

การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้จีเนติกอัลกอริทึม

PREDICTION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTOR PERFORMANCES
USING GENETIC ALGORITHMS

สุนัน นองเหล็ก
SUNUN NONGLEK

ศึกษาวิจัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๔๗

ISBN 974-15-1188-4

การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้จีเนติกอัลกอริทึม

**PREDICTION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTOR PERFORMANCES
USING GENETIC ALGORITHMS**

สุนัน นองเหล็ก

SUNUN NONGLEK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2547

ISBN 974-15-1188-4

**PREDICTION OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR PERFORMANCES
USING GENETIC ALGORITHMS**

SUNUN NONGLEK

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

2004

ISBN 974-15-1188-4

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้ จีเนติกอัลกอริทึม
นักศึกษา	นายสุนัน หนองเหล็ก
รหัสนักศึกษา	42061199
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้จีเนติกอัลกอริทึมเพื่อหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างสะดวก และสามารถลดขั้นตอนการทดสอบที่ยุ่งยากตามมาตรฐาน ข้อมูลที่ใช้มีอยู่ 3 แนวทาง ได้แก่ แนวทางที่ 1 ใช้ข้อมูล 3 ชุดแต่ละชุดประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสอินพุท ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า กำลังเอาต์พุทและประสิทธิภาพจากแคทาล็อกของบริษัทผู้ผลิต แนวทางที่ 2 ใช้ข้อมูล 3 ชุดแต่ละชุดประกอบด้วยข้อมูลทางไฟฟ้า และทางกลคือ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุท ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบ ที่ได้จากการทดสอบจริง แนวทาง 3 ใช้ข้อมูล 1 ชุดประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสอินพุท ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า แรงบิดที่พิกัด และแรงบิดสูงสุด จากแคทาล็อกบริษัทผู้ผลิต ซึ่งสามารถนำไปใช้ประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยจีเนติกอัลกอริทึมแบบไบนารีโดยอ้างอิงจากวงจรสมมูลทางไฟฟ้า 2 แบบคือ แบบประมาณ และแบบสมบูรณ์ ผลที่ได้สามารถนำไปทำนายสมรรถนะต่าง ๆ เช่น กระแสอินพุท และ ประสิทธิภาพ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พิกัด 0.75 ถึง 37 กิโลวัตต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 เฮิร์ตซ์ ที่ภาระทางกลต่าง ๆ ได้โดยมีความผิดพลาดประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

Thesis Title	Prediction of Three-Phase Induction Motor Performances Using Genetic Algorithms
Student	Mr. Sunun Nonglek
Student ID.	42061199
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chaiwut Chat-uthai

ABSTRACT

This thesis presents a technique for predicting the performances of three-phase induction motor using genetic algorithms in order to conveniently evaluate induction motor performances without conducting the standard test procedure which is expensive. Three cases of the used data are proposed; case 1 consists of three sets of data (voltage, current, power factor, output power and efficiency) from the catalog data, case 2 consists of three sets of electrical and mechanical data (voltage, current, power factor and speed) from the field test and case 3 consists of a set of data (voltage, current, power factor, rated torque and maximum torque) from the catalog data. These data are then used in the evaluation process for estimating the motor parameters (six-impedance and approximate equivalent circuits) by using the genetic algorithms (binary). The results of various induction motors rating 0.75 up to 37 kW, 4-pole, 50 Hz are presented. Test results indicate that this proposed technique has an accuracy $\pm 5\%$, and then it could be suitable for predicting motor performances such as input current, efficiency at any mechanical load.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับวิธีการ
เชิงตัวเลขที่เหมาะสมร่วมกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจาก รศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุม
วิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ครู อาจารย์ และผู้สนับสนุน ทุก ๆ ท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความ
ช่วยเหลือกับผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณธนวิวัฒน์ ภูมิภาค ที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในด้านการใช้งานการ
ออกแบบที่เหมาะสมด้วยจินตนาการอันล้ำค่า ทำให้ผู้วิจัยเข้าใจและนำไปประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุทธิ คุณแม่บุญทัน หนองเหล็ก ซึ่งเป็นผู้อบรม
สั่งสอนและให้โอกาสทางการศึกษากับผู้วิจัยจนสำเร็จสมความตั้งใจ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุนัน หนองเหล็ก

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.1.6 การจำแนกมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Classification).....	17
บทที่ 3 หลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม.....	19
3.1 บทนำ.....	19
3.2 พื้นฐานการออกแบบที่เหมาะสม.....	19
3.2.1 การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ.....	20
3.2.2 หลักการออกแบบที่เหมาะสม.....	21
3.2.2.1 กำหนดเป้าหมายการออกแบบ.....	22
3.2.2.2 กำหนดรูปแบบของปัญหา.....	22
3.2.2.3 หลักการออกแบบและการสังเคราะห์.....	22
3.2.2.4 การหาค่าที่เหมาะสม.....	22
3.2.2.5 อภิปรายผลการออกแบบ.....	22
3.3 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม.....	22
3.3.1 จุดที่เหมาะสม (Optimal Point).....	24
3.3.2 การหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติก.....	24
3.4 จีเนติกอัลกอริทึม.....	25
3.4.1 ตัวดำเนินการทางจีเนติกอัลกอริทึม (Operator of genetic algorithms).....	26
3.4.1.1 การคัดเลือก (reproduction or selection).....	27
3.4.1.2 การสร้างโครโมโซมลูก (crossover).....	28
3.4.1.3 การกลายพันธุ์ (mutation).....	30
3.4.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม.....	30
3.4.1.4.1 จำนวนโครโมโซมทั้งหมด.....	30
3.4.1.4.2 ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูก.....	31
3.4.1.4.3 ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์.....	31
3.4.2 การทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม.....	32
3.5 ตัวอย่างการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชันโดยใช้จีเนติกอัลกอริทึม.....	33
3.5.1 ขั้นตอนที่ 1 การคัดเลือก.....	36
3.5.2 ขั้นตอนที่ 2 การสร้างโครโมโซมลูก.....	37
3.5.3 ขั้นตอนที่ 3 การกลายพันธุ์.....	37

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยหลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริธึม.....	39
4.1 บทนำ.....	39
4.2 การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	39
4.2.1 แนวทางที่ 1.....	41
4.2.2 แนวทางที่ 2.....	43
4.2.3 แนวทางที่ 3.....	46
บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	47
5.1 บทนำ.....	47
5.2 การทดสอบหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้แนวทางที่ 1.....	47
5.3 การทดสอบหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้แนวทางที่ 2.....	64
5.4 การทดสอบหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้แนวทางที่ 3.....	72
บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	85
6.1 สรุปการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ใช้ชุดข้อมูลแนวทางที่ 1 กับแนวทางที่ 3.....	85
6.2 สรุปเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ใช้ข้อมูลแนวทางที่ 2.....	90
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	90
เอกสารอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก ก. ชุดข้อมูลแคตาล็อกผู้ผลิตมิตซูบิชิ ค่าพารามิเตอร์และการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แนวทางที่ 1	92
ภาคผนวก ข. ชุดข้อมูลแคตาล็อกผู้ผลิตเทคโก ค่าพารามิเตอร์และการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แนวทางที่ 1	104
ภาคผนวก ค. การทดสอบขณะรับภาระทางกล ค่าพารามิเตอร์และการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแนวทางที่ 2.....	116
ค.1 การทดสอบหาคูณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะรับภาระทางกล.....	117

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง. ชุดข้อมูลแคลคูลัสผู้ผลิตซีเมนต์ ค่าพารามิเตอร์และการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาด การทำนายสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแนวทางที่ 3.....	128
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	146
ประวัติผู้เขียน.....	153

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตมิตซูบิชิ.....	42
4.2 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตเทคโก.....	42
4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะรับภาระทางกลพิกัดกำลัง 0.75 kW.....	43
4.4 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะรับภาระทางกลพิกัดกำลัง 5.5 kW.....	44
4.5 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 400 V, 4-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตซีเมนต์.....	46
5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 380 V, 15 kW 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลจากแคนทาลอกผู้ผลิตมิตซูบิชิโดยแนวทางที่ 1.....	56
5.4 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 380 V, 15 kW 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลจากแคนทาลอกผู้ผลิตเทคโกโดยแนวทางที่ 1.....	57
5.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 380 V, 7.5 kW 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลจากแคนทาลอกผู้ผลิตมิตซูบิชิโดยแนวทางที่ 1.....	58
5.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 380 V, 7.5 kW 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลจากแคนทาลอกผู้ผลิตเทคโกโดยแนวทางที่ 1.....	60
5.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 380 V, 37 kW 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลจากแคนทาลอกผู้ผลิตมิตซูบิชิโดยแนวทางที่ 1.....	61
5.8 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 380 V, 37 kW 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลจากแคนทาลอกผู้ผลิตเทคโกโดยแนวทางที่ 1.....	62
5.9 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 400 V, 15 kW 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลจากแคนทาลอกผู้ผลิตซีเมนต์โดยแนวทางที่ 3.....	62
5.10 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 400 V, 7.5kW 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลจากแคนทาลอกผู้ผลิตซีเมนต์โดยแนวทางที่ 3.....	80
5.11 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 400 V, 37kW 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลจากแคนทาลอกผู้ผลิตซีเมนต์โดยแนวทางที่ 3.....	81
5.12 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 380 V, 15kW 4-pole, 50 Hz. โดยแนวทางที่ 3.....	82
6.1 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ โดยแนวทางที่ 1 กับ แนวทางที่ 3.....	85
ก.1.1 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 2-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตมิตซูบิชิ.....	93
ก.1.2 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตมิตซูบิชิ.....	94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.1.3 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 6-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตมิซูบิชิ.....	94
ก.1.4 ค่าพารามิเตอร์จากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ 4 ขั้วแม่เหล็กใช้ชุดข้อมูลแคนทาลอกผู้ผลิตมิซูบิชิแนวทางที่ 1.....	96
ก.1.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะกระแสอินพุทของมอเตอร์ใช้ข้อมูลบริษัทแคนทาลอกผู้ผลิตมิซูบิชิแนวทางที่ 1.....	98
ก.1.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์ใช้ข้อมูลบริษัทแคนทาลอกผู้ผลิตมิซูบิชิแนวทางที่ 1.....	100
ก.1.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะประสิทธิภาพของมอเตอร์ใช้ข้อมูลบริษัทแคนทาลอกผู้ผลิตมิซูบิชิแนวทางที่ 1.....	102
ข.1.1 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 2-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตเทคโก.....	105
ข.1.2 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตเทคโก.....	106
ข.1.3 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 6-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตเทคโก.....	107
ข.1.4 ค่าพารามิเตอร์จากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ 4 ขั้วแม่เหล็กใช้ชุดข้อมูลแคนทาลอกผู้ผลิตเทคโกแนวทางที่ 1.....	108
ข.1.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะกระแสอินพุทของมอเตอร์ใช้ข้อมูลบริษัทแคนทาลอกผู้ผลิตเทคโกแนวทางที่ 1.....	110
ข.1.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์ใช้ข้อมูลบริษัทแคนทาลอกผู้ผลิตเทคโกแนวทางที่ 1.....	112
ข.1.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะประสิทธิภาพของมอเตอร์ใช้ข้อมูลบริษัทแคนทาลอกผู้ผลิตเทคโกแนวทางที่ 1.....	114
ค.1 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าขณะรับภาระทางกลขนาด 2.2 กิโลวัตต์.....	118
ค.2 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าขณะรับภาระทางกลขนาด 3.7 กิโลวัตต์.....	120
ค.3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบงานจริง.....	122
ค.4 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสมรรถนะของมอเตอร์โดยใช้ข้อมูลแนวทางที่ 2 (แบบสมบูรณ์).....	124
ค.5 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสมรรถนะของมอเตอร์โดยใช้ข้อมูลแนวทางที่ 2 (แบบประมาณ).....	125
ง.1.1 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 400 V, 2-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตซิเมนต์.....	129
ง.1.2 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 400 V, 4-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตซิเมนต์.....	129
ง.1.3 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 400 V, 6-pole, 50 Hz. แคนทาลอกผู้ผลิตซิเมนต์.....	130

