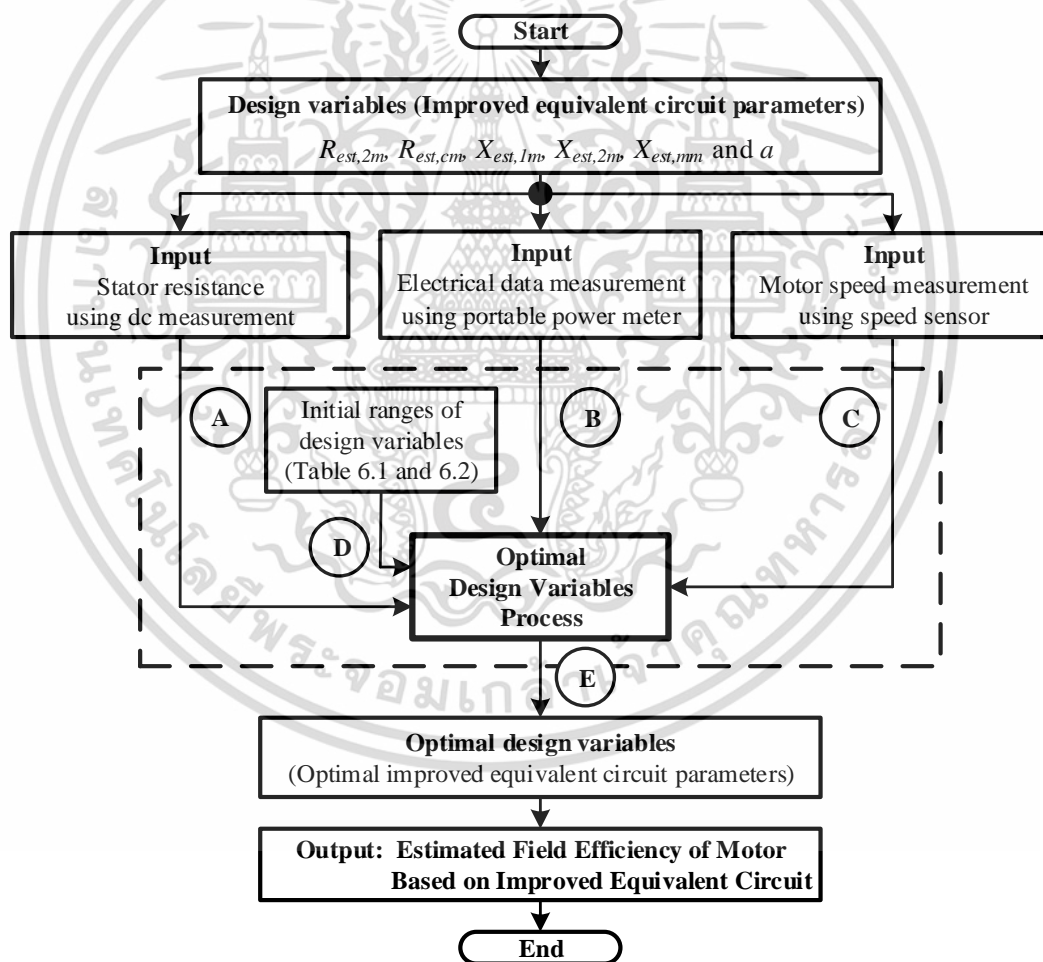
ตารางที่ 6.1 ข้อมูลของพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับวิธีเชิงพันธุกรรม

Number of Population	20,000
Number of Generation	100
Selection Function	Normalized Geometric Select
Crossover Function	Arithmetic Crossover
Mutation Function	Non-uniform mutation
Number of Design Variables	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาทั้งหมด ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลของขอบเขตตัวแปรออกแบบ

Design Variables	Initial Ranges
$X_{est,1}$ (Ω)	0.01 - 20
$X_{est,m}$ (Ω)	1 - 2000
$R_{est,c}$ (Ω)	1 - 2000
$X_{est,2}$ (Ω)	0.01 - 20
$R_{est,2}$ (Ω)	0.001 - 10
a	1.5 - 3



รูปที่ 6.8 ขั้นตอนของการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.8 วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งานมีขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1) จากรูปที่ 6.8 พารามิเตอร์ประมาณที่ไม่ทราบ ได้แก่ $R_{est,2m}$, $R_{est,cm}$, $X_{est,1m}$, $X_{est,2m}$, $X_{est,mm}$ และ a เป็นตัวแปรออกแบบของวิธีเชิงพันธุกรรม สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการวัดความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด (A) โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสจะวัดเฉพาะความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดหลัก สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่าจะวัดความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดหลักและขดลวดช่วย และข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะใช้งาน (B และ C) ได้แก่ ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าอินพุท, กำลังไฟฟ้าอินพุท และความเร็วของมอเตอร์ เป็นข้อมูลสำหรับขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.9
- ขั้นตอนที่ 2) จากรูปที่ 6.9 กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับวิธีเชิงพันธุกรรม ดังตารางที่ 6.1 และกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบดังตารางที่ 6.2 (D) จากนั้นวิธีเชิงพันธุกรรมจะทำการสุ่มเพื่อหาค่าเริ่มต้นของตัวแปรออกแบบ
- ขั้นตอนที่ 3) นำตัวแปรออกแบบของวิธีเชิงพันธุกรรมมาคำนวณหากระแสไฟฟ้าอินพุทและกำลังไฟฟ้าอินพุท จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าอินพุทและค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการวัดจริงในขณะใช้งาน (B และ C) โดยใช้ฟังก์ชันเป้าหมาย

$$F_{obj} = \frac{1}{2} \left| \frac{I_{input,cal}}{I_{input,mea}} - 1 \right|^2 + \frac{1}{2} \left| \frac{P_{input,cal}}{P_{input,mea}} - 1 \right|^2 \quad (6.79)$$

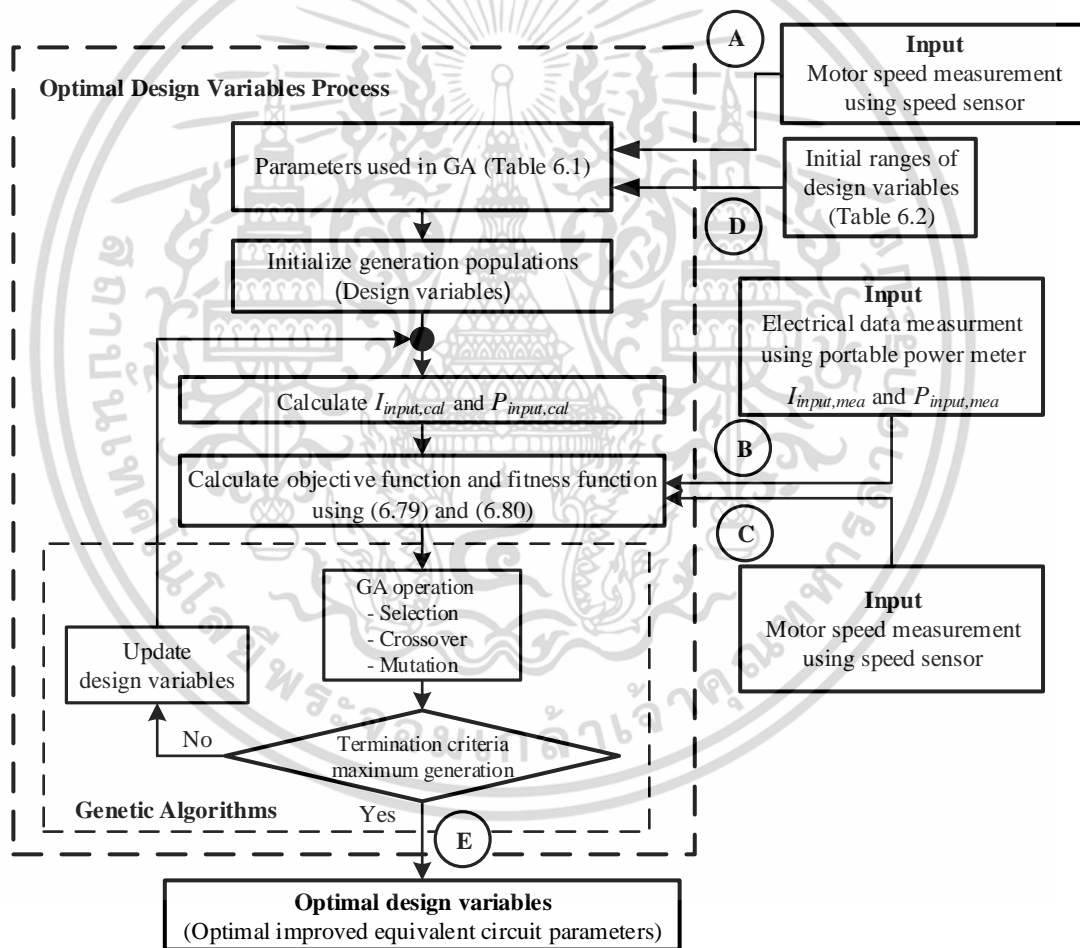
เมื่อ $I_{input,cal}$ และ $P_{input,cal}$ หมายถึง กระแสไฟฟ้าอินพุทและกำลังไฟฟ้าอินพุทที่ได้จากการคำนวณ ตามลำดับ $I_{input,mea}$ และ $P_{input,mea}$ หมายถึง กระแสไฟฟ้าอินพุทและกำลังไฟฟ้าอินพุทที่ได้จากการวัดในขณะที่ยังมอเตอร์ทำงาน ตามลำดับ ค่าที่เหมาะสมของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรออกแบบ (E) สามารถประเมินได้โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อให้ค่าของฟังก์ชันความเหมาะสมมีค่าสูงสุด

$$Fitness = \frac{1}{1 + F_{obj}} \tag{6.80}$$

ขั้นตอนที่ 4) จากรูปที่ 6.8 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวในขณะที่ใช้งานสามารถคำนวณได้โดยใช้ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ (ตัวแปรออกแบบ) ของวงจรสมมูลที่พัฒนาซึ่งได้มาจากขั้นตอนที่ 3



รูปที่ 6.9 ขั้นตอนกระบวนการหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

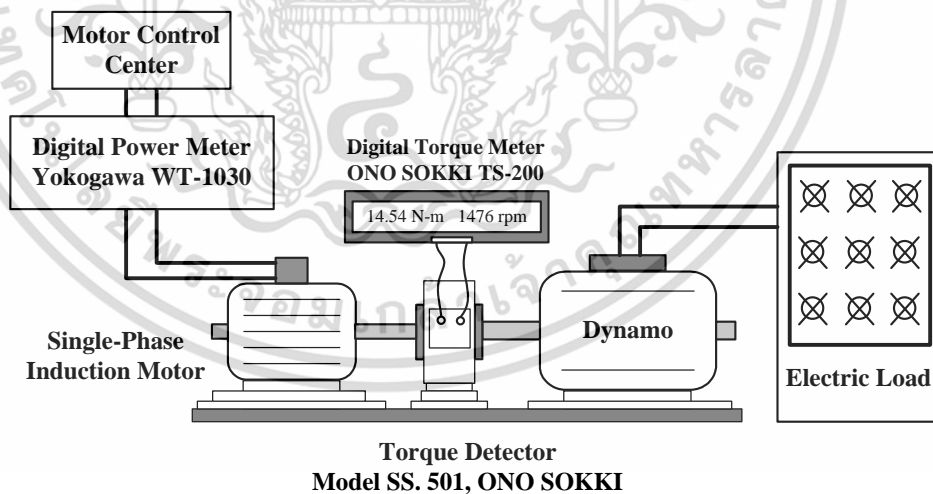
วงจรมุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่อ้างอิงจากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ ยังไม่สามารถแสดงพฤติกรรมที่แท้จริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวได้ เนื่องจากยังไม่มี การพิจารณา ความสูญเสียที่แกนเหล็กในวงจรมุม นอกจากการคำนวณของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวไม่ได้มี การพิจารณาผลของความสูญเสียเนื่องจากการทางกลและความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรง ต้านลม ดังนั้นในการวิเคราะห์จะพิจารณาผลที่ได้จากการใช้วงจรมุมที่พัฒนาทั้ง 3 ต้นแบบ เพื่อ หาข้อสรุปว่าวงจรมุมที่พัฒนาต้นแบบใด สามารถตอบสนองสภาพการทำงานจริงของมอเตอร์ เหนี่ยวนำเฟสเดียวได้ และเหมาะสมที่จะนำไปใช้ร่วมกับวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งานดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันผลจึงได้ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ แยกเฟสและแบบคาปาซิเตอร์สองค่า แบบละ 2 พิกัด แสดงดังตารางที่ 6.3

จากรูปที่ 6.10 เป็นวงจรถดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวในห้องปฏิบัติการด้วย วิธีการทดสอบภาระทางกล (load test : LT) โดยมีการขับภาระทางกลประมาณ 50% - 100% พิกัด มอเตอร์ ทำการวัดปริมาณทางไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุท และกำลังไฟฟ้าอินพุท) ด้วย เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบดิจิตอล สำหรับภาระทางกลของมอเตอร์จำลองโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ (dynamometer) ซึ่งมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดค่าแรงบิดทางกล และความเร็วของโรเตอร์ ผลการ ทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสและแบบคาปาซิเตอร์สองค่าแสดง ได้ดังตารางที่ 6.4 และ 6.5 ตามลำดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าแรงบิดและประสิทธิภาพที่ได้ จากการทดสอบโดยวิธีการ LT กับผลที่ได้จากประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้วงจร มุมที่พัฒนาทั้ง 3 ต้นแบบ (Model 1, Model 2 และ Model 3)