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.1.4 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ใช้ชุดข้อมูลแคทาลอกซีเมนต์แนวทางที่ 3.....	131
ง.1.5 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ใช้ชุดข้อมูลแคทาลอกमितซูบิซิแนวทางที่ 3.....	132
ง.1.6 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ใช้ชุดข้อมูลแคทาลอกเทคโกแนวทางที่ 3.....	133
ง.2.1 ผลการเปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกระแสอินพุทของมอเตอร์ที่พิกัด 400 V, 4-ploe, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกซีเมนต์แนวทางที่ 3.....	134
ง.2.2 ผลการเปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์ที่พิกัด 400 V, 4-ploe, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกซีเมนต์แนวทางที่ 3.....	136
ง.2.3 ผลการเปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่พิกัด 400 V, 4-ploe, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกซีเมนต์แนวทางที่ 3.....	138
ง.3.1 ผลการเปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกระแสอินพุทของมอเตอร์ที่พิกัด 380 V, 4-ploe, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกमितซูบิซิแนวทางที่ 3.....	140
ง.3.2 ผลการเปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์ที่พิกัด 380 V, 4-ploe, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกमितซูบิซิแนวทางที่ 3.....	141
ง.3.3 ผลการเปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่พิกัด 380 V, 4-ploe, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกमितซูบิซิแนวทางที่ 3.....	142
ง.4.1 ผลการเปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกระแสอินพุทของมอเตอร์ที่พิกัด 380 V, 4-ploe, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกเทคโกแนวทางที่ 3.....	143
ง.4.2 ผลการเปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์ที่พิกัด 380 V, 4-ploe, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกเทคโกแนวทางที่ 3.....	144
ง.4.3 ผลการเปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่พิกัด 380 V, 4-ploe, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกเทคโกแนวทางที่ 3.....	145

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างพื้นฐานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	5
2.2 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	5
2.3 ขั้นตอนการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	7
2.4 วงจรสมมูลของวงจรสเตเตอร์ 1 เฟส.....	8
2.5 วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ slip frequency.....	10
2.6 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	10
2.7 วงจรสมมูลไฟฟ้าต่อเฟสแบบประมาณ.....	11
2.8 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบสมบูรณ์.....	12
2.9 บล็อกไดอะแกรมการส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	13
3.1 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม.....	20
3.2 การแก้ปัญหาโดยตรง.....	20
3.3 การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ.....	21
3.4 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม.....	21
3.5 คำตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$	23
3.6 กราฟค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x)$ บนโดเมน x	24
3.7 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิทอมินิสติก.....	25
3.8 การคัดโครโมโซมโดยเทคนิควงล้อลูกเหล็ก.....	27
3.9 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ one-point crossover.....	28
3.10 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ two-point crossover.....	29
3.11 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ uniform crossover.....	29
3.12 การกลายพันธุ์.....	30
3.13 กราฟสามมิติของฟังก์ชันเป้าหมาย.....	33
4.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	40
4.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าตามความหมายในทฤษฎีของ Thevinin.....	41
5.1 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบประมาณ โดยใช้แนวทางที่ 1 พิกัดกำลัง 15 kW, 4-pole, 50 Hz.....	48
5.2 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบสมบูรณ์โดยใช้แนวทางที่ 1 พิกัดกำลัง 15 kW, 4-pole, 50 Hz.....	48
5.3 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบสมบูรณ์ ($X_1 = X_2$) โดยใช้แนวทางที่ 1 พิกัดกำลัง 15 kW, 4-pole, 50 Hz.....	49
5.4 สมรรถนะกระแสอินพุทโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 15 kW, 4-pole, 50 Hz.....	50

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 สมรรถนะกำลังเอาต์พุทโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 15 kW, 4-pole, 50 Hz...	50
5.6 สมรรถนะประสิทธิภาพโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 15 kW, 4-pole, 50 Hz...	52
5.7 สมรรถนะกระแสอินพุทโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 7.5 kW, 4-pole, 50 Hz...	52
5.8 สมรรถนะกำลังเอาต์พุทโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 7.5 kW, 4-pole, 50 Hz...	53
5.9 สมรรถนะประสิทธิภาพโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 7.5 kW, 4-pole, 50 Hz...	53
5.10 สมรรถนะกระแสอินพุทโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 37 kW, 4-pole, 50 Hz...	54
5.11 สมรรถนะกำลังเอาต์พุทโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 37 kW, 4-pole, 50 Hz.....	55
5.12 สมรรถนะประสิทธิภาพโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 37 kW, 4-pole, 50 Hz...	55
5.13 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบประมาณ โดยใช้แนวทางที่ 2 ที่พิกัด 0.75 kW, 4-pole, 50 Hz.....	64
5.14 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบแบบสมบูรณ์โดยใช้แนวทางที่ 2 ที่พิกัด 0.75 kW, 4-pole, 50 Hz.....	65
5.15 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบประมาณ โดยใช้แนวทางที่ 2 ที่พิกัด 5.5 kW, 4-pole, 50 Hz.....	65
5.16 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบแบบสมบูรณ์โดยใช้แนวทางที่ 2 ที่พิกัด 5.5 kW, 4-pole, 50 Hz.....	66
5.17 เปรียบเทียบสมรรถนะกระแสอินพุทโดยใช้แนวทางที่ 2	66
5.18 เปรียบเทียบสมรรถนะตัวประกอบกำลังไฟฟ้าโดยใช้แนวทางที่ 2.....	67
5.19 เปรียบเทียบสมรรถนะกำลังเอาต์พุทโดยใช้แนวทางที่ 2	68
5.20 เปรียบเทียบสมรรถนะประสิทธิภาพใช้แนวทางที่ 2.....	68
5.21 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของกระแสอินพุทใช้แนวทางที่ 2.....	69
5.22 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใช้แนวทางที่ 2.....	70
5.23 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยของประสิทธิภาพใช้แนวทาง 2.....	71
5.24 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบสมบูรณ์โดยใช้แนวทางที่ 3 ที่พิกัด 15 kW, 4-pole, 50 Hz.....	73
5.25 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบสมบูรณ์กรณี ($X_1 = X_2$) โดยใช้แนวทางที่ 3 ที่พิกัด 15 kW, 4-pole, 50 Hz.....	73
5.26 การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ โดยใช้แนวทางที่ 3 พิกัด 15 kW, 4-pole, 50 Hz. แคลคูลอกซิเมนต์.....	74
5.27 การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ โดยใช้แนวทางที่ 3 พิกัด 7.5 kW, 4-pole, 50 Hz. แคลคูลอกซิเมนต์.....	75
5.28 การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ โดยใช้แนวทางที่ 3 พิกัด 37 kW, 4-pole, 50 Hz. แคลคูลอกซิเมนต์.....	76

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.29 เปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกระแสอินพุทโดยใช้แนวทางที่ 1 กับแนวทางที่ 3 ที่พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50Hz.....	77
5.30 เปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกำลังเอาต์พุทโดยใช้แนวทางที่ 1 กับแนวทางที่ 3 ที่พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50Hz.....	78
5.31 เปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกำลังเอาต์พุทโดยใช้แนวทางที่ 1 กับแนวทางที่ 3 ที่พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50Hz.....	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ตั้งแต่โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จนถึงอุตสาหกรรมขนาดเล็ก แม้แต่บ้านพักอาศัยก็มีใช้เช่นกันซึ่งอาจจะอยู่ในลักษณะเครื่องอำนวยความสะดวกทั้งจำเป็นและฟุ่มเฟือยในรูปแบบต่างๆกันมากมาย ตั้งแต่ขนาดเล็ก ๆ ไปจนถึงขนาดใหญ่ จุดเด่นของมอเตอร์ชนิดนี้คือให้ประสิทธิภาพสูง มีความสูญเสียจากความเสียดทานต่ำอายุการใช้งานนานโดยไม่ต้องบำรุงรักษามาก ราคาถูก น้ำหนักเบา มีขนาดเอาต์พุตหลายระดับให้เลือกใช้ตามประเภทของงาน ซึ่งในการเลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในโรงงานอุตสาหกรรมปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นในการจัดซื้อมอเตอร์โดยทั่วไปจะไม่พิจารณาต้นทุนจริงๆของการใช้พลังงานในระยะยาว ตัวอย่างเช่นผู้ที่รับผิดชอบในการสั่งซื้อมักจะมุ่งเน้นถึงเรื่องราคา โดยละเลยการพิจารณาถึงความเหมาะสมของสมรรถนะมอเตอร์เช่นประสิทธิภาพเมื่อนำไปใช้งานตามที่ต้องการนั่นคือให้ความสำคัญน้อยในด้านค่าใช้จ่ายจริงของการใช้พลังงานในระยะยาว

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้ข้อมูลจากแคทาล็อกบริษัทผู้ผลิต และข้อมูลจากการทดสอบงานจริง ข้อมูลมอเตอร์จากแคทาล็อกผู้ผลิตส่วนหนึ่งจะระบุค่าสมรรถนะมอเตอร์ที่ 50%, 75% และ 100% ของค่าพิกัดมอเตอร์และอีกส่วนหนึ่งจะระบุเพียงค่าที่ 100% ของค่าพิกัดมอเตอร์แต่การนำไปใช้งานจริงมอเตอร์นี้อาจจะทำงานอยู่ที่ 65%, 85% ของพิกัดมอเตอร์ได้ซึ่งไม่มีในข้อมูลประกอบในการพิจารณาทำให้เกิดการประเมินค่าใช้จ่ายของพลังงานคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ในส่วนของข้อมูลจากการทดสอบใช้งานจริง ซึ่งใช้ข้อมูลขณะทดสอบงานจริงที่ภาระโหลดทางกลใด ๆ โดยไม่ต้องทดสอบแบบไม่มีโหลด (no-load) การทดสอบจับยึดโรเตอร์ (block-rotor) และการทดสอบตามมาตรฐาน [1] ซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก ข้อมูลที่พิจารณานำไปประมวลผลด้วยหลักการเชิงตัวเลขที่เหมาะสมโดยวิธีจินตคณิตอัลกอริทึมแบบไบนารี (binary) ซึ่งการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์จะใช้หลักการวงจรสมมูลไฟฟ้า (equivalent circuits) ค่าพารามิเตอร์ที่ได้อ้างอิงจากวงจรสมมูลไฟฟ้าคือแบบสมบรูณ์ (six-impedance) และแบบประมาณ (approximate) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการคำนวณ วิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากแคทาล็อกผู้ผลิตและจากการทดสอบงานจริงเพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาเปรียบเทียบเลือกใช้มอเตอร์ของบริษัทต่าง ๆ และช่วยตรวจสอบพฤติกรรมของมอเตอร์ขณะใช้งานได้อย่างสะดวกในการวางแผนการประหยัดพลังงานในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้หลักการเชิงตัวเลขที่เหมาะสม (numerical optimization) ซึ่งใช้วิธีจีเนติกอัลกอริทึมแบบไบนารี (binary) โดยอ้างอิงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสองแบบ คือแบบสมบูรณ์และแบบประมาณ ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วยข้อมูล 3 แนวทางคือ

แนวทางที่ 1 ข้อมูล 3 ชุดที่ภาระทางกล 50%, 75% และ 100% ข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วยค่า แรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า กำลังเอาต์พุต และประสิทธิภาพจากแคทาล็อกผู้ผลิตต่าง ๆ

แนวทางที่ 2 ข้อมูล 3 ชุดที่ภาระทางกลใด ๆ ข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วยค่า แรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์จากการทดสอบงานจริง

แนวทางที่ 3 ข้อมูล 2 ชุดโดยจุดที่ 1 ที่ภาระทางกล 100% ประกอบด้วยค่าแรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและแรงบิดพิคก (full load torque) จุดที่ 2 ที่แรงบิดสูงสุด (maximum torque) จากแคทาล็อกผู้ผลิตต่าง ๆ

วิทยานิพนธ์นี้นำข้อมูลที่ได้ทั้ง 3 แนวทางนำไปประมวลผลด้วยหลักการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีจีเนติกอัลกอริทึมซึ่งอ้างอิงจากวงจรสมมูลแบบประมาณและแบบสมบูรณ์จะทำให้ได้สมรรถนะต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เช่น ค่ากระแสไฟฟ้าอินพุต กำลังเอาต์พุตและประสิทธิภาพ ที่ภาระทางกลต่าง ๆ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยทำการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จากการทดสอบแบบไม่มีโหลด (no-load) การทดสอบแบบจับยึดโรเตอร์ (block-rotor) และทดสอบตามมาตรฐาน ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนเนื่องจากการทดสอบตามมาตรฐาน ต้องมีการทดสอบหาความสูญเสียจากแรงลมและแรงเสียดทานและทำการปลดโหลดออกขณะทดสอบ วิทยานิพนธ์นี้เสนอแนวทางใหม่ในการทำนายสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้หลักการเชิงตัวเลขที่เหมาะสมด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึมซึ่งอ้างอิงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสองแบบคือ แบบสมบูรณ์และแบบประมาณ ข้อมูลที่ใช้คือ แนวทางที่ 1 ใช้ข้อมูล 3 ชุด ข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วยค่า แรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า กำลังเอาต์พุตและประสิทธิภาพ จากแคทาล็อกผู้ผลิตต่าง ๆ แนวทางที่ 2 ใช้ข้อมูล 3 ชุด ข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วยค่าแรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบจากการทดสอบงานจริง แนวทางที่ 3 ข้อมูล 1 ชุด ข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วยค่าแรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า แรงบิดพิคกและ แรงบิดสูงสุด จากแคทาล็อกผู้ผลิต ซึ่งข้อมูลที่ใช้นี้จะนำมาประมวลผลด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึมเพื่อทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้หลักการคำนวณเชิงตัวเลขที่เหมาะสมแบบสโตกาสติก (stochastic) ด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม ซึ่งเป็นวิธีการที่อาศัยพื้นฐานทางความน่าจะเป็น โดยใช้หลักการดำเนินงานทางพันธุศาสตร์ทำการพัฒนาข้อมูลในแต่ละรุ่นด้วยการผลิตประชากรในรุ่นต่อ ๆ ไป (reproduction) ครอสโอเวอร์ (crossover) และมิวเตชัน (mutation) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมตามความต้องการ วิทยานิพนธ์นี้เป็นการทำนายสมรรถนะมอเตอร์ ซึ่งอาศัยข้อมูลจากแคทาล็อกผู้ผลิตของบริษัทต่าง ๆ และข้อมูลจากการทดสอบงานจริง โดยการหาค่าพารามิเตอร์อ้างอิงวงจรมูลทางไฟฟ้า 2 แบบคือแบบประมาณและแบบสมบูรณ์ โดยทำการประมาณผลด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้นำไปคำนวณหาค่าสมรรถนะต่าง ๆ ของมอเตอร์ที่ภาระทางกล ทำการเปรียบเทียบผลคำนวณการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์โดยวิธีจีเนติกอัลกอริทึมกับชุดข้อมูลที่ได้จากแคทาล็อกผู้ผลิตต่าง ๆ และจากการทดสอบงานจริง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีเป้าหมายเพื่อทำนายสมรรถนะต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้จีเนติกอัลกอริทึมโดยการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรมูลทางไฟฟ้าซึ่งอ้างอิงแบบสมบูรณ์และแบบประมาณ และสามารถนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณสมรรถนะ กระแสอินพุท ความสูญเสียกำลังเอาต์พุท กำลังไฟฟ้าอินพุท แรงบิดและประสิทธิภาพ โดยใช้

แนวทางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ 3 ชุดแต่ละชุดประกอบด้วยค่า แรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุท ตัวประกอบกำลัง กำลังเอาต์พุท และประสิทธิภาพจากแคทาล็อกผู้ผลิตที่พิกัดกำลังตั้งแต่ 0.75 ถึง 37 กิโลวัตต์ จำนวน 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz.

แนวทางที่ 2 ข้อมูลที่ใช้ 3 ชุด ข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วยค่า แรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุท ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบจากการทดสอบงานจริงที่พิกัดกำลัง 0.75, 2.2, 3.7 และ 5.5 กิโลวัตต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz.

แนวทางที่ 3 ข้อมูลที่ใช้ 2 ชุด โดยที่จุด 1 ประกอบด้วยค่าแรงดัน กระแสอินพุท ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและแรงบิดที่พิกัด จุดที่ 2 ที่แรงบิดสูงสุดจากแคทาล็อกผู้ผลิตที่พิกัดกำลัง 0.75 ถึง 37 กิโลวัตต์ จำนวน 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz.

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยโดยมีการกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่างๆ เป็นลำดับดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการทำนายสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการเชิงตัวเลขที่เหมาะสม โดยใช้วิธีจินติกอัลกอริธึม

บทที่ 4 กล่าวถึงการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้วิธีจินติกอัลกอริธึมซึ่ง
ใช้ข้อมูลจาก 3 แนวทาง

บทที่ 5 กล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยพิจารณา
ถึงค่าความผิดพลาดและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ภาระทางกลต่าง ๆ เช่น
กระแสไฟฟ้าอินพุท กำลังเอาต์พุท และประสิทธิภาพ

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะเพื่อนำไปใช้ประยุกต์ในการดำเนินงานวิจัยใน
อนาคต

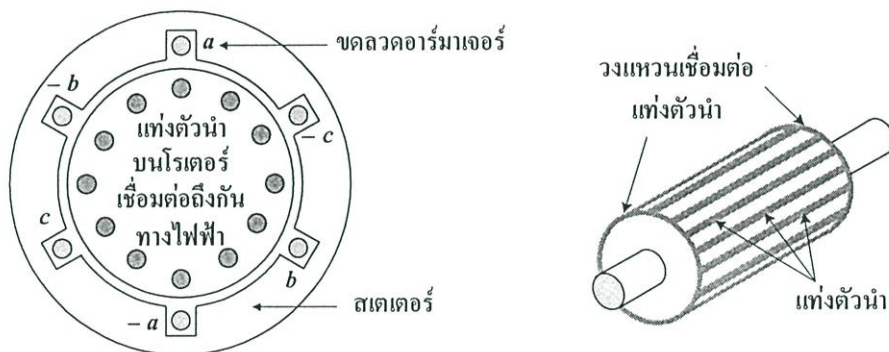
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส [2]

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยอาศัยหลักการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบ 2 ขั้วแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของสเตเตอร์จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสคือ ประกอบด้วยขดลวดอาร์มาเจอร์แบบสามเฟส (a, b, c) ที่โรเตอร์จะมีแท่งตัวนำวางอยู่ในแนวตามความยาวของโรเตอร์ และแท่งตัวนำเหล่านี้จะมีการเชื่อมต่อถึงกันทางไฟฟ้าโดยการลัดวงจรปลายทั้งสองข้างดังรูปที่ 2.1 โรเตอร์ลักษณะนี้เรียกชื่อว่าโรเตอร์แบบกรงกระรอก (squirrel-cage rotor)

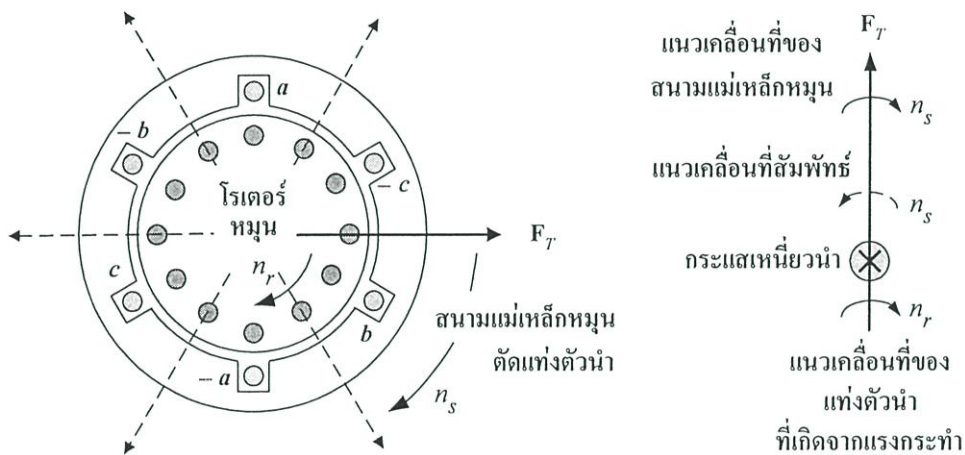


รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

2.1.2 หลักการสนามแม่เหล็กหมุนและการทำงานของมอเตอร์

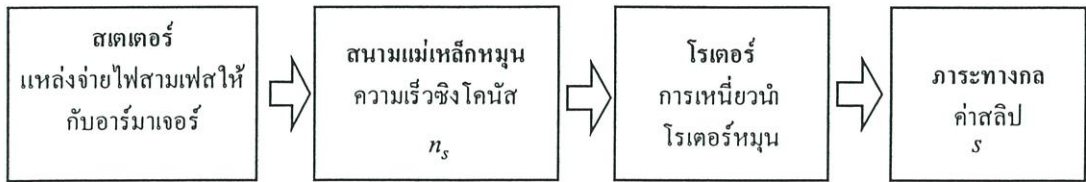
จากรูปที่ 2.2 ก) เมื่อขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสได้รับค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กลัพธ์ F_T ขึ้นมา ซึ่งจะมีลักษณะเคลื่อนที่หมุนไปรอบๆ ช่องอากาศที่ความเร็วซิงโครนัส n_s โดยความเร็วนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและจำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้า และสามารถกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กที่หมุนได้โดยการสลับลำดับเฟสของสัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟสคู่ใดคู่หนึ่ง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแท่งตัวนำต่างๆ ที่วางอยู่บนตัวโรเตอร์จะเกิดสภาพของการตัดกับสนามแม่เหล็กหมุนนี้โดยจะต้องพิจารณาแนวการตัดสนามแม่เหล็กของแท่งตัวนำในลักษณะเคลื่อนที่สัมพันธ์ดังรูปที่ 2.2 ข) แท่งตัวนำจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาซึ่งทำให้เกิดค่ากระแสเหนี่ยวนำในแท่งตัวนำในทิศทางพุ่งเข้าเนื่องจากแท่งตัวนำมีการเชื่อมต่อถึงกันทางไฟฟ้า ค่ากระแสเหนี่ยวนำที่

เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น ค่ากระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้เกิดแรงทางกลกระทำกับแท่งตัวนำต่างๆ ในทิศทางที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปในแนวเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วโรเตอร์ n_r จะเห็นได้ว่าความเร็วโรเตอร์จะไม่สามารถมีขนาดเท่ากับความเร็วซิงโครนัสทั้งนี้เนื่องจากถ้าความเร็ว $n_r = n_s$ แท่งตัวนำจะมีสภาพหยุดนิ่งอยู่กับที่เมื่อเปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กหมุนจะทำให้ไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพราะไม่มีการตัดกับสนามแม่เหล็ก และไม่สามารถเกิดแรงทางกลกระทำกับแท่งตัวนำ ขั้นตอนการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นหลักการพื้นฐานดังกล่าวเครื่องจักรไฟฟ้านี้จึงเรียกชื่อว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

พิจารณการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะเริ่มหมุน (โรเตอร์อยู่กับที่ $n_r = 0$) แท่งตัวนำจะตัดกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส n_s และเมื่อโรเตอร์เกิดการหมุนด้วยความเร็ว n_r แท่งตัวนำจะตัดกับสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว $n_s - n_r$ จะเห็นได้ว่าในขณะที่เริ่มหมุนโรเตอร์จะเหนี่ยวนำมากที่สุด และต่อจากนั้นการเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับความเร็วโรเตอร์ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามภาระทางกล เช่นเมื่อมีภาระทางกลน้อยๆ หรือสภาพไม่มีภาระทางกล (no-load) ความเร็วโรเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัสโรเตอร์จะเกิดค่ากระแสเหนี่ยวนำเล็กน้อยเนื่องจากต้องการภาระทางกลเพียงเล็กน้อย (ค่าแรงเสียดทานทางกลของโรเตอร์) และเมื่อภาระทางกลเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร็วโรเตอร์ลดลงมีผลทำให้โรเตอร์เกิดการเหนี่ยวนำที่มากขึ้นและจะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำและแรงทางกลมากขึ้นได้ตามความต้องการของภาระทางกล การเพิ่มขึ้นของกระแสเหนี่ยวนำในลักษณะนี้เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำมีความต้องการกำลังไฟฟ้า (กระแสไฟฟ้า) ที่เพิ่มขึ้นจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกตามความต้องการของภาระทางกลที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1.3 ความเร็วสลิปและความเร็วโรเตอร์ (Slip speed and Rotor speed)

ดังนั้นจากที่ความเร็วโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตามภาระทางกลในการอธิบายการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสามารถแสดงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่าความเร็ว ซึ่งเรียกว่าสลิป s (slip) ดังนี้

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.1)$$

เมื่อ s เป็นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีหน่วย n_s เป็นความเร็วซิงโครนัสมีหน่วยเป็น rpm และ n_r เป็นความเร็วของโรเตอร์ (rotor speed) มีหน่วยเป็น rpm ซึ่งแสดงในรูปสมการ

$$n_r = (1 - s)n_s \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.1 ในขณะที่เริ่มหมุนค่าสลิปจะเท่ากับ 1 และในขณะที่ไม่มีภาระทางกลค่าสลิปจะมีค่าน้อยมาก (เข้าใกล้ศูนย์) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าเป็นบวกอยู่ระหว่างค่า 0 ถึง 1 และค่าสลิปจะไม่มีค่าเป็นศูนย์

2.1.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Equivalent Circuit) [3]

ในที่นี้ พิจารณาเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีสเตเตอร์มีขดลวดสามเฟสที่สมมาตรและต่ออยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสที่สมดุล โดยที่มอเตอร์เหนี่ยวนำอยู่ในช่วงสภาวะคงที่ (steady-state) เพื่อความง่ายจะพิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งขดลวดสามเฟสถูกต่ออยู่ในลักษณะสตาร์ (Y) โดยที่กระแสและแรงดันที่จะพิจารณาเป็นปริมาณในหนึ่งเฟส (จากสามเฟส, Y) เมื่อต่อแรงดันไฟฟ้าเข้าขดลวดบนสเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนผ่านขดลวดและเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดแต่ละเฟสของสเตเตอร์ซึ่ง

$$V_1 = E_1 + I_1(R_1 + jX_1) \quad (2.3)$$

โดยที่ V_1 : แรงดันอินพุทที่วงจรสเตเตอร์

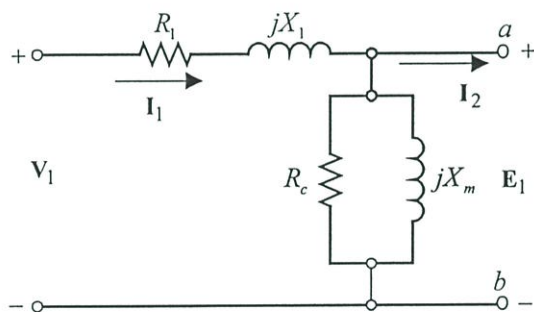
E_1 : แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ เกิดขึ้นเนื่องจากฟลักซ์ในช่องอากาศ