ตารางที่ 6.3 ป้ายพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

Split-phase induction motor						
kW	Hz	V	A	pole	rpm	Cap-run
0.2	50	220	2.8	4	1450	-
0.4	50	220	4.8	4	1440	-

Two-value capacitor induction motor						
kW	Hz	V	A	pole	rpm	Cap-run
0.75	50	220	5.2	4	1430	15.0 μ F
1.50	50	220	9.8	4	1450	18.5 μ F



รูปที่ 6.10 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

0.2 kW Split-phase induction motor					
Load (%)	Voltage (V)	Current (A)	Input Power (W)	Speed (rpm)	Torque (N-m)
68.6	220.1	2.585	269	1455	0.9
75.9	220.1	2.616	289	1449	1
83.3	220	2.648	305.6	1446	1.1
90.3	220.1	2.691	327.3	1437	1.2
97.5	219.9	2.735	345.3	1432	1.3
104.5	219.9	2.79	366.2	1425	1.4

0.4 kW Split-phase induction motor					
Load (%)	Voltage (V)	Current (A)	Input Power (W)	Speed (rpm)	Torque (N-m)
53.9	220.1	3.992	366.9	1471	1.4
69	220.1	4.109	431.4	1465	1.8
76.5	220.1	4.206	474.5	1461	2
84	220.1	4.27	497.7	1458	2.2
91.4	220.1	4.375	539.8	1455	2.4
98.7	220.9	4.540	595.5	1450	2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า

0.75 kW Two value capacitor induction motor					
Load (%)	Voltage (V)	Current (A)	Input Power (W)	Speed (rpm)	Torque (N-m)
57.4	220.1	3.80	632	1472	2.77
73.3	220.5	4.24	767	1462	3.56
81.3	220.8	4.48	832	1458	3.96
89.1	220.5	4.72	897	1453	4.36
97.1	220.3	4.97	964	1449	4.75
106.3	220.1	5.21	1022	1442	5.25

1.5 kW Two value capacitor induction motor					
Load (%)	Voltage (V)	Current (A)	Input Power (W)	Speed (rpm)	Torque (N-m)
57.2	219.9	6.78	1127	1478	5.44
63.7	221.4	7.23	1248	1476	6.14
71.8	220.8	7.73	1385	1473	6.93
79.9	220.9	8.33	1514	1470	7.72
87.8	220.4	8.74	1640	1466	8.51
95.7	220.2	9.28	1770	1462	9.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6.1 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ข้อมูลในตารางที่ 6.6 เป็นการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส พิกัด 0.2 kW และ 0.4 kW ที่ประเมินโดยวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการ LT พบว่า Model 1 และ Model 2 สามารถประเมินแรงบิดได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 3 % ตลอดย่านในการใช้งาน และเมื่อพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของ Model 1 และ Model 2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสพิกัด 0.2 kW มีค่าเท่ากับ 1.81 % และ 0.92 % ตามลำดับ และกรณีพิกัด 0.4 kW มีค่าเท่ากับ 0.88 % และ 1.25 % ตามลำดับ สำหรับ Model 3 จะมีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์มากกว่า Model 1 และ Model 2

จากรูปที่ 6.11 แสดงการเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสพิกัด 0.2 kW และ 0.4 kW โดยเพิ่มวิธีการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสโดยใช้วงจรสมมูลแบบดั้งเดิม (traditional equivalent circuit method : TECM) พบว่าวงจรสมมูลแบบดั้งเดิมไม่สามารถตอบสนองพฤติกรรมจริงของมอเตอร์ได้ เนื่องจากมีค่าแรงบิดที่สูงกว่าแรงบิดที่ได้จากวิธีการ LT และจากวงจรสมมูลที่พัฒนาทั้งสามต้นแบบ ทุก ๆ กรณี

ข้อมูลจากตารางที่ 6.7 เป็นการเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่าพิกัด 0.75 kW และ 1.5 kW ที่ประเมินโดยวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการ LT พบว่า Model 1 และ Model 2 สามารถประเมินแรงบิดได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 3 % ตลอดย่านในการใช้งาน และเมื่อพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของ Model 1 และ Model 2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่า พิกัด 0.75 kW มีค่าเท่ากับ 2.58 % และ 1.60 % ตามลำดับ และกรณีพิกัด 1.5 kW มีค่าเท่ากับ 1.38 % และ 0.86 % ตามลำดับ สำหรับ Model 3 จะมีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์มากกว่า Model 1 และ Model 2

จากรูปที่ 6.12 แสดงการเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่า

พิกัด 0.75 kW และ 1.5 kW โดยเพิ่มการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองค่าโดยใช้วงจรสมมูลแบบดั้งเดิม พบว่าวงจรสมมูลแบบดั้งเดิมไม่สามารถตอบสนองพฤติกรรมจริงของมอเตอร์ได้ เนื่องจากมีค่าแรงบิดสูงกว่าแรงบิดที่ได้จากวิธีการ LT และจากวงจรสมมูลที่พัฒนาทั้งสามต้นแบบ ทุกๆกรณี

ตารางที่ 6.6 การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

0.2 kW Split-phase induction motor							
Load (%)	Torque (N-m)				Relative Error (%)		
	LT	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
68.6	0.90	0.87	0.89	0.76	3.33	1.11	15.56
75.9	1.00	0.98	1.01	1.00	2.00	-1.00	0.00
83.3	1.10	1.09	1.11	1.10	0.91	-0.91	0.00
90.3	1.20	1.18	1.23	1.17	1.67	-2.50	2.50
97.5	1.30	1.28	1.30	1.33	1.54	0.00	-2.31
104.5	1.40	1.38	1.40	1.35	1.43	0.00	3.57

0.4 kW Split-phase induction motor							
Load (%)	Torque (N-m)				Relative Error (%)		
	LT	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
53.90	1.40	1.39	1.42	1.48	0.71	-1.43	-5.71
69.00	1.80	1.78	1.77	1.74	1.11	1.67	3.33
76.50	2.00	2.02	2.03	2.04	-1.00	-1.50	-2.00
84.00	2.20	2.22	2.17	2.20	-0.91	1.36	0.00
91.40	2.40	2.42	2.40	2.37	-0.83	0.00	1.25
98.70	2.60	2.62	2.64	2.64	-0.77	-1.54	-1.54

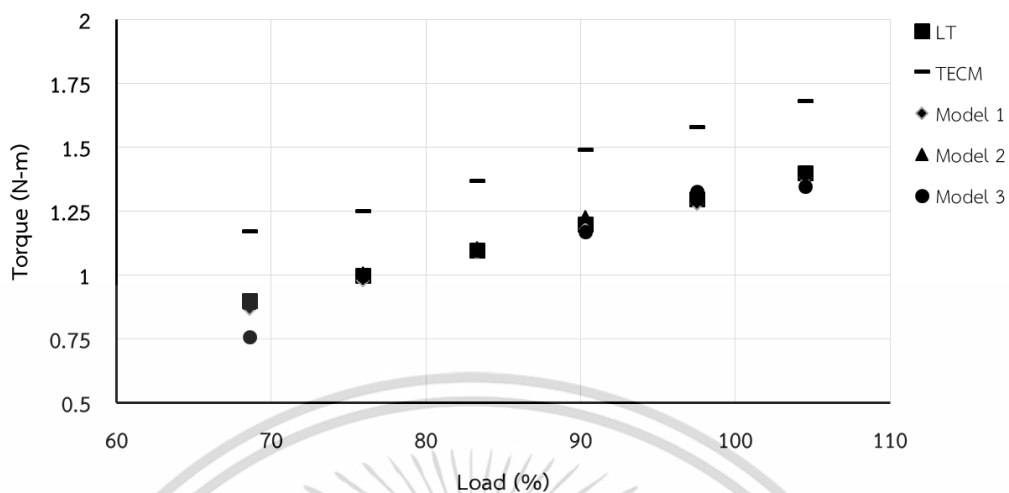
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.7 การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า

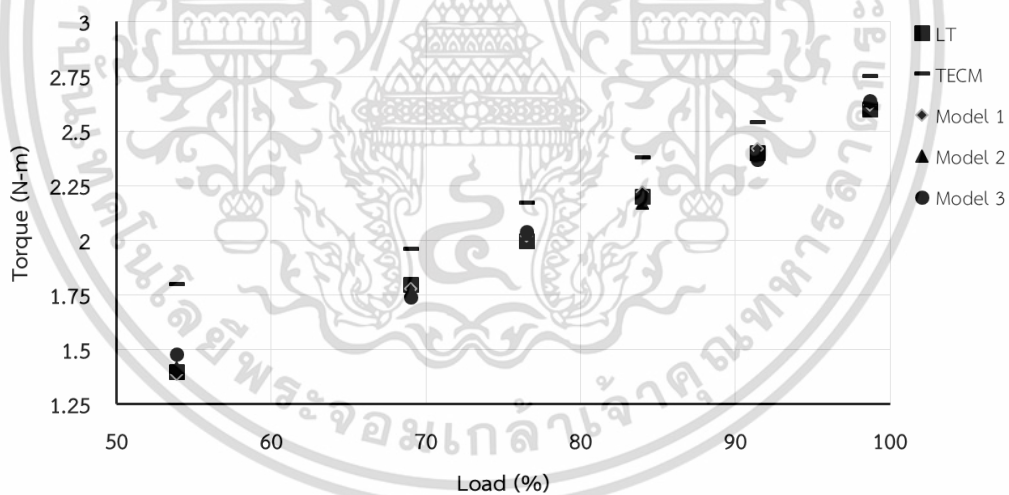
0.75 kW Two-value capacitor induction motor							
Load (%)	Torque (N-m)				Relative Error (%)		
	LT	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
57.4	2.79	2.93	2.82	2.42	-5.02	-1.08	13.26
73.3	3.59	3.71	3.65	3.33	-3.34	-1.67	7.24
81.3	3.99	4.06	3.98	3.82	-1.75	0.25	4.26
89.1	4.39	4.48	4.52	4.04	-2.05	-2.96	7.97
97.1	4.80	4.87	4.78	4.57	-1.46	0.42	4.79
106.3	5.28	5.18	5.11	4.97	1.89	3.22	5.87

1.5 kW Two-value capacitor induction motor							
Load (%)	Torque (N-m)				Relative Error (%)		
	LT	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
57.2	5.54	5.34	5.50	5.37	3.61	0.72	3.07
63.7	6.18	6.24	6.12	6.39	-0.97	0.97	-3.40
71.8	6.98	7.11	7.00	6.64	-1.86	-0.29	4.87
79.9	7.74	7.80	7.85	7.85	-0.78	-1.42	-1.42
87.8	8.58	8.58	8.51	8.31	0.00	0.82	3.15
95.7	9.37	9.27	9.28	9.04	1.07	0.96	3.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



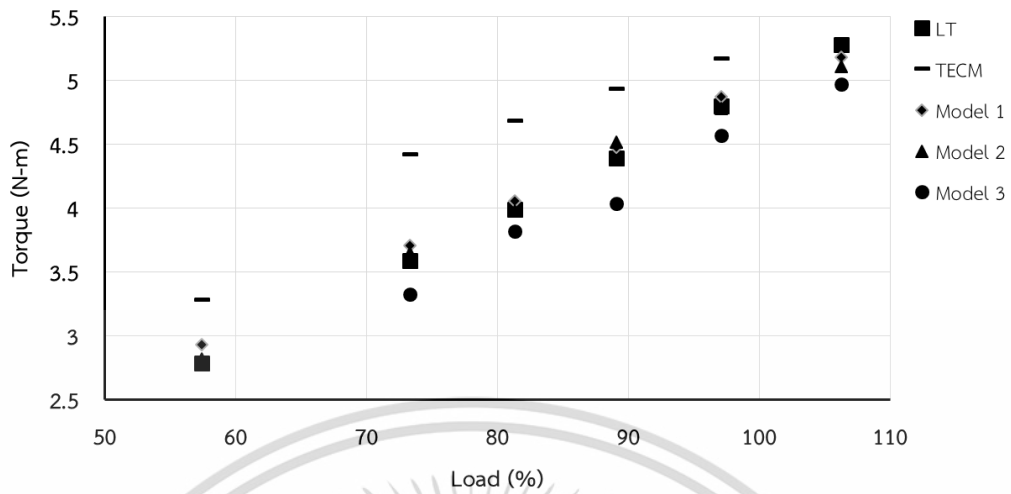
ก) พิกัด 0.2 kW



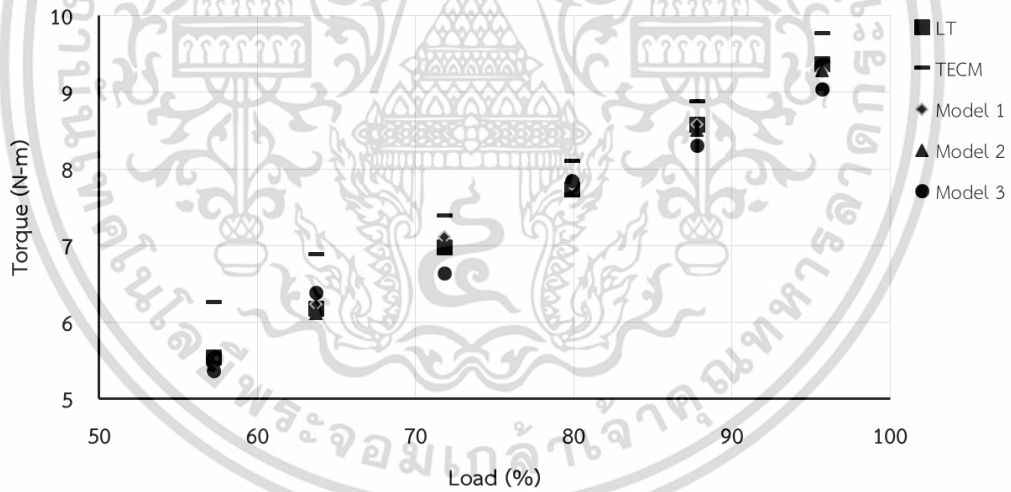
ข) พิกัด 0.4 kW

รูปที่ 6.11 การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) พิกัด 0.75 kW