I_1 : กระแสในขดลวดบนสเตเตอร์

R_1 : ความต้านทานของขดลวดบนสเตเตอร์

X_1 : ลีคเกอริแอกแตนซ์ (leakage reactance) ของขดลวดบนสเตเตอร์

สมการที่ (2.3) แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันในขดลวดหนึ่งเฟสบนสเตเตอร์และเป็นปริมาณทางเฟส (phase quantities) ฟลักซ์ลัพท์ในช่องอากาศเป็นผลมาจาก mmf ซึ่งเกิดจากกระแสในวงจรสเตเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (เช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า) คือกระแสโหลด (load component, I_2) และกระแสกระตุ้น (exciting component, I_ϕ) กระแสโหลด I_2 ทำให้เกิด mmf ซึ่งหักล้างพอดีกับ mmf ที่เกิดจากกระแสในวงจรโรเตอร์ กระแสกระตุ้น I_ϕ เป็นกระแสที่ทำให้เกิดฟลักซ์ในช่องอากาศ และเป็นฟังก์ชันกับ emf (E_1) กระแสกระตุ้น I_ϕ สามารถถูกแยกออกได้เป็น 2 ส่วนคือ core loss current, I_c ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับ E_1 และ magnetizing current, I_m ซึ่งมีเฟสล้าหลังกับ E_1 เป็นมุม 90° ในวงจรสมมูล กระแสกระตุ้น I_ϕ สามารถถูกแสดงไว้ในวงจรขนาน ที่ประกอบด้วย core loss resistance, R_c และ magnetizing reactance, X_m ดังในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของวงจรสเตเตอร์ 1 เฟส

ปริมาณ R_c และ X_m ตามปกติถูกคำนวณที่ความถี่พิกัดของวงจรสเตเตอร์ และ E_1 ที่ใกล้เคียงกับค่าในขณะที่ยังไม่ทำงานในเงื่อนไขปกติ ดังนั้น R_c และ X_m จึงถูกสมมุติให้มีค่าเดิม (คงที่) ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานในเงื่อนไขที่ผิดเล็กน้อยไปจากปกติ การเปลี่ยนแปลงของคลื่น mmf ที่เกิดจากโรเตอร์จะมีผลทำให้กระแสโหลด I_2 ในวงจรสเตเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงทั้งสองปริมาณนี้ เกิดขึ้นได้โดยผ่านตัวกลางคือ ฟลักซ์ในช่องอากาศนั่นคือ ถ้ามีสิ่งนี้ (เช่น โรเตอร์สมมูล) ถูกใส่ลงไป ในมอเตอร์เหนี่ยวนำแทนที่โรเตอร์ (จริง) โดยสิ่งนั้นมี mmf, power factor และความเร็วการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับสิ่งที่เกิดขึ้นในวงจรสเตเตอร์ก็จะไม่ทำให้เกิดผลใด ๆ ต่อวงจรสเตเตอร์ ซึ่งการแทนที่โรเตอร์โดยสิ่งดังกล่าวนี้เป็นแนวคิดไปสู่การโอนย้าย (transfer) ปริมาณซึ่งอยู่บนโรเตอร์ไปไว้ที่สเตเตอร์และในที่สุดคือ การใช้วงจรสมมูลเพื่อแสดงมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะคงที่ (steady state) เมื่อพิจารณาขดลวดบนโรเตอร์ซึ่งถูกพันให้เกิดจำนวนขั้วและเฟสเท่ากับบนสเตเตอร์ โดยที่ขดลวดบนสเตเตอร์มีจำนวนรอบประสิทธิผลเป็น a เท่าของขดลวดบนโรเตอร์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลทางแม่เหล็กของโรเตอร์ (จริง) เทียบกับโรเตอร์สมมูลซึ่งจำนวนรอบเท่ากับขดลวดบนสเตเตอร์ โดยที่มีฟลักซ์และความเร็วรอบ

เท่ากันจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำ E_{rotor} ที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ (จริง) กับที่เกิดขึ้นในโรเตอร์สมมูล, E_{2s} คือ

$$E_{2s} = a E_{rotor} \quad (2.4)$$

ถ้าโรเตอร์ (จริง) กับโรเตอร์สมมูลมีความเท่ากันทางแม่เหล็กก็แสดงให้เห็นว่าโรเตอร์ทั้งสองมีปริมาณ Amp-turns เท่ากัน และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในโรเตอร์ (จริง) I_{rotor} กับในโรเตอร์สมมูลจะต้องเป็น

$$I_{2s} = \frac{I_{rotor}}{a} \quad (2.5)$$

ผลที่ตามมาคือ ความสัมพันธ์ระหว่างลิกเกจิมพีแดนซ์ (leakage impedance) ที่ slip-frequency, Z_{2s} ของโรเตอร์สมมูลกับของโรเตอร์จริง Z_{rotor} จะต้องเป็น

$$Z_{2s} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{a^2 E_{rotor}}{I_{rotor}} = a^2 Z_{rotor} \quad (2.6)$$

แรงดันกระแสและอิมพีแดนซ์ในโรเตอร์สมมูลถูกกำหนดมาจากปริมาณที่เทียบกับสเตเตอร์ดังนั้นแนวความคิดที่อธิบายผ่านมานั้น จึงเป็นเหมือนกับการโอนย้ายปริมาณทางด้านทุติยภูมิไปยังด้านปฐมภูมิ (ของหม้อแปลงไฟฟ้า) โดยมีอัตราส่วนจำนวนรอบประสิทธิผลเป็นแฟกเตอร์ (factor) ในการโอนย้ายเช่นเดียวกับที่ใช้ทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งแนวความคิดดังกล่าวใช้ได้กับทั้งแบบवाद (wound rotor) และแบบกรงกระรอก (squirrel-cage rotor) เนื่องจากโรเตอร์ถูกถ่วงจรรดงั้น

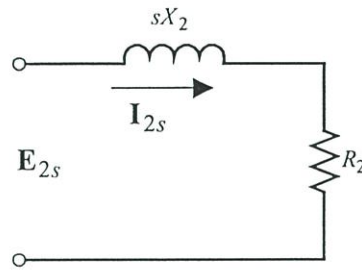
$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = Z_{2s} = R_2 + jsX_2 \quad (2.7)$$

โดยที่ Z_{2s} : ลิกเกจิมพีแดนซ์ (leakage impedance) ที่ slip frequency ของโรเตอร์ซึ่งโอนย้ายไปที่ สเตเตอร์ (referred to stator)

R_2 : ความต้านทานซึ่งโอนย้ายไปที่สเตเตอร์

sX_2 : ลิกเกจรีแอคแตนซ์ (leakage reactance) ที่ slip frequency ซึ่งโอนย้ายไปที่ สเตเตอร์

เนื่องจากรีแอคแตนซ์มีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ในวงจรโรเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับ slip ดังนั้นจึงถูกกำหนดให้อยู่ในรูป sX_2 ดังนั้น X_2 ก็คือลิกเกจรีแอคแตนซ์ (ของวงจรโรเตอร์) ซึ่งโอนย้ายไปที่ สเตเตอร์ที่ความถี่ของวงจรสเตเตอร์วงจรสมมูลที่ slip frequency สำหรับ 1 เฟสของโรเตอร์ซึ่งโอนย้ายไปที่สเตเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของ โรเตอร์ ที่ slip frequency

เนื่องจากความเร็วของคลื่นฟลักซ์ในช่องอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์มีค่าเป็น s เท่าเมื่อเทียบกับสเตเตอร์ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำประสิทธิภาพของโรเตอร์และสเตเตอร์คือ

$$I_{2s} = I_2 \quad (2.8)$$

จะได้

$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{sE_2}{I_2} \quad (2.9)$$

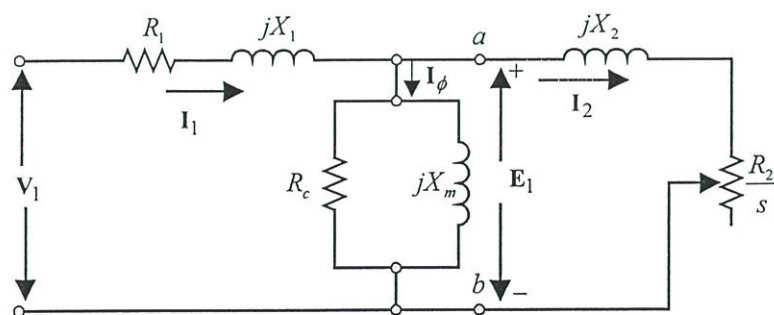
แทนสมการ (2.7) ลงใน (2.9)

$$\frac{sE_1}{I_2} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = R_2 + jsX_2 \quad (2.10)$$

หรือ

$$\frac{E_1}{I_2} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (2.11)$$

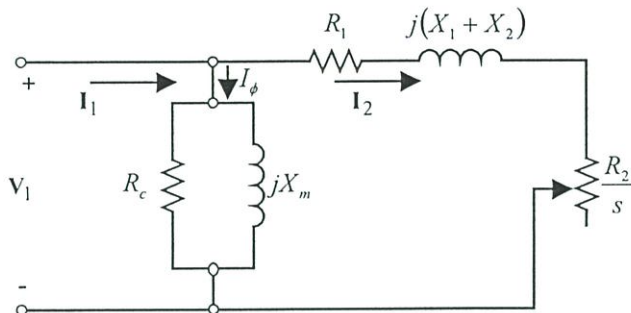
ซึ่งสมการ (2.11) แสดงค่าที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์โดยเป็นผลมาจากเงื่อนไขทางแม่เหล็กในช่องอากาศซึ่งทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ E_1 และกระแสไหล I_2 ซึ่งเงื่อนไขในลักษณะนี้เช่นเดียวกับการต่ออิมพีแดนซ์ $\frac{R_2}{s} + jX_2$ เข้ากับแรงดัน E_1 โดยเหตุนี้ผลจากโรเตอร์จึงรวมเข้าไว้ในวงจรสมมูลได้ ในที่สุดจะได้วงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1.4.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ (Approximate equivalent circuit)

เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรจะหาจากการทดสอบต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสแบบประมาณ (approximate equivalent circuit)

2.4.1.1.1 การทดสอบเมื่อไร้ภาระทางกล (No-load test)

โดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับขนาดพิกัดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำคือ 380 โวลต์โดยไม่มีภาระทางกล ขณะไม่มีภาระทางกลจะทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วรอบโรเตอร์ (n_r) ใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส (n_s) ค่าสลิปจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เปรียบเสมือนการเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า พลังงานที่ป้อนให้มอเตอร์เหนี่ยวนำจะสูญเสียในรูปการสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) การสูญเสียในขดลวด (stator) และการสูญเสียในรูปการหมุน (rotational loss) ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ คือ R_c และ X_m ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าต่อเฟส ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปคำนวณหาค่า R_c และ X_m ได้ตามสมการต่อไปนี้

จาก
$$P_o = V_o I_o \cos \phi_o \tag{2.12}$$

$$\phi_o = \cos^{-1} \frac{P_o}{V_o I_o} \tag{2.13}$$

$$R_c = \frac{V_o^2}{P_o} \tag{2.14}$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_o \sin \phi_o} \tag{2.15}$$

2.4.1.1.2 การทดสอบยึดโรเตอร์ (Block-rotor test)

โดยทำการยึดโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้อยู่กับที่ ขณะนี้ค่าสลิปมีค่าเท่ากับหนึ่ง เปรียบเสมือนการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำจน

กระทั่งถึงค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าและพิกัดความถี่ ในการทดสอบนี้กำหนดว่าค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก มีค่าน้อยมากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบคือ X_1, X_2 และ R_2 ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าต่อเฟส ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังสมการต่อไปนี้

จาก $P_b = V_b I_b \cos \phi_b$ (2.16)

$$\phi_b = \cos^{-1} \frac{P_b}{V_b I_b}$$
 (2.17)

$$Z_b = \frac{V_b \angle 0^\circ}{I_b \angle -\phi_b} = R_b + jX_b$$
 (2.18)

จะได้ $R_2 = R_b - R_1$ (2.19)

$$X_1 + X_2 = X_b$$
 (2.20)

โดยที่ค่าของความต้านทาน R_1 ได้จากการทดสอบ VI-Method

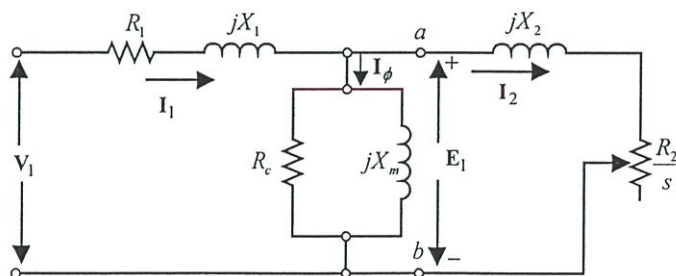
2.4.1.1.3 การทดสอบ VI-Method test

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์ขดใดขดหนึ่ง แล้วค่อยๆปรับแรงดันขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งถึงพิกัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อหาค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟและใช้ความชันหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (R_1)

$$R_1 = \frac{\Delta V_{dc}}{\Delta I_{dc}}$$
 (2.21)