ข) พิกัด 1.5 kW

รูปที่ 6.12 การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6.2 การประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ข้อมูลในตารางที่ 6.8 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสพิกัด 0.2 kW และ 0.4 kW ที่ประเมินโดยวิธีการที่นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการ LT พบว่า Model 1 และ Model 2 สามารถประเมินประสิทธิภาพได้ใกล้เคียงกับวิธีการ LT โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 % ตลอดย่านในการใช้งาน และเมื่อพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยของ Model 1 และ Model 2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสพิกัด 0.2 kW มีค่าเท่ากับ 1.01 % และ 0.45 % ตามลำดับ และกรณีพิกัด 0.4 kW มีค่าเท่ากับ 1.0 % และ 0.83 % ตามลำดับ สำหรับ Model 3 จะมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์มากกว่า Model 1 และ Model 2

จากรูปที่ 6.13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสพิกัด 0.2 kW และ 0.4 kW โดยเพิ่มการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งแบบแยกเฟสโดยใช้อุปกรณ์แบบดั้งเดิม พบว่าอุปกรณ์แบบดั้งเดิมไม่สามารถตอบสนองพฤติกรรมจริงของมอเตอร์ได้ เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าที่ได้จากวิธีการ LT และจากวงจรสมมูลที่พัฒนาทั้งสามต้นแบบ ทุกๆกรณี

ข้อมูลในตารางที่ 6.9 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่าพิกัด 0.75 kW และ 1.5 kW ที่ประเมินโดยวิธีการที่นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการ LT พบว่า Model 1 และ Model 2 สามารถประเมินประสิทธิภาพได้ใกล้เคียง โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3 % ตลอดย่านในการใช้งาน และเมื่อพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยของ Model 1 และ Model 2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์สองค่าพิกัด 0.75 kW มีค่าเท่ากับ 1.85 % และ 1.18 % ตามลำดับ ส่วนพิกัด 1.5 kW มีค่าเท่ากับ 1.06 % และ 0.67 % ตามลำดับ สำหรับ Model 3 จะมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์มากกว่า Model 1 และ Model 2

จากรูปที่ 6.14 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์

สองค่า พิกัด 0.75 kW และ 1.5 kW โดยเพิ่มการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งแบบแยกเฟสโดยใช้วงจรสมมูลแบบดั้งเดิม พบว่าวงจรสมมูลแบบดั้งเดิมไม่สามารถตอบสนองพฤติกรรมจริงของมอเตอร์ได้ เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าที่ได้จากวิธีการ LT และจากวงจรสมมูลที่พัฒนาทั้งสามต้นแบบ ทุก ๆ กรณี

ตารางที่ 6.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

0.2 kW Split-phase induction motor							
Load (%)	Efficiency (%)				Absolute Error (%)		
	LT	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
68.6	51.00	49.19	50.43	43.22	1.81	0.57	7.78
75.9	52.53	51.44	53.07	52.75	1.09	-0.54	-0.22
83.3	54.52	54.20	54.84	54.60	0.32	-0.32	-0.08
90.3	55.18	54.06	56.38	53.83	1.12	-1.20	1.35
97.5	56.47	55.71	56.39	57.88	0.76	0.08	-1.41
104.5	57.07	56.06	57.07	55.16	1.01	0.00	1.91

0.4 kW Split-phase induction motor							
Load (%)	Efficiency (%)				Absolute Error (%)		
	LT	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
53.90	58.76	58.34	59.61	62.35	0.42	-0.85	-3.59
69.00	63.98	63.22	62.88	61.99	0.76	1.10	1.99
76.50	64.49	65.13	65.44	65.71	-0.64	-0.95	-1.22
84.00	67.51	67.98	66.50	67.67	-0.47	1.01	-0.16
91.40	67.73	68.43	67.80	67.03	-0.70	-0.07	0.70
98.70	66.30	69.31	67.29	67.29	-3.01	-0.99	-0.99

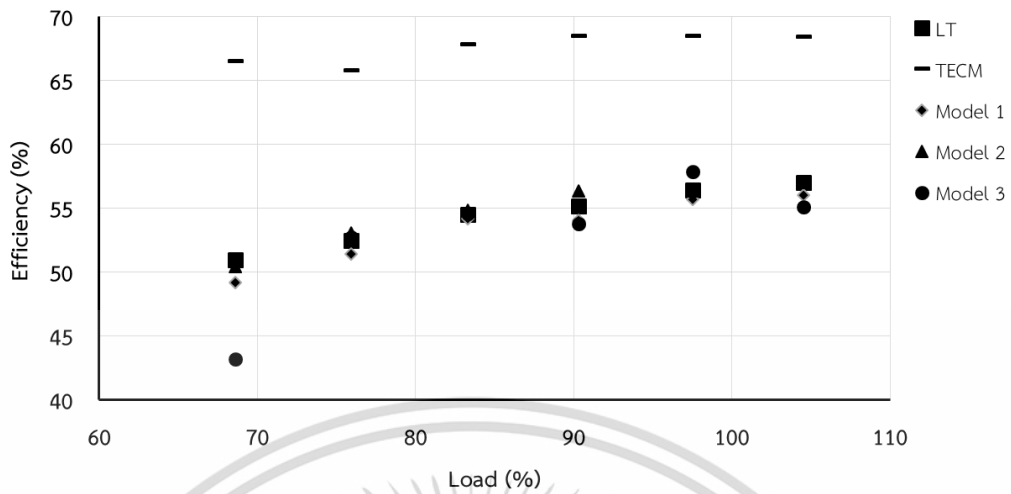
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า

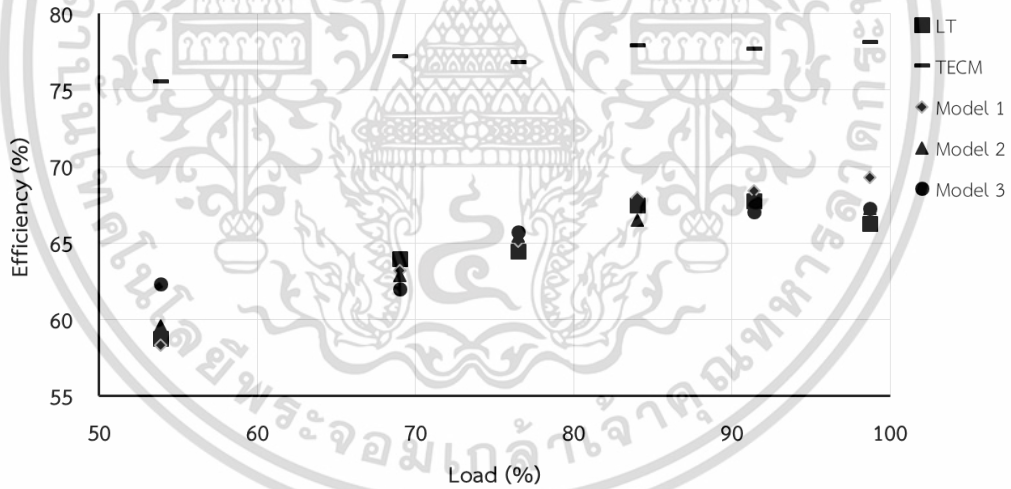
0.75 kW Two-value capacitor induction motor							
Load (%)	Efficiency (%)				Absolute Error (%)		
	LT	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
57.4	68.12	71.56	68.85	58.97	-3.44	-0.73	9.15
73.3	71.68	74.02	72.98	66.51	-2.34	-1.30	5.17
81.3	73.29	74.65	73.17	70.04	-1.36	0.12	3.25
89.1	74.50	75.97	76.74	68.56	-1.47	-2.24	5.94
97.1	75.54	76.68	75.28	72.04	-1.14	0.26	3.50
106.3	78.01	76.65	75.61	73.46	1.36	2.40	4.55

1.5 kW Two-value capacitor induction motor							
Load (%)	Efficiency (%)				Absolute Error (%)		
	LT	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
57.2	76.13	73.36	75.60	73.82	2.77	0.53	2.31
63.7	76.56	77.27	75.79	79.11	-0.71	0.77	-2.55
71.8	77.76	79.18	78.01	73.96	-1.42	-0.25	3.80
79.9	78.76	79.28	79.84	79.77	-0.52	-1.08	-1.01
87.8	80.30	80.28	79.71	77.81	0.02	0.59	2.49
95.7	81.10	80.21	80.31	78.26	0.89	0.79	2.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



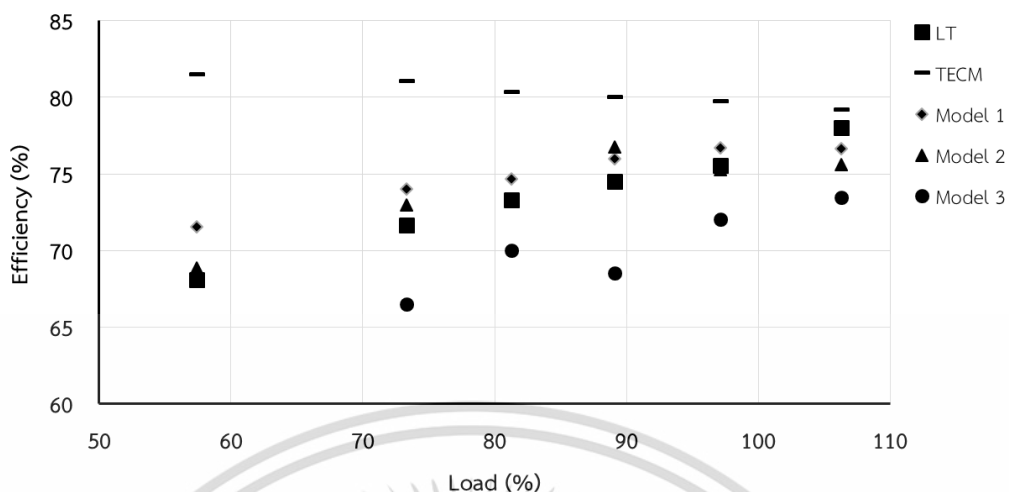
ก) พิกัด 0.2 kW



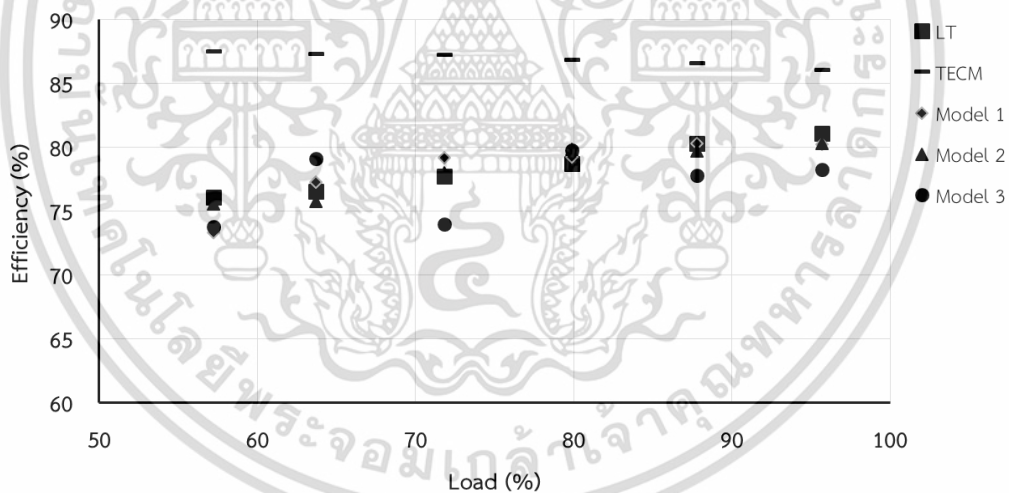
ข) พิกัด 0.4 kW

รูปที่ 6.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) พิกัด 0.75 kW



ข) พิกัด 1.5 kW

รูปที่ 6.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.7 บทสรุป

1. การพัฒนางจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสและแบบคาปาซิเตอร์สองค่า
สรุปได้ดังนี้

1.1 วงจรสมมูลที่พัฒนาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

จากผลการทดสอบโดยวิธีการ LT เมื่อเปรียบเทียบแรงบิดที่ได้จากวงจรสมมูลที่พัฒนาทั้ง 3 ต้นแบบและวงจรสมมูลดั้งเดิม พบว่าแรงบิดที่ได้จากวงจรสมมูลดั้งเดิมมีค่าสูงกว่าวิธีต่าง ๆ และแรงบิดที่ได้จาก Model 1 และ 2 กับวิธีการ LT มีค่าที่เกาะกลุ่มกันที่ภาระทางกลต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 6.11 และเมื่อพิจารณาวงจรสมมูลที่พัฒนา พบว่าค่าแรงบิดที่ได้จาก Model 3 มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงกว่า Model 1 และ 2 ดังตารางที่

6.6 และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากวงจรสมมูลที่พัฒนาทั้งสามต้นแบบและวงจรสมมูลดั้งเดิม พบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากวงจรสมมูลดั้งเดิมมีค่าสูงกว่าวิธีต่าง ๆ และประสิทธิภาพที่ได้จาก Model 1 และ 2 กับวิธีการ LT มีค่าที่เกาะกลุ่มกัน ที่ภาระทางกลต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 6.13 และเมื่อพิจารณาวงจรสมมูลที่พัฒนา พบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้วงจรสมมูลที่พัฒนา Model 3 ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงกว่าของ Model 1 และ 2 แสดงดังตารางที่ 6.8

1.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า

จากผลการทดสอบโดยวิธีวัดแรงบิดโดยตรง เมื่อเปรียบเทียบแรงบิด ประสิทธิภาพกับวงจรสมมูลที่พัฒนาทั้งสามต้นแบบและวงจรสมมูลดั้งเดิม พบว่าแรงบิดและประสิทธิภาพที่ได้จากวงจรสมมูลดั้งเดิมมีค่าสูงกว่าวิธีต่างๆ ส่วนแรงบิดและประสิทธิภาพที่ได้จากวงจรสมมูล Model 1 และ 2 กับวิธีการ LT มีค่าที่เกาะกลุ่มกัน ที่ภาระทางกลต่างๆ แสดงดังรูปที่ 6.12 และ 6.14 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาวงจรสมมูลที่พัฒนา

พบว่าแรงบิดและประสิทธิภาพ ที่ได้วงจรสมมูลที่พัฒนา Model 3 ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมพัทธ์สูงกว่าของ Model 1 และ 2 เมื่อเทียบกับการทดสอบ ดังตารางที่ 6.7 และ 6.9

ตามลำดับ

วงจรมุมลที่พัฒนาสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า พบว่า วงจรมุมลที่พัฒนา Model 1 และวงจรมุมลที่พัฒนา Model 2 สามารถตอบสนองพฤติกรรมจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างถูกต้องและแม่นยำกว่า วงจรมุมลที่พัฒนา Model 3

2. สำหรับวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวขณะใช้งาน โดยใช้วงจรมุมลที่พัฒนา Model 1 และ 2 ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงในขณะใช้งาน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุท กำลังไฟฟ้าอินพุท และความเร็วของมอเตอร์ กับการทดสอบวัดความต้านทานของขดลวด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3% ทั้งกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสและแบบคาปาซิเตอร์สองค่า ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบพลังงานสำหรับการวางแผนลงทุนเกี่ยวกับการเปลี่ยนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวให้เหมาะสม และยังสามารถนำไปใช้กับการวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์ได้

3. วิธีการที่นำเสนอ สามารถพัฒนาเป็นวิธีการค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรมุมล กรณีที่เป็นวงจรมุมลแบบดั้งเดิม โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลและจับยึดโรเตอร์ และกรณีที่เป็นวงจรมุมลที่พัฒนา Model 1 และ 2 โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะมอเตอร์ทำงาน

และจากวิทยานิพนธ์หัวข้อนี้ผู้เขียนได้มีการนำเสนอ “Performance estimation method for in-service single-phase induction motors” [82]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

บทสรุป

7.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้คือการนำเสนอวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งานจริง ทั้งขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายเป็นไซน์และอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเน้นเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบแรงดันต่ำ ชนิดห่อหุ้มฉนวนมิดชิด ที่อ้างอิงตามการออกแบบ A และออกแบบ B เท่านั้น โดยการใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัดร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะใช้งาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการนี้มีขั้นตอนหรือกระบวนการที่มีความยุ่งยากน้อย ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ต่ำ แต่มีความแม่นยำ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอออกเป็น 3 กรณี กรณีแรกเป็นการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายเป็นไซน์ขณะใช้งานจริง โดยใช้ข้อมูลจากการวัด การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ขณะใช้งานจริงโดยใช้ข้อมูลจากการวัด และการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายเป็นไซน์ขณะใช้งานจริงโดยใช้ข้อมูลจากการวัด

7.2 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสรุปได้เป็น 4 ประเด็นหลัก คือ วิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งานเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์ การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งานเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ และการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งานเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.1 วิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1. วิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นวิธีการสำหรับคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์จากค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุง ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์นั้นจะไม่มีการทำงานทดสอบใด ๆ แต่จะใช้วิธีการออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว (AOD) ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากป้ายพิกัดกับข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงาน ซึ่งวิธีดังกล่าวมีขั้นตอนหรือกระบวนการที่มีความยุ่งยากซับซ้อนน้อย มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 3 %

2. วงจรสมมูลที่ปรับปรุงใช้แนวความคิดของต้นแบบความสูญเสีย เพื่อให้วงจรสมมูลสามารถแสดงพฤติกรรมจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการเพิ่มผลของความสูญเสียจากแรงเสียดทานกับแรงต้านลมและความสูญเสียแฝงเนื่องจากภาระทางกล ภายในวงจรสมมูล ทำให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น

3. การออกแบบที่เหมาะสมแบบปรับตัว (AOD) เป็นวิธีการสำหรับประมวลหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่มีการปรับค่าขอบเขตให้เหมาะกับพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัว วิธีดังกล่าวมีสองขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ จะเป็นกระบวนการสำหรับหาขอบเขตของพารามิเตอร์โดยใช้ข้อมูลจากป้ายพิกัดมอเตอร์กับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีเชิงพันธุกรรม ขั้นตอนหาค่าตัวแปรออกแบบที่เหมาะสม เป็นกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะที่มอเตอร์ใช้งาน

7.2.2 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งาน

เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์

1. พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ถ้าพิจารณาการไหล

ของกำลังที่ได้จากวงจรสมมูล ได้แก่ กำลังไฟฟ้าอินพุท ซึ่งพบว่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่ได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีการ AOD เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ LT มีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน สำหรับความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พบว่ามีค่าที่ได้จากวิธีการ AOD มีค่าใกล้เคียงกับวิธีการ ECM เมื่อนำเปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตทางกลที่ได้จากวิธีการ LT พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 3 % ในแต่ละเงื่อนไขการใช้งาน ดังนั้นแสดงว่าวงจรสมมูลที่ปรับปรุงที่พัฒนาจากต้นแบบความสูญเสียสามารถตอบสนองกับพฤติกรรมจริงของมอเตอร์ได้ และถ้าพิจารณาค่าพารามิเตอร์ พบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ปรับปรุง โดยเมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์จากวิธีการ ECM มีค่าใกล้เคียงกัน

2. วิธีการ AOD สามารถประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบแรงดันต่ำ ชนิดห่อหุ้มฉนวนมิดชิดในขณะใช้งาน โดยที่มีความผิดพลาดสัมบูรณ์ประมาณ 2% ที่ภาระทางกล ตั้งแต่ 50 % - 100 % ของพิกัด ซึ่งเป็นช่วงการใช้งานของมอเตอร์ส่วนใหญ่ แต่ที่ภาระทางกลต่ำกว่า 50 % ของพิกัด ความผิดพลาดสัมบูรณ์ประมาณ 3 % นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอยังสามารถนำมาหาสมรรถนะของมอเตอร์ ได้แก่ กำลังเอาต์พุตทางกล ซึ่งมีความผิดพลาดสัมพัทธ์ประมาณ 3 % ที่ภาระทางกลตั้งแต่ 25 % - 100 % ของพิกัด

3. วงจรสมมูลที่ปรับปรุง สามารถแสดงถึงความสูญเสียจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างแม่นยำ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ได้จากการประเมินเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ LT มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 3%

4. ความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ในวิธีการ AOD สามารถใช้ได้ทั้งกรณีที่ได้จากการวัดความเร็วโดยตรงจากเครื่องวัดความเร็วรอบ และกับที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี MCSA เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการ AOD กรณีที่ได้จากการวัดความเร็วโดยตรง และกรณีได้จากการคำนวณด้วยวิธี MCSA มีความผิดพลาดสัมบูรณ์ประมาณ 2 % และ 3% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. วิธีการ AOD เหมาะสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีลักษณะภาระทางกลคงที่ และไม่เหมาะสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีลักษณะภาระทางกลเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

7.2.3 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งาน

เมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

1. วิธีการ AOD สามารถประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ในขณะที่ใช้งาน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW และ 4.0 kW ที่ได้จากวิธีการ LT มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 2 % และเมื่อพิจารณาแรงบิดก็ได้ผลเช่นเดียวกัน คือมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ประมาณ 2 % ดังนั้นวิธีการ AOD สามารถนำมาใช้ในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ในขณะที่ใช้งาน ได้อย่างไม่ยุ่งยากเนื่องจากใช้ข้อมูลอินพุต ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าอินพุตประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้า ความถี่ใช้งาน ความเร็วมอเตอร์ และข้อมูลจากป้ายพิกัดของมอเตอร์ นอกจากนั้นวงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ สามารถใช้งานได้โดยแสดงความสูญเสียจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ ทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นจากวงจรสมมูลแบบดั้งเดิม

การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมระบายอากาศในอุโมงค์ของรถไฟใต้ดินขนาด 108 kW ขณะใช้งานที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบเทคนิคการควบคุมแบบควบคุมแรงบิด ทำการเปรียบเทียบกำลังทางกลที่ได้จากวิธีการ AOD กับค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ขับเคลื่อน (VSD) และวิธีการ CM ปรากฏว่าวิธีการ AOD มีความใกล้เคียงกับค่าจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนมากกว่า และจากนั้นประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เปรียบเทียบกันระหว่างวิธีการ AOD กับวิธีการ CM ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ได้จาก วิธีการ AOD มีความเป็นได้มากกว่าวิธีการ CM ที่ได้ค่าประสิทธิภาพออกมาสูงผิดปกติ เช่นกัน

2. การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ ด้วยวิธีการ AOD ทั้งกรณีการควบคุมแบบแรงบิดคงที่ และกรณีการควบคุมแบบกำลังทางกลคงที่สามารถใช้ได้ทั้งกรณีที่ได้จากการวัดความเร็วโดยตรงจากเครื่องวัดความเร็วรอบ และกับที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี MCSA เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีการ LT มีความผิดพลาดสัมบูรณ์ประมาณ 2 % และ 3% ตามลำดับ

3. วงจรสมมูลที่ปรับปรุงของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์สามารถใช้งานได้โดยแสดงความสูญเสียจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ และเนื่องจากอยู่ในรูปแบบของพารามิเตอร์วงจรถ่วงก่อน ทำให้การนำข้อมูลทางไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณหรือประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ ทำได้ง่ายขึ้น เพราะอยู่ในรูปค่าประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องใช้ค่าทางไฟฟ้าในรูปแบบของความถี่หลักมูล ส่งผลต่อขั้นตอนการวัด ไม่ยุ่งยาก นอกจากนั้นไม่ต้องพิจารณาผลของฮาร์มอนิกส์แรงดัน และฮาร์มอนิกส์กระแส และความแม่นยำมากขึ้นจากวงจรสมมูลแบบดั้งเดิม

7.2.4 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขณะใช้งาน

เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์

1. วงจรสมมูลที่พัฒนาสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบคาปาซิเตอร์สองค่า พบว่า วงจรสมมูลที่พัฒนา Model 1 และวงจรสมมูลที่พัฒนา Model 2 สามารถตอบสนองพฤติกรรมจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างถูกต้องและแม่นยำกว่าวงจรสมมูลที่พัฒนา Model 3

2. สำหรับวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวขณะใช้งาน โดยใช้วงจรสมมูลที่พัฒนา Model 1 และ 2 ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงในขณะใช้งาน ได้แก่

แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุท กำลังไฟฟ้าอินพุท และความเร็วของมอเตอร์ กับการทดสอบวัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานของขดลวด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3% ทั้งกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสและแบบคาปาซิเตอร์สองค่า ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบพลังงานสำหรับการวางแผนลงทุนเกี่ยวกับการเปลี่ยนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวให้เหมาะสม และยังสามารถนำไปใช้กับการวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์ได้

3. วิธีการที่นำเสนอ สามารถพัฒนาเป็นวิธีการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูล กรณีที่เป็นวงจรสมมูลแบบดั้งเดิม โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลและจับยึดโรเตอร์ และกรณีที่เป็นวงจรสมมูลที่พัฒนา Model 1 และ 2 โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดในขณะมอเตอร์ทำงาน

ดังนั้นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำเสนอ สามารถนำไปใช้สำหรับประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีลักษณะภาระทางกลคงที่ ในกรณีที่แหล่งจ่ายปกติ และกรณีที่แหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์ รวมทั้งยังสามารถที่จะประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวทั้งแบบแยกเฟสและแบบตัวเก็บประจุสองค่า โดยที่มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก ไม่ต้องทำการหยุดระบบการทำงานหรือสามารถประเมินประสิทธิภาพในขณะที่มอเตอร์ยังทำงาน มีความสะดวก แต่มีความแม่นยำใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 112 method F/F1 มีความผิดพลาดสัมบูรณ์ประมาณ 3 % โดยได้แสดงตารางเปรียบเทียบกับวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบต่างๆ ดังตารางที่ 7.1