2.1.4.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบสมบุรณ์ (six-impedance equivalent circuit)

วงจรสมมูลแบบนี้จะเป็นวงจรสมมูลที่ถูกต้องของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะมีวิธีการคิดที่ละเอียดกว่า ซึ่งในที่นี้จะคำนวณหาพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรจะหาจากการทดสอบต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบสมบุรณ์ (six-impedance equivalent circuit)

2.1.4.2.1 การทดสอบเมื่อไร้ภาระทางกล (No-load test)

วิธีการเหมือนข้อ 2.4.1.1.1 แต่ค่า R_c และ X_m จะได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน ซึ่งจะกล่าวต่อไปนี้

2.1.4.2.2 การทดสอบยึดโรเตอร์ (Block-rotor test) ที่ 25 % ของพิกัดความถี่

เป็นการทดสอบวิธีหนึ่งในการหาค่าอิมพีแดนซ์ตามมาตรฐาน ซึ่งทำการทดสอบยึดโรเตอร์ที่ 25% ของพิกัดความถี่มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ระบุในป้ายพิกัดมอเตอร์วิธีการนี้จะใช้เครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัสจ่ายความถี่ที่ 25% ของพิกัดความถี่ (ประมาณ 12.5 Hz) ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะยึดโรเตอร์ให้อยู่กับที่และควบคุมกระแสให้เท่ากับพิกัดของกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1.4.2.3 การทดสอบหาค่า Friction and windage losses

เป็นการทดสอบโดยจ่ายแรงดันที่สภาวะเฟสสมดุลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระโหลดจากระดับแรงดันไฟฟ้าน้อยๆ จนถึงพิกัดแรงดันมอเตอร์เหนี่ยวนำ การหาค่า friction and windage losses จะหาค่าที่แรงดันน้อยๆ เนื่องจากในขณะนี้ค่าของ core losses จะมีค่าน้อยมาก โดยนำค่าของกำลังไฟฟ้าอินพุตมาลบกับค่า stator copper losses แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง การทดสอบหาค่า friction and windage losses เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าของ core losses เพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน โดยที่ค่า friction and windage losses จะหาได้จากสมการที่ (2.22)

$$P_{fw} = P - (3I^2 R_1) \quad (2.22)$$

การทดสอบ VI-method test

วิธีการเหมือนในหัวข้อ 2.4.1.1.3

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณตามมาตรฐาน จะมีวิธีการและขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าของ X_m จากสมการที่ (2.15) โดยสมมุติค่า X_1/X_m และ X_1 ขึ้นมาก่อน

$$\text{เมื่อ} \quad VAR_o = \sqrt{((mV_o I_o)^2 - P_o^2)} \quad (2.23)$$

$$\text{จะได้} \quad X_m = \frac{mV_o^2}{VAR_o - mI_o^2 X_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{X_1}{X_m}} \right)^2 \quad (2.24)$$

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าของ X_{1br} จากสมการที่ (2.18) โดยใช้ค่าของ X_1/X_m จากขั้นตอนที่ 1

$$\text{เมื่อ} \quad VAR_{br} = \sqrt{\left((mV_{br}I_{br})^2 - P_{br}^2 \right)} \quad (2.25)$$

$$\text{จะได้} \quad X_{1br} = \frac{VAR_{br}}{mI_{br}^2 \left(1 + \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right)} \left(\frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right) \quad (2.26)$$

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าของ X_1 จากสมการที่ (2.27)

$$X_1 = \frac{f}{f_{br}} X_{1br} \quad (2.27)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าของ X_m จากสมการที่ (2.24) โดยใช้ค่าของ X_1 จากขั้นตอนที่ 3 และอัตราส่วนของ X_1/X_m จากขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณไปจนไปจนกระทั่งค่าของ X_1 และ X_m ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือจนกระทั่งมีค่าความผิดพลาดประมาณ 0.1% หรือน้อยกว่า

ขั้นตอนที่ 6 นำค่าของ X_1 และ X_m ที่ได้ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ได้ดังต่อไปนี้

$$X_2 = \frac{X_1}{\left(\frac{X_1}{X_2} \right)} \quad (2.28)$$

$$P_{core} = P_o - P_{fw} - mI_o^2 R_1 \quad (2.29)$$

$$g_c = \frac{P_{core}}{mV_o^2} \left(1 + \frac{X_1}{X_m} \right)^2 \quad (2.30)$$

$$R_c = \frac{1}{g_c} \quad (2.31)$$

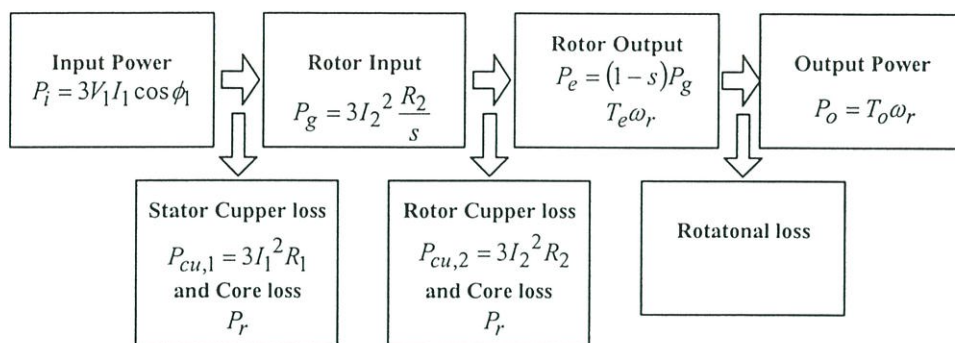
$$R_2 = \left(\frac{W_L}{mI_{br}^2} - R_1 \right) \left(1 + \frac{X_2}{X_m} \right)^2 - \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^2 (X_{1br} g_c) \quad (2.32)$$

2.1.5 การสูญเสียและไดอะแกรมการส่งผ่านกำลังงาน

การเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเกิดขึ้นที่โรเตอร์กำลังไฟฟ้าอินพุทไม่ได้เกิดจากการป้อนไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่เป็นการถ่ายทอดผ่านทางช่องอากาศด้วยการเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดเคลื่อนไฟฟ้า และความถี่ขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์

เหนี่ยวนำ จะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานชนิดอื่นๆ กระจายอยู่ตามส่วนต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้แก่ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังงานกลที่ขับ โหลด

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ และกำลังงานกลที่มอเตอร์เหนี่ยวนำจ่ายแก่โหลด แสดงได้ด้วยบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมการส่งผ่านกำลังงาน ไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากบล็อกไดอะแกรมกำลังงาน ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปแรงดันและกระแสไฟฟ้าอินพุท (input power) เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ (stator copper loss) และการสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) ในรูปของความร้อน โดยที่กำลังส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านช่องอากาศให้กับโรเตอร์เรียกว่ากำลังงานในช่องอากาศ (power across air gap) เมื่อถ่ายเทกำลังงานให้กับโรเตอร์ส่วนหนึ่งจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (rotor copper loss) ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังงานที่ส่งออกจากโรเตอร์ (electromagnetic power) ซึ่งเป็นกำลังงานทางกล เมื่อเปลี่ยนเป็นกำลังงานกลแล้ว จะเกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุน (friction and windage loss) จากนั้นกำลังงานที่เหลือจะเป็นกำลังงานทางกลไปขับโหลด (output power)

การสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) เกิดขึ้นได้ที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัส การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวของโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุนมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ ด้วยเหตุนี้การสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงรวมไว้ด้วยกันในส่วนสเตเตอร์เท่านั้น

ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมมากขึ้น แต่จะทำให้การสูญเสียในแกนเหล็กลดลง จึงรวมการสูญเสียเหล่านี้ไว้ด้วยกันเรียกว่า rotational loss and core loss และจะพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับการหมุนรอบที่เปลี่ยนแปลง

กำลังไฟฟ้าอินพุทที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (input power) แสดงดังสมการที่ (2.38)

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (2.38)$$

กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดสเตเตอร์ (stator copper loss) แสดงดังสมการ

$$P_{cu,1} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.39)$$

กำลังในช่องอากาศ (power across air-gap) แสดงดังสมการ

$$P_g = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.40)$$

กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดโรเตอร์ (rotor copper loss) แสดงดังสมการ

$$P_{cu,2} = 3I_2^2 R_2 = sP_g = P_g - P_e \quad (2.41)$$

กำลังที่ออกจาก โรเตอร์ (electromagnetic power) แสดงดังสมการ

$$P_e = P_g - P_{cu,2} = (1-s)P_g \quad (2.42)$$

แรงบิดที่ได้จากการเหนี่ยวนำในโรเตอร์ (electromagnetic torque) แสดงดังสมการ

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2.43)$$

กำลังที่ไปขับโหลด (output power) แสดงดังสมการที่

$$P_{out} = P_e - P_r = T_o \omega_r \quad (2.44)$$

แรงบิดทางกล (output torque) แสดงดังสมการ

$$T_o = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad (2.45)$$

เมื่อ

$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{4\pi f}{p} \quad (2.46)$$

$$\omega_r = \frac{2\pi N_r}{60} = (1-s)\omega_s \quad (2.47)$$

โดยที่

ω_s : ความเร็วซิงโครนัสเชิงมุม (rad/sec)

ω_r : ความเร็วโรเตอร์เชิงมุม (rad/sec)

กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ในสมการที่ (2.39) กำลังที่สูญเสียจากความต้านทานขดลวดโรเตอร์ในสมการที่ (2.41) และกำลังสูญเสียในส่วน of rotational and core loss เมื่อกำลังสูญเสียทั้งสามส่วนรวมกันจะเป็นกำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ (power loss)

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \quad (2.48)$$

ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ (η) นิยมคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.49)$$

หรือ

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100 \quad (2.50)$$

2.1.6 การจำแนกมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Classification)

มอเตอร์เหนี่ยวนำ ถูกออกแบบตามมาตรฐาน class ต่างๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติในการสแตร์ทและทำงานปกติที่ดีตามลักษณะการใช้งานต่างๆ ได้แบ่งการออกแบบได้ดังนี้

Design class A: มีแรงบิดขณะสแตร์ทปกติ ขนาดกระแสสแตร์ทปกติมีค่าสลลิปต่ำ ซึ่งการออกแบบใน class นี้ โรเตอร์จะเป็นแบบ single cage และมีความต้านทานต่ำมีคุณสมบัติขณะทำงานที่ดี ขณะโหลดพิกัดมีค่า slip ต่ำและประสิทธิภาพสูง แรงบิดสูงสุดประมาณ 200 เปอร์เซ็นต์ ของแรงบิดขณะโหลดพิกัด และเกิดขึ้นได้ในขณะที่ สลลิปน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ แรงบิดที่แรงดันพิกัดจะมีค่าอยู่ประมาณ 200 เปอร์เซ็นต์ (มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็ก) ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ (มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่) ของแรงบิดโหลดพิกัด มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้รับการออกแบบ class A มีข้อเสียคือ มีกระแสขณะสแตร์ทสูง (500- 800 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด)

Design class B: มีแรงบิดขณะสแตร์ทปกติ มีค่าสลลิปต่ำ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบใน class นี้ จะมีแรงบิดขณะสแตร์ทเช่นเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำใน class A โดยที่กระแสสแตร์ทมีค่าประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ (ของ class A) ดังนั้นจึงสามารถสแตร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ (เมื่อเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำใน class A) ด้วยแรงดันพิกัดได้จากการที่ออกแบบให้มีลิกเกจรีแอกแตนซ์สูงทำให้กระแสในขณะสแตร์ทต่ำ ในขณะที่โหลดพิกัดสลลิปต่ำและประสิทธิภาพดีเช่นเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำใน class A แต่เนื่องจาก ลิกเกจรีแอกแตนซ์สูง จึงทำให้ power factor ลดลงและแรงบิดสูงสุดต่ำ (อยู่ประมาณ 200 เปอร์เซ็นต์ ของแรงบิดขณะโหลดพิกัด)

Design class C: มีแรงบิดขณะสแตร์ทสูง, ขนาดกระแสขณะสแตร์ทต่ำ มอเตอร์เหนี่ยวนำออกแบบใน class นี้มีโรเตอร์ แบบ double-cage ค่าความต้านทานสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำที่

ออกแบบใน class B, ประสิทธิภาพขณะทำงานปกติต่ำกว่าและมีสลิปสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำใน class A, B.