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Hsu, J. Kueck, M. Olszewski, D. Casada, P. Otaduy, and L. Tolbert. "Comparison of induction motor field efficiency estimation methods." IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no. 1, Jan./Feb. 1998, pp. 117-125.
- [2] A. Charette, J. Xu, A. Ba-Razzouk, P. Pillay, and V. Rajagopalan. "The use of the genetic algorithm for in situ efficiency measurement of an induction motor." Conf. Rec. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, pp. 392-397.
- [3] T. Phumiphak, and C. Chat-uthai. "Estimation of induction motor parameters based on field test coupled with genetic algorithm." Proc. IEEE Int. Conf. Power System Technology, 2002, pp. 1199- 120.
- [4] M. S. Aspalli, S. B. Shetagar, and S. F. Kodad, "Estimation of induction motor field efficiency for energy audit and management using genetic algorithm," Proc. Int. Conf. Sensing Technology, 2008, pp. 440-445
- [5] M. Cunkas, and T. Sag. "Efficiency determination of induction motors using multi-objective evolutionary algorithms." Elsevier J. Advances in Engineering Software, vol. 41, Feb. 2010, pp. 255-261.
- [6] Motors and Generators, NEMA MG1-2003 Standard, 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [7] Motor Efficiency Test : According to IEEE Std 112-1996 (Method B), Test Report, Metropolitan Electricity Authority (MEA), Thailand, March 2002.
- [8] Technology Procurement Project IEA Hi-Motor Competition, Jury Report, International Energy Agency, Demand Side Management, Dec. 1998.
- [9] P. Pillay, and Z. Xu. "Labview implementation of speed detection for mains-fed motors using motor current signature analysis." IEEE Power Eng. Review, vol. 18, June 1998, pp. 47- 48.
- [10] B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley. "A survey of available methods for evaluating in-service motor efficiency." Georgia Inst. Technol., Atlanta, GA, EATON WSN Res. Rep., Oct. 2004.
- [11] J. D. Kueck, M. Olszewski, D.A. Casada, J. Hsu, P.J. Otaduy, and L.M. Tolbert. "Assessment of methods for estimating motor efficiency and load under field conditions." Oak Ridge nat. Lab., Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Laboratory Rep., ORNL/TM-13165, 1996.
- [12] A. Wallance, A. Von Jouanne, E. Wiedenbrug, E. Matheson, and J. Douglass. "A laboratory assessment of in-service and non-intrusive motor efficiency testing methods." Electric power Compon. Syst., vol. 29, no. 6, Jun. 2001, pp. 517-529.
- [13] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112-2004, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Standard of the Japanese Electrotechnical Committee, JEC Standard 37, 1979.
- [15] Energy Efficiency Test Methods for Three-Phase Induction Motors, CSA Standard 390, 1993.
- [16] General Requirements for Rotating Electrical Machines – Part 102: Method for Determining Losses and Efficiency from Tests, IEC Standard 34-2, 1972
- [17] R.L. Nailen. “Finding true power output isn’t easy.” *Electr. App.*, Feb. 1994.
- [18] B.S. Guru and H.R. Hiziroglu. **Electric Machinery and Transformers**. Third Edition, Oxford Univ. Press, 2001.
- [19] J. R. Holmquist, J. A. Rooks, and M. E. Richter. “Practical approach for determining motor efficiency in the field using calculated and measured values.” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 1, Jan./Feb. 2004, pp.242-248.
- [20] J. D. Kueck. “Development of a method for estimating motor efficiency and analyzing motor condition.” *IEEE Pulp and Paper Ind. Tech. Conf.*, Jun. 1998, pp. 67-72.
- [21] Ontario Hydro. “**In-plant electric motor loading and efficiency techniques.**” Toronto, ON, Canada, Market Literature.
- [22] J. Hsu, and B.P. Scoggins. “Field test of motor efficiency and load changes through air-gap torque.” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 10, no. 3, Sep. 1995, pp. 477-483.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] P. Pillay, V. Levin, P. Otaduy, and J. Kueck. "In situ induction motor efficiency determination using the genetic algorithm." *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 13, no. 4, Dec 1998, pp. 326-333.
- [24] A. Charette, J. Xu, A. Ba-Razzouk, P. Pillay, and V. Rajagopalan. "The use of the genetic algorithm for in situ efficiency measurement of an induction motor." *Conf. Rec. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000*, pp. 392-397.
- [25] Y. El-Ibiary. "An accurate low-cost method for determining electric motors's efficiency for the purpose for plant energy management." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.39, no.4, Jul./Aug. 2003, pp. 1205-1210.
- [26] T. Phumiphak, and C. Chat-uthai. "An economical method for induction motor field efficiency estimation for use in on-site energy audit and management." *Proc. IEEE Int. Conf. Power System Technology, 2004*, pp. 1250- 1254.
- [27] T. Phumiphak, T. Kedsoi and C. Chat-uthai. "Energy Management Program for Use of Induction Motors Based on Efficiency Prediction." *TENCON 2005 IEEE Region 10, 21-24 Nov. 2005*, pp. 1- 6.
- [28] M. H. Haque. "Determination of NEMA Design Induction Motor Parameters from Manufacturer Data." *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 4, Dec. 2008, pp. 997 - 1004.

- [29] Joaquín Pedra. "On the Determination of Induction Motor Parameters from Manufacturer Data for Electromagnetic Transient Programs." IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 4, Nov. 2008, pp. 1709 – 1718.
- [30] Bin Lu, T. G. Habetler, R. G. Harley. "A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors." IEEE Tran. Ind. Appl., vol. 42, no. 4, Aug. 2006, pp. 924-933.
- [31] Bin Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley. "A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap torque with considerations of condition monitoring." IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 6, Dec. 2008, pp. 1666-1674.
- [32] V. P. Sakthivel, R. Bhuvaneswari, and S. Subramanian. "Non-intrusive efficiency estimation method for energy auditing and management of in-service induction motor using bacterial foraging algorithm." IET Electr. Power Appl., vol.4, Sept. 2010, pp. 579-590.
- [33] V.P. Sakthivel, and S. Subramanian. "On-site efficiency evaluation of three-phase induction motor based on particle swarm optimization." Elsevier J. Energy., vol. 36, Issue 3, Mar. 2011, pp. 1713-1720.
- [34] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., and Stephen D. Umans. **Electric Machinery**. Fifth Edition in SI Units, McGraw-Hill, 1992.

- [35] Bimal K. Bose. **Modern Power Electronics and AC Drives**. First Edition, Prentice Hall PTR, 2002.
- [36] A. Vamvakari, A. Kandianis, A. Kladas, and S. Manias. “High Fidelity Equivalent Circuit Representation of Induction Motor determined by Finite Elements for Electrical Vehicle Drive Applications.” *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 35, no. 3, May 1999, pp. 1857-1860.
- [37] P. G. Cummings. “Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors.” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-22, no. 6, Nov./Dec. 1986, pp. 1121–1126.
- [38] Teruo Kataoka, Yukio Kandatsu, and Toru Akasaka. “Measurement of Equivalent Circuit Parameters of Inverter Fed Induction Motors.” *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 23, no. 5, Sept. 1987, pp. 3014 – 3016.
- [39] Ronald L. Rardin. **Optimization in Operations Research**. First Edition, Prentice Hall, 1997.
- [40] Jasbir Arora. **Introduction to Optimum Design**. Third Edition, Academic Press, 2011.
- [41] Russell C. Eberhard, Yuhui Shi and James Kennedy. **Swarm Intelligence**. First Edition, Morgan Kaufmann, 2001.

- [42] Marco Dorigo and Thomas Stützle. **Ant Colony Optimization**. First Edition, A Bradford Book, 2004.
- [43] David E. Goldberg. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. First Edition, Addison-Wesley Professional, 1989.
- [44] Randy L. Haupt and Sue Ellen Haupt. **Practical Genetic Algorithms**. Second Edition, Wiley-Interscience, 2004.
- [45] Maurice Clerc. **Particle Swarm Optimization**. First Edition, ISTE Publishing Company, 2008.
- [46] Haynes, H.D., and Eissenberg, D.M. Motor Current Signature Analysis Method for Diagnosing Motor Operated Devices. U.S. Patent no. 4965513, Oct. 1990.
- [47] P. Phumiphak, and C. Chat-uthai. "Induction motor speed measurement using motor current signature analysis technique." International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2009, 15-18 Nov. 2009, pp. 1 -5.
- [48] B. Lu, T.G. Habetler, and R.G. Harley. "A Survey of Efficiency Estimation Methods for In-service Induction Motors." IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 42 n. 4, July/Aug 2006, pp. 924–933.
- [49] K.S. Huang, Q.H. Wu, and D.R. Turner. "Effective Identification of Induction Motor Parameters Based on Fewer Measurements." IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 17, no. 1, March 2002, pp. 55 – 60.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [50] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, and M. Pastorelli. "International Standards for the Induction Motor Efficiency Evaluation: A Critical Analysis of the Stray-load Loss Determination." *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 40 n. 5, Sept./Oct. 2004, pp. 1294 – 1301.
- [51] A. Boglietti, A. Cavagnino, L. Ferraris, and M. Lazzari. "Induction Motor Equivalent Circuit Including the Stray Load Losses in the Machine Power Balance." *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, Sept. 2008, pp. 796 – 803.
- [52] C. Kral, and A. Haumer. "Consistent Equivalent Circuit Parameters of Induction Motors for the Calculation of Partial Load Efficiencies." *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, July 2008, pp. 698 – 705.
- [53] Michael Volk. **Pump Characteristics and Applications**. Second Edition, CRC press, 2005.
- [54] Goldberg, D.E., Deb, K., & Clark, J.H. "Genetic algorithms, noise, and the sizing of populations." *IlligAL Report No. 91010*, Dec. 1991.
- [55] Clerc M, and Kennedy J. "The particle swarm-explosion stability, and convergence in a multidimensional complex space." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6 no. 1, 2002, pp. 58-73.
- [56] D.C. Huynh, and M.W. Dunnigan. "Parameter Estimation of an Induction Machine Using Advanced Particle Swarm Optimization Algorithms." *IET Electric Power Applications*, vol. 4, no. 9, 2010, pp. 748 – 760

- [57] P. Phumiphak, and C. Chat-uthai. "Low-intrusive Approach for Parameters Estimation of Induction Motor Using Adaptive Optimal Design Algorithm Based on On-site Measurements." *The International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, Vol. 8, no. 4, July - August 2013, pp. 1162-1169.
- [58] P. Pillay, and Z. Xu. "Labview implementation of speed detection for mains-fed motors using motor current signature analysis." *IEEE Power Eng. Review*, vol. 18, June 1998, pp. 47- 48.
- [59] Howard E. Jordan, Raymond C. Zowarka, Thomas J. Hotz, and John R. Uglum. "Induction Motor Performance Testing With an Inverter Power Supply: Part 1." *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 43, no. 1, Jan. 2007, pp. 242-245
- [60] Howard E. Jordan, Raymond C. Zowarka, Thomas J. Hotz, and John R. Uglum. "Induction Motor Performance Testing With an Inverter Power Supply: Part 2." *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 43, no. 1, Jan. 2007, pp. 275-278
- [61] K. Venikatesan, and James F. Lindsay. "Comparative Study of the Losses in Voltage and Current Source Inverter Fed Induction Motors." *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. IA-1 8, no. 3, May/June 1982, pp. 240-246.
- [62] A. Boglietti, A. Cavagnino, D.M. Ionel, M. Popescu, D.A. Staton, and S. Vaschetto. "A General Model to Predict the Iron Losses in PWM Inverter-Fed Induction Motors." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.46, no. 5, Sept/Oct. 2010, pp. 1882-1890.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [63] Shunji Takada, Kaneo Mohri, Hiroaki Takito, Takeshi Nomura, and Tadashi Sasaki. "Magnetic losses of electrical iron sheet in squirrel-cage induction motor driven by PWM inverter." IEEE Trans. Magnetics, vol. 33, no. 5, Sep. 1997, pp. 3760 – 3762.
- [64] Fernand G. G. De Buck, Paul Gistelinck, AND Dirk De Backer. "A Simple but Reliable Loss Model for Inverter-Supplied Induction Motors." IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-20, no. 1, Jan/Feb. 1984, pp. 190-202.
- [65] Kwanghwan Lee, Jongman Hong, Kwang-Woon Lee, Sang Bin Lee and Ernesto J. Wiedenbrug. "A Stator-Core Quality-Assessment Technique for Inverter-Fed Induction Machines." IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 46, no. 1, Jan/Feb. 2010, pp. 213-221
- [66] Marco Amrhein, and Philip T. Krein. "Induction Machine Modeling Approach Based on 3-D Magnetic Equivalent Circuit Framework." IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 25, no. 2, June 2010, pp. 339-347.
- [67] Scott D. Sudhoff, Brian T. Kuhn, Keith A. Corzine, and Brian T. Branecky. "Magnetic Equivalent Circuit Modeling of Induction Motors." IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, JUNE 2007, pp. 259-270.

- [68] Katsumi Yamazaki, Akihiro Suzuki, Motomichi Ohto, and Teruyuki Takakura. "Circuit Parameters Determination Involving Stray Load Loss and Harmonic Torques for High-Speed Induction Motors Fed by Inverters " IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 28, no. 1, Mar. 2013, pp. 154-163.
- [69] P. Phumiphak, and C. Chat-uthai. "Nonintrusive Method for Estimating Field Efficiency of Inverter-Fed Induction Motor Using Measured Values." IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies 2008, ICSET 2008, 24-27 Nov. 2008, pp. 580-583.
- [70] Cyril G. Veinott and Joseph E. Martin. **Fractional and Subfractional Horsepower Electric Motors**. Fourth Edition, Mc-Graw-Hill Book International Company, 1987.
- [71] Claus B. Rasmussen, and T. J. E. Miller. "Revolving-Field Polygon Technique for Performance Prediction of Single-Phase Induction Motors." IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 39, no. 5, Sept/Oct. 2003, pp. 1300-1306.
- [72] Collins E.R. Jr., Boyd, P.B., and Smith A.O. "Improved methods for determining the equivalent circuit parameters for single-phase induction motor models." Conference Record of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, vol.1, 2-8 Oct 1993, pp. 390 – 397.

- [73] Venkata V. Sastry, and Mayuram R. Krishnamurthy. "Generalized Theory for the Starting Performance of Single-Phase Induction Motor with Asymmetrical Windings." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, no. 4, Apr. 1970, pp. 652-663.
- [74] S. D. Umans. "Steady-state, lumped-parameter model for capacitor-run, single-phase induction motors." IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 32, no. 1, Jan/Feb. 1996, pp. 169-179.
- [75] O'Kelly, D. "Equivalent Circuits for Single-Phase Induction and Hysteresis Motors." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90, no.1, 1971, pp. 279 – 288.
- [76] Kron, Gabriel. "Equivalent Circuit of the Primitive Rotating Machine with Asymmetrical Stator and Rotor." Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 66, no.1, 1947, pp. 17 – 23.
- [77] Slemon, G.R "Equivalent Circuits for Single-Phase Motors" Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Power Apparatus and Systems, Part III., vol.74, no.3, 1955.
- [78] C. van der Merwe and F.S. van der Merwe. "Determination of Single-phase Induction Motor Parameters through Two-phase Measurements." The Transaction of The S.A Institute of Electrical Engineers, June 1991, pp. 152-155.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [79] 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 Conversion, vol. 10, no. 2, June 1995, pp. 248-253.
- [80] Eleazar F. Bustmante. "Evaluating the parameters of the Equivalent Circuit of Single-phase Induction Motors." Electric Machines and Power System, Hemisphere Publishing Corporation, 1987, 13:173-184.
- [81] Suhr, F. W. "Evaluating single-phase induction-motor parameters" Electrical Engineering, vol. 71, no. 5, 1952, pp. 419.
- [82] P. Phumiphak, and C. Chat-uthai. "Performance estimation method for in-service single-phase induction motors." IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies 2008, ICSET 2008, 24-27 Nov. 2008, pp. 584-588.


ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 11 kW

การไฟฟ้านครหลวง

	บันทึกผลการทดสอบ ประสิทธิภาพมอเตอร์ ตามมาตรฐาน IEEE Std 112-1996 (Method B)	รหัสเอกสาร : FM-WI-TEC-01-01-ES แก๊สเครื่องที่ : 03 ฉบับที่ 04 ประกาศใช้ : 12 มีนาคม 2544 หน้าที่ : 1/4																																																																	
การไฟฟ้านครหลวง ฝ่ายบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า																																																																			
ลำดับงานที่ : 11 วันที่ทดสอบ : 12 มี.ค. 2544																																																																			
รายละเอียดบน NAME PLATE ของมอเตอร์ Type Design Frame <u>40M</u> hp/kW <u>15 HP</u> Phase <u>3</u> Frequency <u>50</u> Volts <u>220/380</u> synchronous /min <u>1725</u> Serial Number Degrees C Temperature Rise Time Rating Model Number Insulation Class Pole																																																																			
<p>หัวข้อทดสอบ</p> <p>1) การวัดความต้านทานของขดลวด STATOR (DC Resistance)</p> <p>ความต้านทานของขดลวด STATOR</p> <ul style="list-style-type: none"> ความต้านทานที่ขั้ว R - Y = <u>0.5112</u> Ohm ความต้านทานที่ขั้ว Y - B = <u>0.5116</u> Ohm ความต้านทานที่ขั้ว R - B = <u>0.5150</u> Ohm <p>ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR = Ohm อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด STATOR = <u>77.2</u> °C</p>																																																																			
<p>2) Rated Load Temperature Test</p> <p>2.1) บันทึกอุณหภูมิของขดลวด Stator ทุกๆ 1/2 ชม. ล้นสุดเมื่อ อุณหภูมิเพิ่มมีความแตกต่างไม่เกิน 1 °C</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>บันทึกครั้งที่</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> <th>11</th> <th>12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>เวลา</td> <td>7:30</td> <td>8:00</td> <td>8:30</td> <td>9:00</td> <td>9:30</td> <td>10:00</td> <td>10:30</td> <td>11:00</td> <td>11:30</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>อุณหภูมิขดลวด</td> <td>27.2</td> <td>72.6</td> <td>96.7</td> <td>97.8</td> <td>101.9</td> <td>103.8</td> <td>105.9</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>อุณหภูมิโดยรอบ</td> <td>23.2</td> <td>24.7</td> <td>24.6</td> <td>24.5</td> <td>24.6</td> <td>24.7</td> <td>24.7</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>อุณหภูมิเพิ่ม</td> <td>4.0</td> <td>47.8</td> <td>69.1</td> <td>73.3</td> <td>77.5</td> <td>79.6</td> <td>79.9</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>อุณหภูมิสูงสุดของขดลวด STATOR = <u>102.5</u> °C อุณหภูมิโดยรอบของมอเตอร์(Ambient Temperature) = <u>24.7</u> °C</p>			บันทึกครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	เวลา	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30				อุณหภูมิขดลวด	27.2	72.6	96.7	97.8	101.9	103.8	105.9						อุณหภูมิโดยรอบ	23.2	24.7	24.6	24.5	24.6	24.7	24.7						อุณหภูมิเพิ่ม	4.0	47.8	69.1	73.3	77.5	79.6	79.9					
บันทึกครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																							
เวลา	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30																																																										
อุณหภูมิขดลวด	27.2	72.6	96.7	97.8	101.9	103.8	105.9																																																												
อุณหภูมิโดยรอบ	23.2	24.7	24.6	24.5	24.6	24.7	24.7																																																												
อุณหภูมิเพิ่ม	4.0	47.8	69.1	73.3	77.5	79.6	79.9																																																												
<p>2.2) วัดความต้านทานของขดลวด Stator หลังจากปลดแหล่งจ่ายไฟ</p> <p>ความต้านทานของขดลวด STATOR ที่ขั้ว R - Y = <u>0.711</u> Ohm อุณหภูมิของขดลวด R - Y = <u>104.9</u> °C อุณหภูมิโดยรอบของมอเตอร์(Ambient Temperature) = <u>24.9</u> °C</p>																																																																			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 การไฟฟ้านครหลวง ฝ่ายบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า	บันทึกผลการทดสอบ ประสิทธิภาพมอเตอร์ ตามมาตรฐาน IEEE 112-1996 (Method B)	รหัสเอกสาร : FM-WI-TEC-01-01-ES แก้ไขครั้งที่ : 03 ฉบับที่ 04 ประกาศใช้ : 12 มีนาคม 2545 หน้าที่ : 3/4																
	4) Dynamometer Correction Test มอเตอร์ต่ออยู่กับไดนาโม																	
<table border="1"> <tr><td>ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.</td><td>606.8</td></tr> <tr><td>ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.</td><td>8.076</td></tr> <tr><td>ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ r/min</td><td>1118</td></tr> <tr><td>ค่าแรงบิดของมอเตอร์ Nm</td><td>0.300</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว R - Y</td><td>0.655</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว Y - B</td><td>0.641</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว R - B</td><td>0.656</td></tr> <tr><td>ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR</td><td>←</td></tr> </table>		ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.	606.8	ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.	8.076	ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ r/min	1118	ค่าแรงบิดของมอเตอร์ Nm	0.300	ความต้านทานที่ขั้ว R - Y	0.655	ความต้านทานที่ขั้ว Y - B	0.641	ความต้านทานที่ขั้ว R - B	0.656	ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR	←	
ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.	606.8																	
ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.	8.076																	
ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ r/min	1118																	
ค่าแรงบิดของมอเตอร์ Nm	0.300																	
ความต้านทานที่ขั้ว R - Y	0.655																	
ความต้านทานที่ขั้ว Y - B	0.641																	
ความต้านทานที่ขั้ว R - B	0.656																	
ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR	←																	
มอเตอร์ไม่ต่ออยู่กับไดนาโม																		
<table border="1"> <tr><td>ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.</td><td>558.2</td></tr> <tr><td>ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.</td><td>8.131</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว R - Y</td><td>0.610</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว Y - B</td><td>0.639</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว R - B</td><td>0.678</td></tr> <tr><td>ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR</td><td>—</td></tr> </table>		ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.	558.2	ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.	8.131	ความต้านทานที่ขั้ว R - Y	0.610	ความต้านทานที่ขั้ว Y - B	0.639	ความต้านทานที่ขั้ว R - B	0.678	ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR	—					
ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.	558.2																	
ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.	8.131																	
ความต้านทานที่ขั้ว R - Y	0.610																	
ความต้านทานที่ขั้ว Y - B	0.639																	
ความต้านทานที่ขั้ว R - B	0.678																	
ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR	—																	
5) No-load Test 5.1) บันทึกค่าอุณหภูมิของขดลวดและกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ขณะไม่มีโหลดทุกๆ 1/2 ชม. ล้นสุดเมื่อค่าอุณหภูมิที่อ่านได้มีความแตกต่างไม่เกิน 1 °C และค่ากำลังไฟฟ้าที่อ่านได้ มีความแตกต่างไม่เกิน 3%																		
บันทึกครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
เวลา	11.00	11.30	12.00	12.30														
ค่ากำลังไฟฟ้า(W)	556.1	555.1	557.9	556.4														
อุณหภูมิขดลวด	75.1	66.1	67.1	65.6														

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การไฟฟ้านครหลวง
ฝ่ายบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า

บันทึกผลการทดสอบ
ประสิทธิภาพมอเตอร์

ตามมาตรฐาน IEEE 112-1996 (Method B)

รหัสเอกสาร : FM-WI-TEC-01-01-ES

แก้ไขครั้งที่ : 03 ฉบับที่ 04

ประกาศใช้ : 12 มีนาคม 2545

หน้าที่ : 2/4

2.3) กรณีที่ไม่สามารถอ่านค่าความต้านทานของขดลวด Stator ได้ภายในเวลาที่กำหนดให้อ่านและบันทึกค่าความต้านทานของขดลวด Stator เพิ่มอีกทุก ๆ 30 วินาที อย่างน้อย 10 ค่า


ค่าที่อ่านลำดับที่	เวลาหลังจาก Shutdown (วินาที)	ค่าความต้านทานที่อ่านได้ (โอห์ม)
1		0.701
2		0.699
3		0.690
4		0.686
5		0.682
6		0.679
7		0.676
8		0.674
9		0.671
10		0.669
11		0.666
12		0.662
13		0.659
14		0.655
15		0.651

อุณหภูมิของขดลวด R - Y = °C
อุณหภูมิโดยรอบของมอเตอร์(Ambient Temperature) = °C


3) Load Test

หัวข้อการวัด	โหลดที่จ่ายให้มอเตอร์					
	150 %	125 %	100 %	75 %	50 %	25 %
WWWWWW
อุณหภูมิโดยรอบของมอเตอร์ °C	22.6	21.5	22.4	21.1	21.2	21.3
ค่าอุณหภูมิของขดลวด Stator °C	22.9	22.0	23.6	21.1	21.3	21.5
ค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้า Hz	50.05	50.00	50.05	50.07	50.02	50.03
ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ r/min	1211	1130	1217	1161	1215	1287
ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ Line V.	381.7	381.6	381.2	350.7	350.5	350.5
ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.	22.74	23.21	22.56	17.512	13.062	9.668
ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ □W. □kW	20.03	16.240	12.769	9.511	6.361	3.395
ค่าแรงบิดของมอเตอร์ Nm	113.3	93.2	73.5	41.5	35.8	17.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