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

บทที่ 3

หลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม

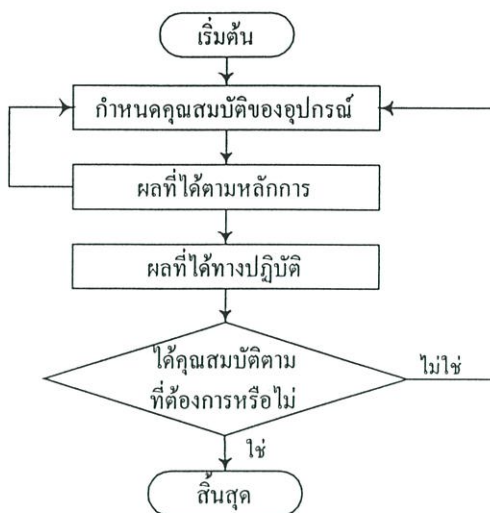
3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงวิธีการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาแบบวนกลับที่นำมาใช้ช่วยออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ในงานวิศวกรรม เพื่อให้ได้คำตอบตรงตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนด วิทยานิพนธ์นี้ได้นำแนวความคิดจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสม และหลักการออกแบบที่เหมาะสมซึ่งได้นำมาใช้ในการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยทั่วไปเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมมี 2 วิธีได้แก่ หลักการหาค่าที่เหมาะสมแบบดีเทอร์มิเนติก (deterministic) และแบบสโตชาสติก (stochastic) ซึ่งทั้งสองหลักการมีความเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาที่แตกต่างกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติกโดยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม

3.2 พื้นฐานการออกแบบที่เหมาะสม

การวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์มักจะเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ระบบ ณ ที่นี้หมายถึง สิ่งที่ต้องการทำการศึกษารหรืออาจจะกล่าวได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นจะถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของระบบที่ศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ของระบบ โดยที่เราไม่ต้องทำการศึกษากับระบบจริงโดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มาจากหลักการหรือกฎทางธรรมชาติที่นักวิทยาศาสตร์ได้สังเกตและทำการศึกษาทดลองมาแล้ว เป็นต้นว่าหลักการอนุรักษ์พลังงาน หลักการอนุรักษ์มวลสาร กฎของนิวตันที่ใช้อธิบายกลศาสตร์ของสสาร กฎของโอห์ม เป็นต้น

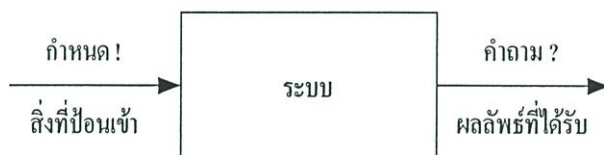
แนวความคิดโดยทั่วไปของการออกแบบทางด้านวิศวกรรมจะมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย การกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ต้องการออกแบบ (device specification) การพิจารณาผลที่ได้จากหลักการทางทฤษฎี (conceptual solution) การพิจารณาผลที่ได้ทางปฏิบัติ (practical solution) และการตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบแล้ว จะเห็นได้ว่าการออกแบบด้วยแนวความคิดนี้ผู้ออกแบบสามารถพิจารณาเปลี่ยนแปลงแก้ไขแนวทางการออกแบบได้ระหว่างการออกแบบจนทำให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ วิธีการออกแบบนี้จะเป็นการออกแบบโดยวิธีแก้ปัญหาโดยตรง ซึ่งวิธีการแก้ปัญหามี 2 ลักษณะคือ การแก้ปัญหาโดยตรง และการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม

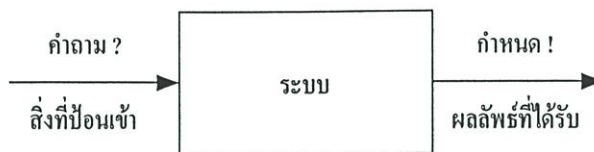
3.2.1 การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ

การแก้ปัญหาโดยตรง (direct problem solving) คือการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากระบบว่าจะเป็นอย่างใดเมื่อสิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.2 เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจจะสมมติว่าระบบในรูปที่ 3.2 คือ $z = x + y$ จะเห็นว่า สิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบคือ x และ y ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้รับจากระบบคือ z ถ้าเรากำหนดให้ $x = 10$ และ $y = 20$ เราสามารถคำนวณหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ได้รับจากระบบคือ $z = 30$



รูปที่ 3.2 การแก้ปัญหาโดยตรง

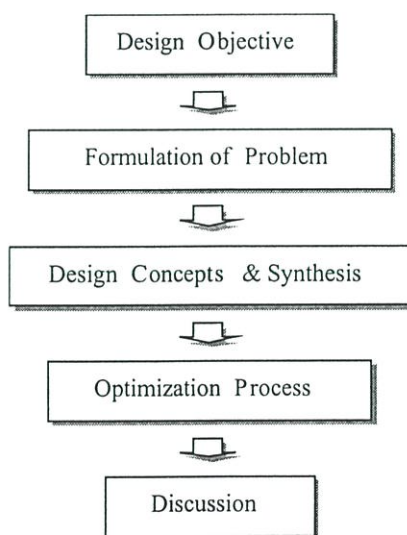
การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ (inverse problem solving) วิธีการแก้ปัญหาแบบนี้จะกำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการได้จากระบบ โดยคำถามคือจะต้องป้อนสิ่งใดเข้าสู่ระบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่กำหนด เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจให้พิจารณาจากรูปที่ 3.3 โดยสมมติอีกครั้งว่าถ้าระบบคือ $z = y + x$ ถ้าเรากำหนดให้ $z = 30$ เราจะมีคำถามว่า x และ y ควรจะเป็นอย่างไร ในกรณีนี้คำตอบที่เป็นไปได้มีมากกว่าหนึ่งคำตอบ ไม่ใช่เพียงคำตอบ $x = 10$ และ $y = 20$ เท่านั้น อาจจะเป็น $x = 15$ และ $y = 15$ ก็ได้ ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาลักษณะนี้อาจจะกำหนดเงื่อนไขของสิ่งที่ป้อนเข้าก็ได้เช่น $0 < x, y < 20$ แนวทางการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับนี้เป็นแนวของหลักการหาค่าที่เหมาะสม



รูปที่ 3.3 การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ

3.2.2 หลักการออกแบบที่เหมาะสม [4]

การออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ในงานวิศวกรรมจะมีการกำหนดเป้าหมายและเงื่อนไขขึ้นเพื่อให้ตรงกับความต้องการใช้งาน ซึ่งการออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนซึ่งจะทำให้การออกแบบด้วยแผนผังดังรูปที่ 3.1 จะเป็นไปได้ด้วยความยุ่งยากและจำเป็นต้องใช้ความรู้และประสบการณ์ของผู้ออกแบบอย่างสูง ผลลัพธ์อาจเกิดจากการลองผิดลองถูกจนกระทั่งได้ค่าที่มีความเหมาะสมตามเป้าหมายที่ต้องการซึ่งต้องเสียเวลาในการออกแบบอีกทั้งโอกาสที่จะได้ค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ก็มีความเป็นไปได้น้อยและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบหรือราคาของวัสดุก็จำเป็นต้องทำการลองผิดลองถูกใหม่ซึ่งทำให้เสียเวลาและต้นทุนในการสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบ จากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้มีการนำเสนอหลักการออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมช่วยในการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

จากแผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมตามรูปที่ 3.4 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนในการออกแบบเป็นดังนี้

3.2.2.1 กำหนดเป้าหมายการออกแบบ

การกำหนดเป้าหมายการออกแบบ (design objective) คือการกำหนดความต้องการที่จะให้ผลของการออกแบบนั้นมีลักษณะเป็นอย่างไรตามเงื่อนไขที่กำหนด

3.2.2.2 กำหนดรูปแบบของปัญหา

กำหนดรูปแบบของปัญหา (formulation of problem) เป็นการศึกษาวิธีและขั้นตอนต่าง ๆ ของสิ่งที่ต้องการออกแบบ รวบรวมสมการที่ใช้ในการออกแบบในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเป้าหมายที่ต้องการให้ได้เพียงพอ ทั้งนี้เพราะจะช่วยนำไปสู่การกำหนดสมการเป้าหมายและเงื่อนไขที่ถูกต้อง

3.2.2.3 หลักการออกแบบและการสังเคราะห์

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

3.2.2.4 การหาค่าที่เหมาะสม

การหาค่าที่เหมาะสม (optimization process) เป็นวิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ ดิเทอร์มินิสติก (deterministic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของเกรเดียน และสโตคาสติก (stochastic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น

3.2.2.5 อภิปรายผลการออกแบบ

อภิปรายผลการออกแบบ (discussion) เป็นการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้หลังจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมว่ามีลักษณะเป็นตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งการที่ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการนั้นอาจเกิดจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ผิดพลาดหรือสาเหตุใดก็ตามที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นหลังการออกแบบจะต้องมีการนำผลลัพธ์มาอภิปรายเสมอเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเสมอ

3.3 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม

โดยทั่วไปการหาค่าที่เหมาะสมจะเป็นการหาค่าตัวแปรของฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) และเงื่อนไข (constraints function) ที่กำหนด[5] ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขจะแสดงดังสมการที่ 3.7 - 3.10 ดังนี้

Minimize $F(\mathbf{x})$ Objective Function (3.7)

Subject to constraints Function

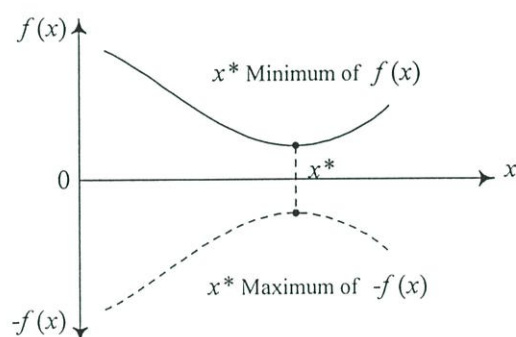
$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, \dots, l \quad \text{Inequality Constraint} \quad (3.8)$$

$$h_k(\mathbf{x}) = 0 \quad k = 1, \dots, m \quad \text{Equality Constraint} \quad (3.9)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, \dots, n \quad \text{Side Constraint} \quad (3.10)$$

เมื่อ $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้

สมการที่ 3.7 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจเป็นการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันก็ได้ จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า x^* เป็นจุดต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ และเป็นจุดสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันจะมีความหมายเดียวกันกับการหาค่าสูงสุดของค่าลบของฟังก์ชันนั้น [6]



รูปที่ 3.5 ค่าตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$

สมการที่ 3.8 แสดงฟังก์ชันเงื่อนไขที่น้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (inequality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด

สมการที่ 3.9 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันของเงื่อนไขที่เท่ากับศูนย์ (equality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนด

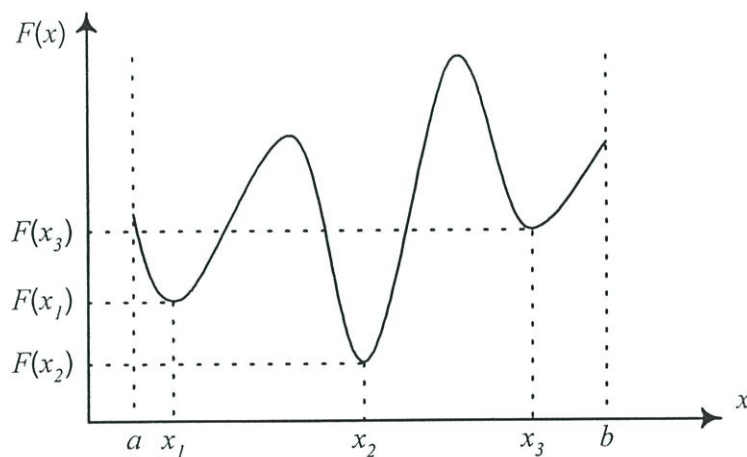
สมการที่ 3.10 เป็นสมการที่ใช้กำหนดช่วงของค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อป้องกันการได้ค่าคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ

โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

1. ดิโอมินิสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของแกรเดียน
2. สโตชาสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น

3.3.1 จุดที่เหมาะสม (Optimal Point)

ความหมายของจุดที่เหมาะสมสามารถถูกกำหนดได้ดังนี้ สมมติว่ามีโดเมนที่กำลังพิจารณาของตัวแปร x โดยที่ x^* และ x^{**} เป็นจุดในโดเมน x นั้นด้วย จุด x^* จะถูกเรียกว่าเป็นจุดที่เหมาะสมเฉพาะที่ (local optimal point) ถ้าไม่มีจุดใดเลยในย่านใกล้เคียงที่ดีกว่าจุด x^* ขณะที่จุด x^{**} จะถูกกล่าวว่าเป็นจุดเหมาะสมที่สุดของทั้งหมด (global optimal point) ถ้าไม่มีจุดใดเลยในโดเมน x นั้นที่ดีกว่า x^{**} พิจารณารูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x)$ บนโดเมน $x \in [a, b]$ เราจะเห็นว่า จุด x_1 x_2 และ x_3 ทุกจุดจะเรียกว่าเป็นจุดต่ำสุดเฉพาะที่เพราะเมื่อพิจารณาค่าของฟังก์ชันเป้าหมายรอบ ๆ จุดเหล่านี้แต่ละจุดแล้วจะมีค่าฟังก์ชันมากกว่าของจุดทั้งสามนั่นเอง ขณะที่จุด x_2 ก็ยังเป็นจุดต่ำสุดของทั้งหมดด้วย เพราะค่าของฟังก์ชันเป้าหมายที่มีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่จุด x_2 ในโดเมน x