	บันทึกผลการทดสอบ ประสิทธิภาพมอเตอร์ ตามมาตรฐาน IEEE 112-1996 (Method B)	รหัสเอกสาร : FM-WI-TEC-01-01-ES แกะไขครั้งที่ : 03 ฉบับที่ 04 ประกาศใช้ : 12 มีนาคม 2545 หน้าที่ : 3/4																																																				
การไฟฟ้านครหลวง ฝ่ายบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า																																																						
4) Dynamometer Correction Test มอเตอร์ต่ออยู่กับไดนาโม																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.</td><td style="text-align: right;">606.8</td></tr> <tr><td>ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.</td><td style="text-align: right;">8.076</td></tr> <tr><td>ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ r/min</td><td style="text-align: right;">1498</td></tr> <tr><td>ค่าแรงบิดของมอเตอร์ Nm</td><td style="text-align: right;">0.300</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว R - Y</td><td style="text-align: right;">0.653</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว Y - B</td><td style="text-align: right;">0.651</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว R - B</td><td style="text-align: right;">0.656</td></tr> <tr><td>ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR</td><td style="text-align: center;">—</td></tr> </table>			ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.	606.8	ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.	8.076	ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ r/min	1498	ค่าแรงบิดของมอเตอร์ Nm	0.300	ความต้านทานที่ขั้ว R - Y	0.653	ความต้านทานที่ขั้ว Y - B	0.651	ความต้านทานที่ขั้ว R - B	0.656	ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR	—																																				
ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.	606.8																																																					
ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.	8.076																																																					
ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ r/min	1498																																																					
ค่าแรงบิดของมอเตอร์ Nm	0.300																																																					
ความต้านทานที่ขั้ว R - Y	0.653																																																					
ความต้านทานที่ขั้ว Y - B	0.651																																																					
ความต้านทานที่ขั้ว R - B	0.656																																																					
ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR	—																																																					
มอเตอร์ไม่ต่ออยู่กับไดนาโม																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.</td><td style="text-align: right;">658.2</td></tr> <tr><td>ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.</td><td style="text-align: right;">8.131</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว R - Y</td><td style="text-align: right;">0.610</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว Y - B</td><td style="text-align: right;">0.609</td></tr> <tr><td>ความต้านทานที่ขั้ว R - B</td><td style="text-align: right;">0.608</td></tr> <tr><td>ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR</td><td style="text-align: center;">—</td></tr> </table>			ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.	658.2	ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.	8.131	ความต้านทานที่ขั้ว R - Y	0.610	ความต้านทานที่ขั้ว Y - B	0.609	ความต้านทานที่ขั้ว R - B	0.608	ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR	—																																								
ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ W.	658.2																																																					
ค่ากระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ A.	8.131																																																					
ความต้านทานที่ขั้ว R - Y	0.610																																																					
ความต้านทานที่ขั้ว Y - B	0.609																																																					
ความต้านทานที่ขั้ว R - B	0.608																																																					
ความต้านทานเฉลี่ยของขดลวด STATOR	—																																																					
5) No-load Test 5.1) บันทึกค่าอุณหภูมิของขดลวดและกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ขณะไม่มีโหลดทุกๆ 1/2 ชม. ล้นสุดเมื่อค่าอุณหภูมิที่อ่านได้มีความแตกต่างไม่เกิน 1 °C และค่ากำลังไฟฟ้าที่อ่านได้ มีความแตกต่างไม่เกิน 3%																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>บันทึกครั้งที่</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> <th>11</th> <th>12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>เวลา</td> <td>11.00</td> <td>11.30</td> <td>12.00</td> <td>12.30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ค่ากำลังไฟฟ้า(W)</td> <td>556.1</td> <td>556.1</td> <td>557.0</td> <td>556.4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>อุณหภูมิขดลวด</td> <td>73.1</td> <td>66.1</td> <td>73.1</td> <td>75.6</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			บันทึกครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	เวลา	11.00	11.30	12.00	12.30									ค่ากำลังไฟฟ้า(W)	556.1	556.1	557.0	556.4									อุณหภูมิขดลวด	73.1	66.1	73.1	75.6								
บันทึกครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																										
เวลา	11.00	11.30	12.00	12.30																																																		
ค่ากำลังไฟฟ้า(W)	556.1	556.1	557.0	556.4																																																		
อุณหภูมิขดลวด	73.1	66.1	73.1	75.6																																																		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	บันทึกผลการทดสอบ	รหัสเอกสาร : FM-WI-TEC-01-01-ES
การไฟฟ้านครหลวง	ประสิทธิภาพมอเตอร์	แก้ไขครั้งที่ : 03 ฉบับที่ 04
ฝ่ายบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า	ตามมาตรฐาน IEEE 112-1996 (Method B)	ประกาศใช้ : 12 มีนาคม 2545
		หน้าที่ : 4/4

5.2) ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้มอเตอร์ตามที่กำหนด พร้อมทั้งบันทึกค่าต่างๆลงในตาราง

หัวข้อการวัด	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ V. (L-N/L-L)						
	125 %	100 %	80 %	60 %	40 %	30%	20%
	275/475	220/380	176/304	132/228	88/152	66/114	44/76
ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ V.	271.6	279.9	301.0	228.6	162.00	111.05	76.00
ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า A.	14.087	8.203	5.321	2.756	2.612	1.9812	1.6062
ค่ากำลังไฟฟ้าไม่มีโหลดของมอเตอร์ □W. □kW	2.119	0.572	0.351.1	0.211.7	0.162.62	136.87	116.81
ค่าอุณหภูมิของขดลวด Stator °C	63.4	61.0	69.3	67.3	65.6	61.0	62.5
อุณหภูมิโดยรอบของมอเตอร์ °C	24.6	24.8	24.8	24.7	24.9	24.7	24.7



ลงชื่อผู้ทดสอบ.....
(.....)
วันที่ 6 มิ.ย. 45

ลงชื่อผู้ตรวจสอบ.....
(.....)
วันที่ 6 มิ.ย. 45

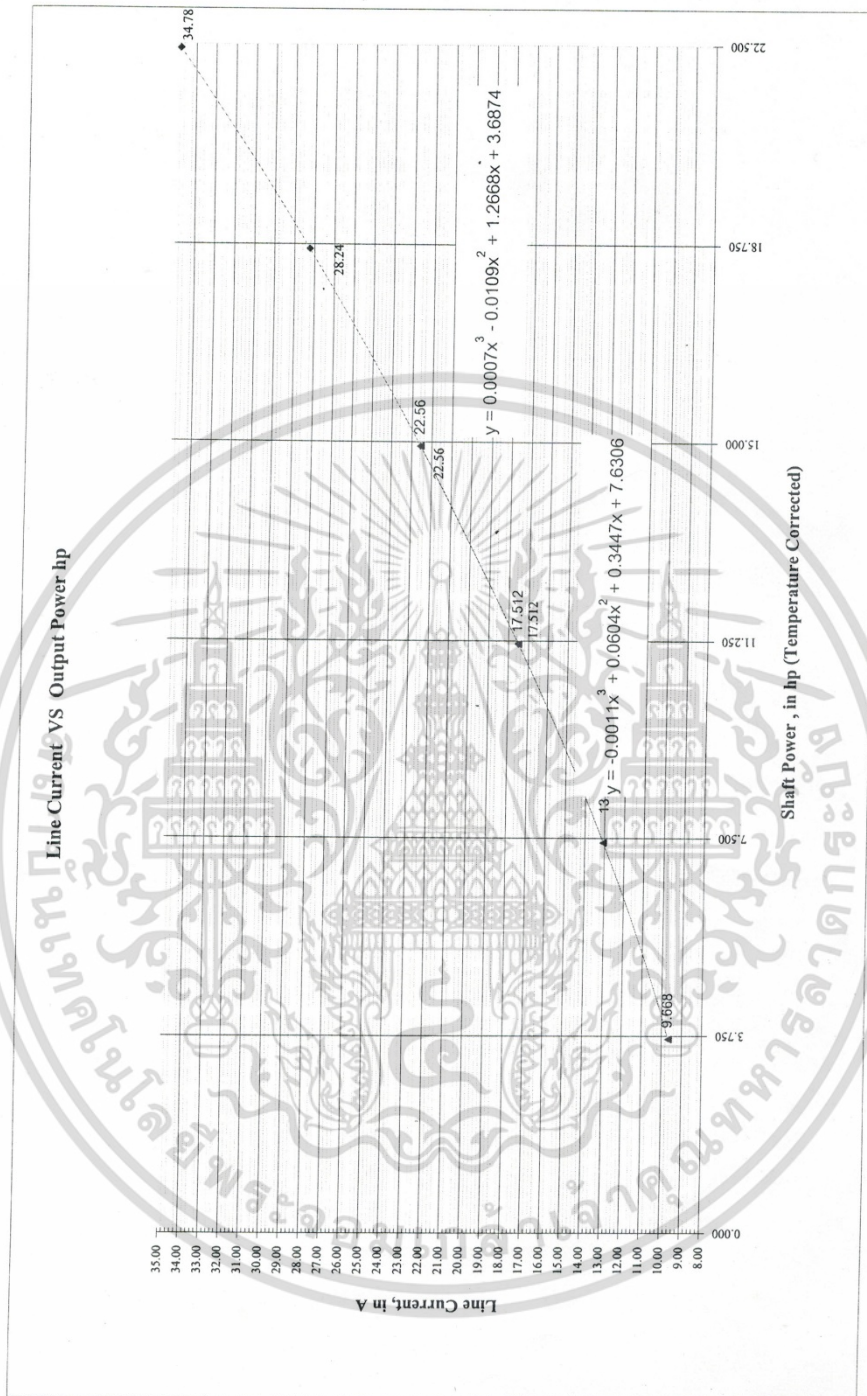
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 75 kW

1



December 1998

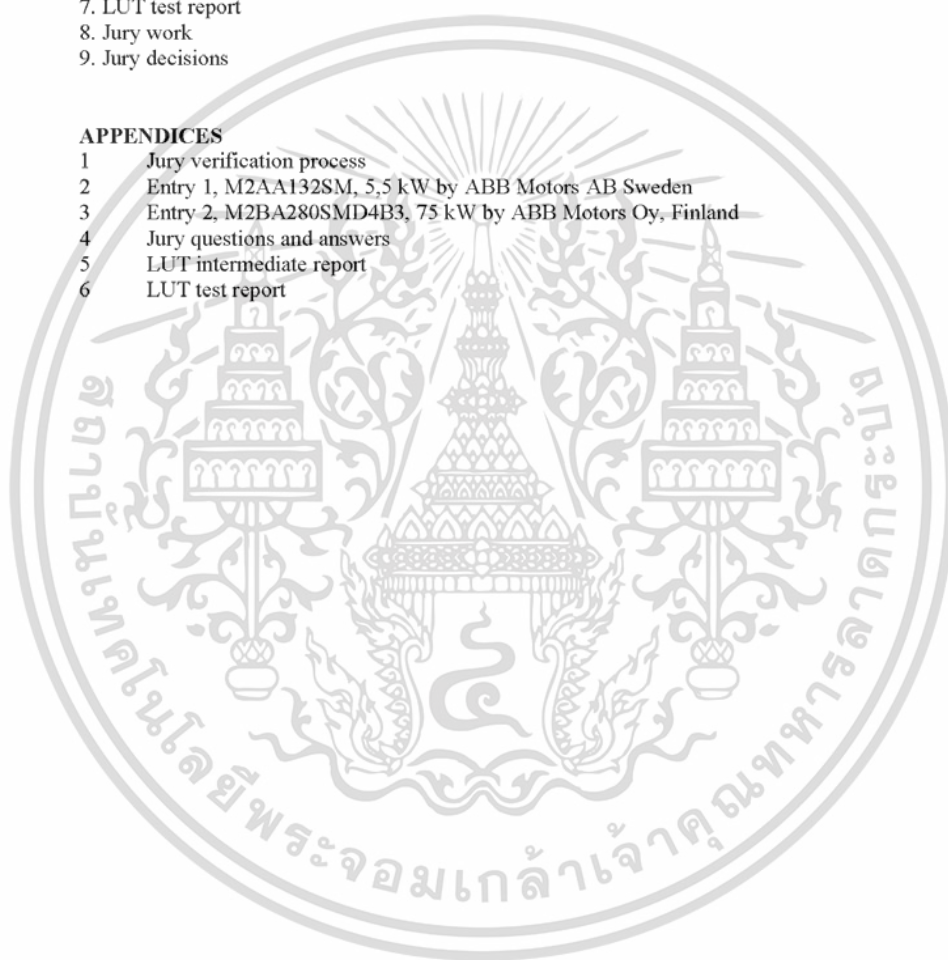
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTENTS

1. Background
2. Jury members
3. Jury verification process
4. Entries
5. Jury questions and answers
6. LUT intermediate report
7. LUT test report
8. Jury work
9. Jury decisions

APPENDICES

- 1 Jury verification process
- 2 Entry 1, M2AA132SM, 5,5 kW by ABB Motors AB Sweden
- 3 Entry 2, M2BA280SMD4B3, 75 kW by ABB Motors Oy, Finland
- 4 Jury questions and answers
- 5 LUT intermediate report
- 6 LUT test report



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Background

This report is the jury report for the technology procurement project IEA Hi-Motors Competition. The project has been carried out as an international pilot project within IEA DSM Agreement Annex III, Co-operative Procurement of Innovative Technologies.

The main goals of the project are

- to establish electric motors with losses about 25-50% less compared to average motors, at a price level and a performance level which guarantees a long lasting significant market share
- to establish high efficient electric motors to the market (3-phase, 4 poles, 1500 r/min, continuous use, most common motor type on the market)
- to produce electric motors with energy efficiency higher than in any motor before and get them to the marketplace.

The competition documentation containing the requirements and rules can be found in Internet starting from

<http://info.lut.fi/ente/sahko/Hi-Motors/Intro.htm>

or

<http://www.stem.se/IEAProcure/>

The project manager for the project has been MOTIVA, Information Center for Energy Efficiency, Finland.

2. Jury members

The members of the jury were appointed by the IEA DSM Annex III participating countries interested to join the project jury work. The jury members are:

Mr. Hugh Falkner; ETSU, United Kingdom
 Mr. Klaus Malmose; NESAS, Denmark
 Mr. Glenn Widerström; STEM, Sweden
 Mr. Heikki Härkönen; MOTIVA, Finland

The jury members are working with projects related with industrial energy use, for example electric motors.

3. Jury verification process

The jury agreed to define a verification process of the entries, see Appendix 1. In its work the jury followed the set procedures.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4

4. Entries

Within the deadline of the competition, 15 August 1998, two entries were received. There were no other entries.