รูปที่ 3.6 กราฟค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x)$ บนโดเมน x

3.3.2 การหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติก

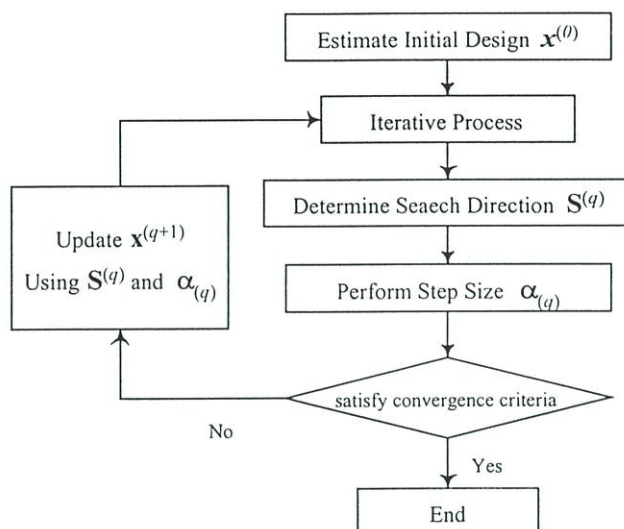
กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติกจะอาศัยพื้นฐานของเกรเดียนต์ [7-8] โดยเริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร $\mathbf{x}^{(0)}$ และใช้ค่าเริ่มต้นนี้หาค่าทิศทางและขนาดการก้าวเข้าสู่คำตอบของฟังก์ชัน หลังจากนั้นจะมีการตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดว่าพอใจหรือไม่ หากไม่พอใจก็จะมี การหาค่าทิศทางและขนาดการก้าวเข้าสู่คำตอบของฟังก์ชันซ้ำใหม่วนไปจนกว่าจะเป็นที่พอใจ ซึ่งสามารถกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathbf{x}^{(q+1)} = \mathbf{x}^{(q)} + \alpha_q \mathbf{S}^{(q)} \quad (3.11)$$

เมื่อ q เป็นจำนวนของการทำซ้ำ

\mathbf{S} เป็นเวกเตอร์ทิศทางที่ก้าวเข้าสู่เป้าหมาย

α เป็นขนาดระยะในการเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของ \mathbf{S}



รูปที่ 3.7 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบคิเทอมินิสติก

แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบคิเทอมินิสติกแสดงในรูปที่ 3.7 กระบวนการของการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีนี้ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การดำเนินการหาทิศทางของเวกเตอร์ S ในช่วงที่เป็นไปได้ของคำตอบ
2. กระทำการค้นหาระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไป (step size) ในทิศทางของเวกเตอร์ S
3. พิจารณาการสิ้นสุดกระบวนการเมื่อได้คำตอบที่ยอมรับได้ตามเงื่อนไข

3.4 จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms) [9-10]

จีเนติกอัลกอริทึมพันธุ คือ อัลกอริทึมที่ใช้ในการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (optimization) โดยมีวิธีการขยายพันธุ์ทางธรรมชาติการคัดเลือก (reproduction) โดยธรรมชาติ (natural selection) จะทำให้โครโมโซมมีความเหมาะสมที่สุดและจะถ่ายทอดคุณสมบัติไปยังโครโมโซมลูก โดยมีตัวดำเนินการของจีเนติกอัลกอริทึม (operators of genetic algorithms) ซึ่งประกอบด้วย

1. การคัดเลือก (reproduction)
2. การสร้างโครโมโซม (crossover)
3. การกลายพันธุ์ (mutation)

จีเนติกอัลกอริทึมเหมาะสำหรับการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่บางครั้งอาจไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องแม่นยำ (exact optimum) แต่มีนักวิจัยหลายคนได้ใช้จีเนติกอัลกอริทึมช่วยในการหาค่าให้ได้ค่าใกล้เคียงที่สุดแล้วจึงใช้วิธีการอื่นเพื่อหาคำตอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า

จีเนติกอัลกอริทึมแตกต่างจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (optimization) อื่น ๆ ดังนี้

1. การทำงานแบบเอากลุ่มตัวแปรมาทำเป็นรหัส (coding)
2. การค้นหาคำตอบจากจำนวน โครโมโซมทั้งหมด (population)
3. ใช้ข้อมูลจากผลลัพธ์ที่ได้มา
4. ใช้กระบวนการสุ่มทางสถิติ

จีเนติกอัลกอริทึมมีการทำงานแบบเอากลุ่มตัวแปรมาทำเป็นรหัส โดยจะไม่ปรับรูปแบบสมการฟังก์ชันและตัวแปรโดยตรง และยังมีการค้นหาคำตอบจากจำนวน โครโมโซมทั้งหมดซึ่งเป็นโครโมโซมที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว ดังนั้นโอกาสของการค้นหาคำตอบได้จะมีมากขึ้น เทคนิคการค้นหาคำตอบอื่นเช่น gradient techniques ต้องใช้ผลการคำนวณหรือผลจากการวิเคราะห์ที่ตัดแปลงแล้วเพื่อหาจุดอ้างอิงให้ช่วยค้นหาคำตอบต่อไปได้แต่จีเนติกอัลกอริทึมค้นหาคำตอบโดยการสุ่มตัวอย่างจากข้อมูลหรือค่าผลลัพธ์ที่ได้มาโดยไม่มีการตัดแปลงซึ่งเป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบต่อไป และนอกจากนี้จีเนติกอัลกอริทึมยังใช้กระบวนการสุ่มทางสถิติใช้เป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบด้วยเช่นกัน

3.4.1 ตัวดำเนินการทางจีเนติกอัลกอริทึม (Operator of genetic algorithms)

แบบจำลองทางพันธุกรรมที่นำมาใช้ในจีเนติกอัลกอริทึมถูกเรียกว่าโครโมโซม (chromosome) ในโครโมโซมประกอบด้วยบิตจำนวน n บิต ค่าของบิตในของแต่ละโครโมโซมที่นิยมใช้มี 3 แบบคือ

1. บิต 0 หรือบิต 1 (binary coding)
2. บิตจำนวนเต็ม (integer coding)
3. บิตจำนวนจริง (real number coding)

ค่าบิตในแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานค่าบิต 0 หรือบิต 1 เป็นทฤษฎีที่ยอมรับและถูกออกแบบมานานแล้ว ข้อดีแบบบิต 0 หรือ บิต 1 คือลดขนาดช่วงการหาค่าที่เหมาะสม (optimization space) ลงแต่การใช้งานในบางอย่างทำให้เกิดการสูญเสียค่าความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งถ้าค่าบิตเป็นจำนวนเต็มหรือจำนวนจริง ขนาดช่วงการหาค่าที่เหมาะสม (optimization space) จะมีขนาดใหญ่กว่าและมีความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้มากกว่า

ความมีประสิทธิภาพของจีเนติกอัลกอริทึมขึ้นอยู่กับตัวดำเนินการทางจีเนติกอัลกอริทึมซึ่งตัวดำเนินการจีเนติกอัลกอริทึมประกอบด้วย

1. การคัดเลือก
2. การสร้างโครโมโซมลูก
3. การกลายพันธุ์
4. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม

3.4.1.1 การคัดเลือก (reproduction or selection)

การคัดเลือกเป็นกระบวนการที่จะตัดสินว่าโครโมโซมใดจะคงอยู่ในรุ่น (generation) เพื่อนำไปคัดลอกต่อไป โดยจะตัดสินจากฟังก์ชันของแต่ละโครโมโซมความน่าจะเป็น (probability) ของแต่ละโครโมโซมที่จะถูกคัดเลือกซึ่งแทนด้วย $P_{select}(i)$ หาได้จากสมการที่ (3.12)

$$P_{select}(i) = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^k f_j} \quad (3.12)$$

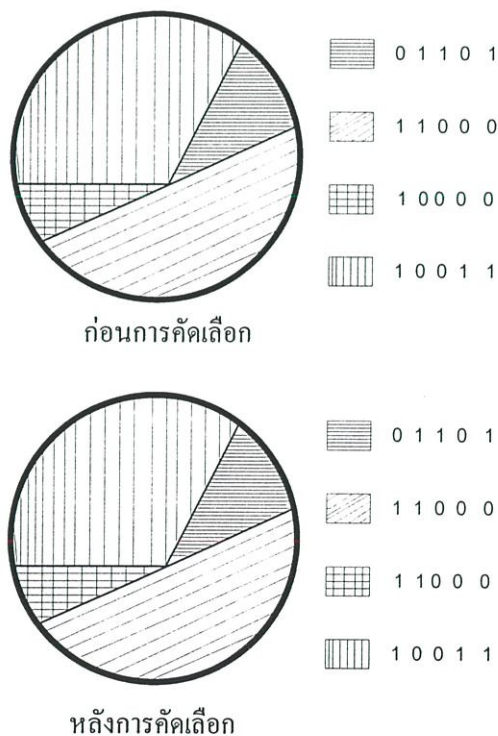
โดยที่ f_i คือค่าฟังก์ชันของแต่ละโครโมโซม

ส่วนจำนวนโครโมโซมที่ถูกคัดเลือก (num_i) เพื่อนำไปจับคู่และสร้างโครโมโซมลูก สามารถหาได้จากสมการที่ (3.13)

$$num_i = N * P_{select}(i) \quad (3.13)$$

โดยที่ N คือจำนวนโครโมโซมทั้งหมด (population size)

กระบวนการที่ตัดสินว่าโครโมโซมใดจะยังอยู่เพื่อนำไปคัดลอกในรุ่นต่อไปโดยตัดสินจากความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซม ถ้าเป็นบิตแบบไบนารีจะใช้เทคนิควงล้อรูเล็กและบิตเป็นจำนวนจริงหรือจำนวนเต็มจะใช้ normalized geometric การคัดเลือกโครโมโซมโดยเทคนิควงล้อรูเล็กแสดงดังรูปที่ 3.8



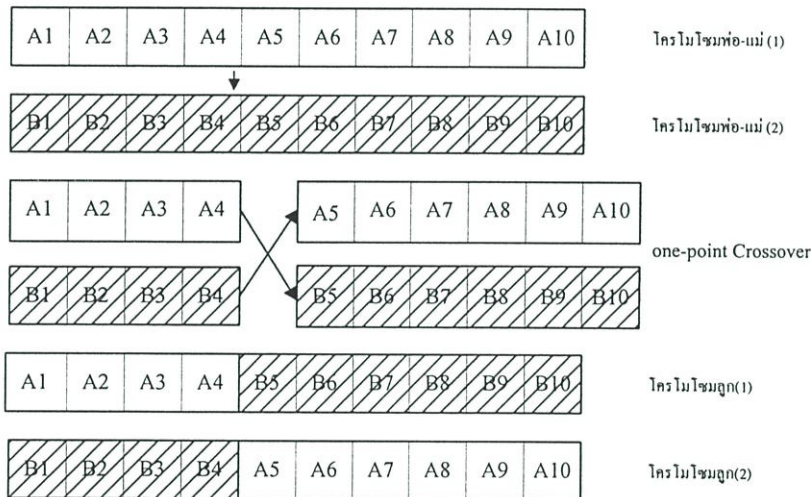
รูปที่ 3.8 การคัดเลือกโครโมโซมโดยเทคนิควงล้อรูเล็ก

ในกระบวนการของการคัดเลือกนี้บางครั้งอาจมีวิธีการบางส่วนที่แตกต่างกันไป เช่น จำนวนโครโมโซมที่ถูกการคัดเลือก (num_i) ซึ่งในงานวิจัยของ Randy L.Haupt ได้ใช้วิธีการคัดเอา 50% ของจำนวนโครโมโซมจากโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันที่ดีที่สุดของทั้งหมดมาเป็นโครโมโซมพ่อแม่ ส่วนงานวิจัยของ Koji Shimojima , Yasuhisa Hasegawa และ Toshio Fukuda โดยใช้วิธีการคัดเอาโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันสูงกว่าค่าฟังก์ชันที่กำหนดไว้เท่านั้นแล้วจึงทำการสุ่มคัดเอาเพื่อเป็นโครโมโซมพ่อแม่เป็นต้น

3.4.1.2 การสร้างโครโมโซมลูก (crossover)

หลังจากกระบวนการคัดเลือกได้โครโมโซม พ่อ-แม่แล้วการสร้างโครโมโซมลูก หรือการ (crossover) เป็นกระบวนการขั้นต่อไปซึ่งโดยทั่วไปมี 3 วิธี