The entries were:

M2AA132SM, 5,5 kW by ABB Motors AB Sweden, see Appendix 2

and

M2BA280SMD4B3, 75 kW by ABB Motors Oy, Finland, see Appendix 3.

5. Jury questions and answers

As defined in the competition rules and the jury definition process, the jury asked questions from the entry makers. The answers to the questions were received, see Appendix 4.

6. LUT intermediate report

In its evaluation work the jury used expertise of Lappeenranta University of Technology (LUT) specialists,

Mr. Jorma Haataja, Research Engineer, Licentiate of Science (Technology, El. Eng.)

and

Mr. Juha Pyrhönen, Professor, Doctor of Science (Technology, El. Eng.)

Based on the entry papers LUT compiled an intermediate report, see Appendix 5.

7. LUT test report

The entry motors were shipped to Lappeenranta University of Technology for testing. The test results are reported in the LUT test report, see Appendix 6.

8. Jury work

The jury studied thoroughly the received entry papers, LUT intermediate and the test report results and the answers from the entry makers.

Comments, notes and remarks were made and discussed between the jury members and the specialists using phone calls, mail and e-mail.

On 9-11 November 1998 a jury meeting was arranged in Lappeenranta, Finland. The jury studied the concrete entry motors and was assisted by the LUT specialists in detailed questions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Main jury notes:

- the direct method test data by LUT showed even better energy efficiency values than the entry makers' data
- the energy efficiency of the 5,5 kW motor at 50% load exceeded the mandatory requirement according to the LUT tests
- the power factor of the 5,5 kW motor is a bit lower than in the entry maker's similar standard motor, but the difference is not remarkable and so is acceptable
- the first calculations of economy and payback times using the indicative data on price premiums for both entry motors are promising.

9. Jury decisions

The jury decided to award the both entries

M2AA132SM, 5,5 kW by ABB Motors AB Sweden

and

M2BA280SMD4B3, 75 kW by ABB Motors Oy, Finland

With "IEA Award of Excellence". The entry motors meet the Hi-Motors mandatory requirements specified in the competition rules.

The jury decided not to use possible nominations "IEA Champion" or "IEA Highest Efficiency". They would have been relevant only in a situation with many entries.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX3

Entry 2, M2BA280SMD4B3, 75 kW by ABB Motors Oy, Finland



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 0. 07. 98

Handled by
Jouni IkäheimoDate
July 8, 1998Pages
1 (1)**Liability Statement**

This is to certify that ABB Motors Oy wishes to enter the Hi-Motors competition with a M2BA280SMD4 prototype induction motor and that we have fully understood and accepted the competition rules.

The physical prototype is available for further testing at ABB Motors' premises.

Jouni Ikäheimo
Product Development Manager
ABB Motors Oy

Contact Address:
Jouni Ikäheimo
ABB Motors Oy
P.O.Box 633
FIN-65101 Vaasa, FINLAND
Tel. +358-10-22-43626
Fax +358-10-22-41065
e-mail: jouni.ikaheimo@rimot.mail.abb.com

ABB Motors Oy

Käyntiosoite - Visiting Address	Postiosoite - Postal Address	Puhelin - Telephone	Telekopio - Telefax
Strömberg Park, Strömbergin puustotte 5 A 65320 Vaasa	PL 633, 65101 Vaasa P.O. Box 633, FIN-65101 Vaasa, Finland	010 22 4000 +358 10 22 4000	010 22 47372 +358 10 22 47372

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Handled by
Jouni Ikaheimo

Date
July 8, 1998

Pages
1 (1)

Commercial Report

ABB Motors Oy intends to enter the Hi-Motors competition with its prototype 75 kW motor M2BA280SMD4. It is our intention that the final product based on this prototype will be directed to customers who are running their motors continuously and thus benefit from the high efficiency. Such industries are e.g. Pulp&Paper factories in Scandinavia.

The M2BA280SMD4 competition prototype is, best to our knowledge, a truthful representation of the final commercial product which will be marketed through ABB sales organisation. Estimated price of the product will be 4900 ECU for Scandinavian markets, FCA Vaasa. The product can already be ordered. The service of the product will be taken care by ABB Service.



Jouni Ikaheimo
Product Development Manager
ABB Motors Oy

ABB Motors Oy

Käyntiosoite - Visiting Address	Postiosoite - Postal Address	Puhelin - Telephone	Telekopio - Telefax
Stromberg Park, Strombergin puistolle 5 A 65320 Vaasa	PL 633, 65101 Vaasa P.O. Box 633, FIN-65101 Vaasa, Finland	010 22 4000 +358 10 22 4000	010 22 47372 +358 10 22 47372

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



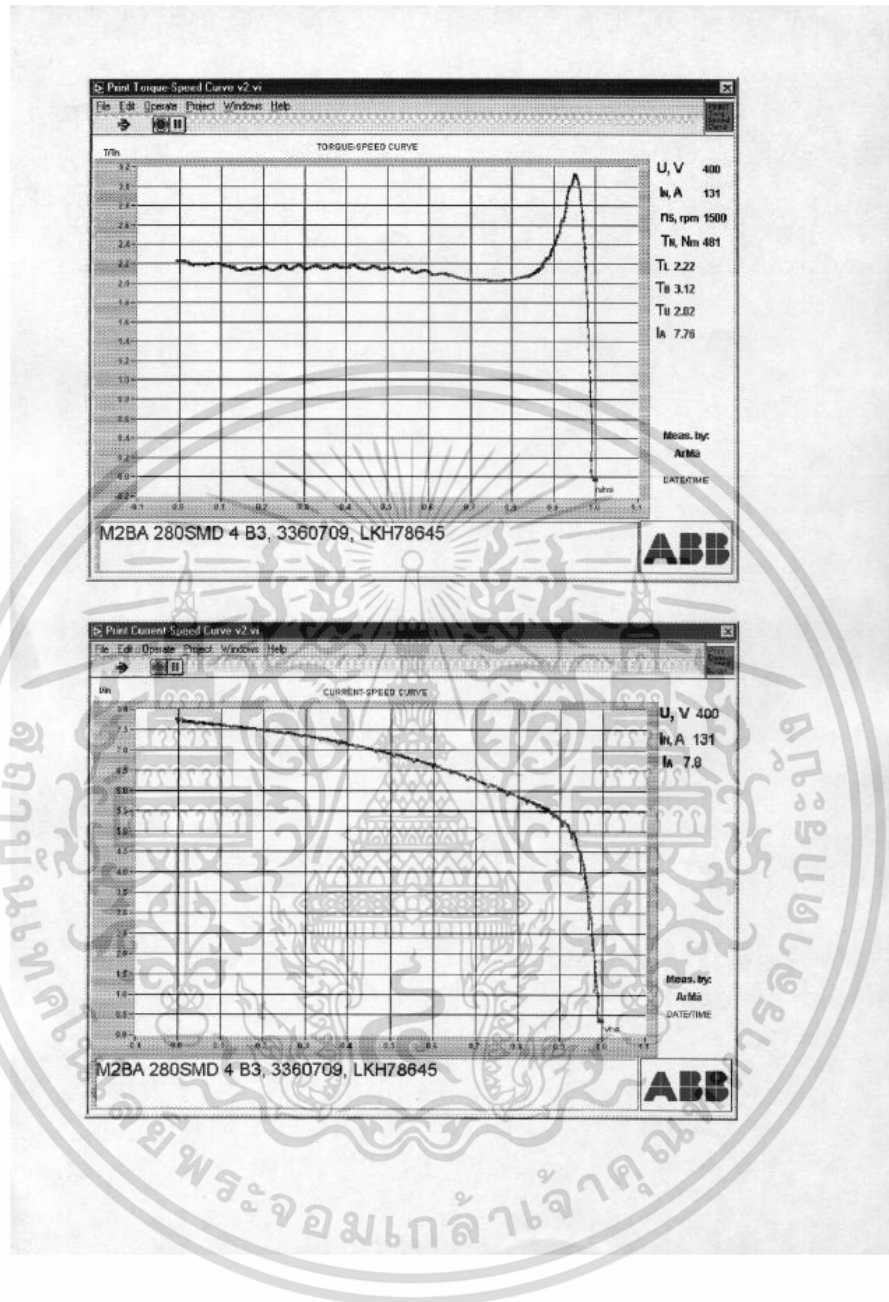
Test Report		Cert. No. M-file ref.:						
Customer:		Date of Issue 1998-07-07						
Customer ref.: IEA Hi-Motors Competition		Type: M2BA 280SMD 4 B3						
Rating: 3-Motor		Serial no.: 3360709						
Product Code 3GBA 282 240 - ADA0001		Order no.: GF-20510-3						
Insul. cl. F IP 55 990 kg		V	Hz					
		kW	r/min					
		A	cos φ					
		IA/IN	T _E [s]					
		690 Y	50 75 1488 76 0,86					
		400 D	50 75 1488 131 0,86					
Resistance		Insulation resistance						
U ₁ -V ₁ 0,02589 Ω 26 °C		> 20000 MΩ 1000 V						
U ₁ -W ₁ 0,02591 *		48,5 °C						
V ₁ -W ₁ 0,02591 *		High-voltage test						
		2400 V 60 s						
		Torque-Speed and starting characteristics						
		T _S = 2,22 x T _N						
		T _U = 2,02 x T _N						
		T _B = 3,12 x T _N						
		I _S = 7,8 x I _N						
Test	Line U[V]	f[Hz]	Input I[A]	P ₁ [kW]	Output *) P ₂ [kW]	n[r/min]	cos φ	η [%]
No-load test	400,1 D	50	46,0	1,262				
Locked-rotor test	66,2 D	50	131,0	4,150				
Nominal load	400,1 D	50	132,5	78,53	75,24	1489	0,86	95,8
Partial loads	5/4	400,0 D	50	162,8	98,12	93,59	1485	0,87
	3/4	400,1 D	50	103,8	59,07	56,63	1492	0,82
	2/4	400,0 D	50	77,8	39,68	37,88	1495	0,74
	1/4	400,1 D	50	56,8	20,51	19,05	1497,5	0,52
Nominal load	4/4	400,1 D	50	132,5	78,53	75,25	1489	0,86
Partial loads	5/4	400,0 D	50	162,8	98,12	93,67	1485	0,87
	3/4	400,1 D	50	103,8	59,07	56,68	1492	0,82
	2/4	400,0 D	50	77,8	39,68	37,91	1495	0,74
	1/4	400,1 D	50	56,8	20,51	19,11	1497,5	0,52
Temperature rise at amb. temp. 24,5 °C		Temperature rise at amb. temp. 24,5 °C		Measurement method				
Stator winding Pole [K] Method		Frame Pole [K] Method		1 Resistance				
48,0 1		Bearing D-end 29,0 3		2 Thermometer				
		37,0 3		3 Thermocouples				
*) According to IEC 34-2 direct method								
**) According to IEEE 112 method B								
Manufactured and tested in accordance with rules of IEC 34-1								
On behalf of customer								
On behalf of manufacturer Date of test 1998-07-03								
Tested by ABB Motors Oy/Vaasa								
Computer print-out valid without signature								

ABB Motors

ABB Motors Oy

P. O. Box 633
FIN-65101 Vaasa FinlandPhone: +358 10 22 4000
Fax: +358 10 22 47372

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABB Motors Oy / J Raitila / 1998-07-07

TECHNICAL SPECIFICATION

Ref: IEA HI-MOTORS COMPETITION

GENERAL

TYPE OF MOTOR:	M2BA 280SMD 4 TEFC 3-phase induction motor
FRAME SIZE:	IEC 280S/M
DUTY TYPE:	S1
INSULATION CLASS:	F
DEGREE OF PROTECTION:	IP55
WEIGHT:	990 kg
TYPE OF COOLING:	IC 411
TYPE OF CONSTRUCTION:	IM 1001 / B3

ELECTRICAL DATA

RATED OUTPUT P_n :	75 Kw
RATED VOLTAGE U_n :	690/400 V \pm 5%
RATED FREQUENCY f_n :	50 Hz
NO OF POLES:	4
NOMINAL SPEED N_n :	1488 r/min
NO OF PHASES:	3
ST. WINDING CONNECTION:	Y / D
STARTING METHOD:	DOL (direct on line)
NOMINAL CURRENT I_n :	76 / 131 A
STARTING CURRENT I_s/I_n :	7.6
NOMINAL TORQUE T_n :	48.1 Nm
STARTING TORQUE T_s/T_n :	2.2
PULL-UP TORQUE T_{min}/T_n :	2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABB Motors Oy / J Raitila / 1998-07-07

BREAKDOWN TORQUE T_{max}/T_n :	3.1		
EFFICIENCY AND POWER FACTOR	P2/P2n	η / %	cos ϕ
	5/4	95.5	0.86
	4/4	95.8	0.86
	3/4	95.8	0.82
	2/4	95.2	0.74
	1/4	92.6	0.53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายปุณยภัทร ภูมิภาค

วัน เดือน ปีเกิด 30 ตุลาคม 2516

ที่อยู่ 188/555 Airlink Condo ซ.ร่มเกล้า 52/1 ถ.ร่มเกล้า
แขวงคลองสามประเวศ เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

เบอร์โทรศัพท์มือถือ 081-311-3115

E-mail : kcthanaphiwat@yahoo.com

ประวัติการศึกษา

2535 - 2539 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2540 - 2543 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2540 - ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

งานวิจัยที่สนใจ

- 1.) เครื่องจักรไฟฟ้าและระบบขับเคลื่อน
- 2.) การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับวิศวกรรมไฟฟ้า
- 3.) พลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้