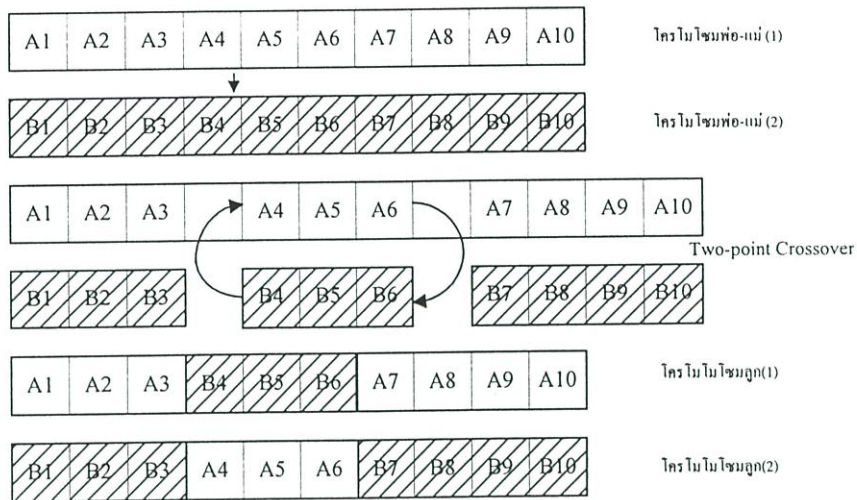
วิธีที่1 one-point crossover คือการสุ่มค่าตั้งแต่ 1 ถึง n-1 เพื่อหาตำแหน่งในการ crossover โดยที่ n คือค่าจำนวนบิตทั้งหมดในโครโมโซมดังตัวอย่างรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ one-point crossover

จากรูปที่ 3.9 โครโมโซม พ่อ-แม่ (1) และโครโมโซม พ่อ-แม่ (2) นำมาสร้างโครโมโซมลูกแบบ one-point crossover โดยมีตำแหน่งสำหรับการครอสโอเวอร์ที่สุ่มได้คือ 4 ทำให้โครโมโซมลูก 2 โครโมโซมที่มีการสลับกันของโครโมโซม พ่อ-แม่ ณ ตำแหน่งบิตที่ 4

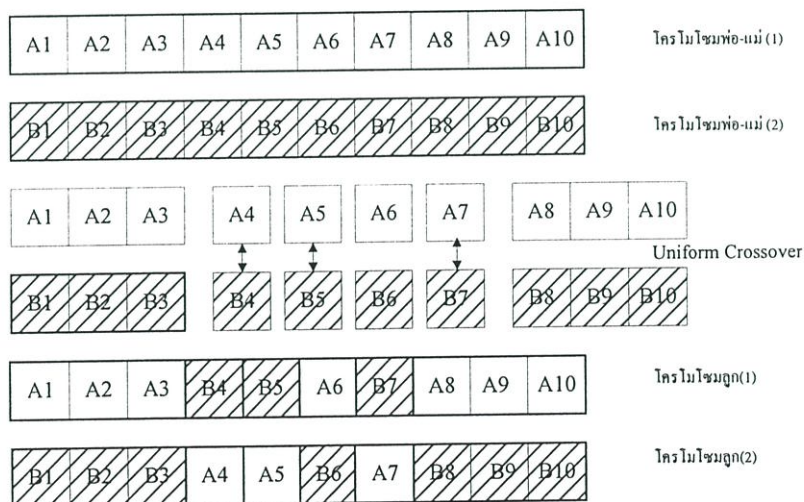
วิธีที่2 two-point crossover คือการสุ่มค่า 2 ค่า ตั้งแต่ 1 ถึง n-1 เพื่อตำแหน่ง 2 ตำแหน่งในการครอสโอเวอร์แล้วทำการสลับบิต โดยการเอาบิตที่อยู่ระหว่างค่าตำแหน่งบิตที่สุ่มได้ 2 ตำแหน่งมาสลับกันระหว่างโครโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2) เพื่อให้ได้โครโมโซมลูก 2 ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การสร้าง โครโมโซมลูกแบบ two-point crossover

จากตัวอย่างรูปที่ 3.10 เป็นการสร้างโครโมโซมลูกแบบ two-point crossover ค่าตำแหน่งบิตที่สุ่มได้คือ 3 และ 6 โดยการสลับค่าบิตที่อยู่ระหว่าง 3 กับ 6 ของโครโมโซม พ่อ-แม่ ทั้ง 2 โครโมโซมจะได้โครโมโซมลูก 2 โครโมโซม

วิธีที่ 3 uniform crossover คือกำหนดจำนวนบิตที่ต้องการแลกเปลี่ยนกันระหว่างโครโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2) แล้วสุ่มจำนวนบิตที่ได้โดยทั่วไปจำนวนบิตที่แลกเปลี่ยนกันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0% ถึง 5 % ดังตัวอย่างรูปที่ 3.11



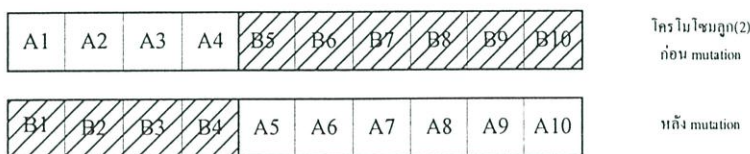
รูปที่ 3.11 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ uniform crossover

จากรูปที่ 3.11 กำหนดให้จำนวนบิตที่ต้องการแลกเปลี่ยนมีค่าเท่ากับ 30% ดังนั้น 30% ของจำนวนบิตทั้งหมดคือ 10 บิต มีค่าเท่ากับ 3 บิต แล้วสุ่มตำแหน่งบิตที่ 3 ตำแหน่ง โดยมีค่าที่สุ่มได้คือ

4, 5, 7 ดังนั้น โครโมโซมลูกที่ได้จะมีการแลกเปลี่ยนบิตกันระหว่างบิตที่ 4, 5, 7 ของโครโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2)

3.4.1.3 การกลายพันธุ์(mutation)

หลังจากได้โครโมโซมลูกยังมีตัวดำเนินการอีกชนิดหนึ่งคือ การกลายพันธุ์โดยมีวิธีการคือ ทำการสุ่มโครโมโซมลูกแล้วสุ่มตำแหน่งบิตในโครโมโซมนั้นเพื่อเปลี่ยนค่าของบิตในโครโมโซมดังกล่าวเนื่องจากโครโมโซมลูกที่ได้จากการครอสโอเวอร์ของโครโมโซม พ่อ-แม่นั้น มีส่วนประกอบของพันธุกรรมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง การกลายพันธุ์จึงสามารถป้องกันข้อบกพร่องดังกล่าวได้ วิธีการกลายพันธุ์ของโครโมโซมลูกแสดงตัวอย่างดังรูป 3.1



รูปที่ 3.12 การกลายพันธุ์ (mutation)

จากรูปที่ 3.12 ตำแหน่งที่ถูกสุ่มให้มีการกลายพันธุ์คือตำแหน่งที่ 3 โดยมีค่าบิตเปลี่ยนจาก B3 เป็น B'3 โดยที่ค่าของบิตโครโมโซมที่ใช้เป็นแบบบิต 0 หรือ 1 ค่าของ B'3เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 หรือ 0 เป็น 1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าของ B3 แต่สำหรับค่าบิตที่เป็นแบบจำนวนเต็มหรือจำนวนจริง ค่าของ B'3 จะเป็นค่าที่เกิดจากการสุ่มค่าจำนวนเต็มสำหรับโครโมโซมมีค่าบิตเป็นจำนวนเต็มและจำนวนจริงสำหรับโครโมโซมที่มีค่าบิตเป็นจำนวนจริง

3.4.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม (the control parameters of genetic algorithms)

ในการใช้จีเนติกอัลกอริทึม ซึ่งประกอบด้วยตัวดำเนินการต่างๆตามที่ได้อธิบายมาแล้ว ตัวดำเนินการที่ถือว่าเป็นตัวดำเนินการหลักของจีเนติกอัลกอริทึมได้แก่ตัวดำเนินการ ครอสโอเวอร์ และตัวดำเนินการกลายพันธุ์ เนื่องจากการครอสโอเวอร์ เป็นการสร้างโครโมโซมชิ้นใหม่ โดยจากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกแล้วส่วนการกลายพันธุ์เป็นการเพิ่มโอกาสในเปลี่ยนค่าของบิต ดังนั้นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดผลการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึมได้แก่จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (population size, *Popsiz*e), ความน่าจะเป็นจากการสร้างโครโมโซมลูก (crossover rate or crossover probability, P_c) และ ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (mutation rate or mutation probability, P_m)

3.4.1.4.1 จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (population size, $Popsiz$)

จำนวนโครโมโซมหรือ $Popsiz$ คือค่าจำนวนโครโมโซมทั้งหมดที่กำหนดขึ้นในกระบวนการของจินตออลกอริทึมยังมีค่า $Popsiz$ มากจะทำให้มีตัวเลือกมากขึ้นด้วยแต่ทั้งนี้การกำหนดค่า $Popsiz$ ขึ้นอยู่กับค่าที่กำหนดผู้ใช้เองหรือความซับซ้อนของงานที่จะนำมาค้นหาคำตอบ (optimization)

3.4.1.4.2 ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูก (crossover probability, P_c)

ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูกหรือค่า P_c คือค่าความน่าจะเป็นที่จะทำให้เกิดการครอสโอเวอร์ของโครโมโซม พ่อ-แม่ โดยทั่วไปจะกำหนดให้ P_c มีค่าอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 0.95 ได้มีการเสนอแนะการหาจำนวนโครโมโซมที่จะถูกครอสโอเวอร์ ไว้ดังสมการที่ (3.14)

$$N_x = P_c * Popsiz \quad (3.14)$$

โดยที่ N_x คือจำนวนโครโมโซมที่จะถูกครอสโอเวอร์
 $Popsiz$ คือจำนวนโครโมโซมทั้งหมด

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

3.4.1.4.3 ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (mutation probability, P_m)

ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์หรือค่า P_m เป็นปัจจัยอีกค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ซึ่งทุกบิตในโครโมโซมลูกจะมีโอกาสในการกลายพันธุ์โดยทั่วไปจะกำหนดให้ P_m มีค่าอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.1 และค่า P_m มักจะกำหนดให้มีค่าน้อย ๆ เพื่อให้โครโมโซมที่ดีมีโอกาสถูกทำลายน้อยลง ค่า P_m ควรมีค่าแปรผกผันกับ $Popsiz$ แนวทางการหาค่า P_m โดยประมาณดังสมการที่ (3.15) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกค่า P_m

$$P_m = \frac{1}{Popsiz \times \sqrt{m}} \quad (3.15)$$

โดยที่ m คือจำนวนบิตใน 1 โครโมโซมนอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะในจำนวนบิตที่จะถูกกลายพันธุ์ดังสมการที่ (3.16)

$$N_m = P_m \times m \times Popsiz \quad (3.16)$$

โดยที่ N_m คือจำนวนบิตทั้งหมดที่ถูกกลายพันธุ์ m คือจำนวนบิตใน 1 โครโมโซม

เมื่อได้ค่า P_m แล้วในแต่ละโครโมโซมจะถูกสุ่มค่า r โดยที่ r มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีเงื่อนไขว่าถ้า $r < P_m$ โครโมโซมนั้นจะถูกเลือกให้มีบิตที่ถูกกลายพันธุ์

จากที่กล่าวมาแล้วว่า ตัวดำเนินการครอสโอเวอร์เป็นตัวดำเนินการหลักของจีเนติกอัลกอริธึมการ ครอสโอเวอร์ จึงถือเป็นกระบวนการหลักที่ทำให้จีเนติกอัลกอริธึมเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง ดังนั้น ค่า P_c จึงมักถูกกำหนดให้มีค่าสูงแต่วิธีการครอสโอเวอร์ จะนำเอาโครโมโซมพ่อ-แม่ ที่อยู่ติดกันมาครอสโอเวอร์กัน หรือจะกระทำโดยการสุ่มเอาโครโมโซมพ่อ-แม่มาครอสโอเวอร์ กันก็ได้และเช่นเดียวกันกับการกลายพันธุ์ ผู้ใช้อาจสุ่มเอาโครโมโซมลูกขึ้นมาเพื่อทำการกลายพันธุ์ หรือสุ่มจากค่า r ของแต่ละโครโมโซมเพื่อเปรียบเทียบกับค่า P_m ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดผู้ใช้เอง การใช้จีเนติกอัลกอริธึมเพื่อให้เกิดการลู่เข้าสู่คำตอบ (algorithms convergence) อย่างได้ผลมากขึ้น โดยได้มีข้อเสนอแนะดังนี้คือ

1. เพิ่มจำนวนการกลายพันธุ์
2. เพิ่มจำนวนโครโมโซม (*Popsiz*e)
3. เพิ่มเงื่อนไขหรือบังคับ (constrains) ของปัญหาที่ต้องวิเคราะห์

จากข้อเสนอแนะดังกล่าวอาจช่วยให้สามารถหาคำตอบได้ดีขึ้นหรือรวดเร็ว ปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการลู่เข้าสู่คำตอบ convergence เช่นจำนวนบิตโครโมโซม ถ้ายังจำนวนบิตมากค่าความถูกต้องแม่นยำ (accuracy) ของคำตอบจะมีค่ามาก การหาค่าที่เหมาะสม (optimization) จะมีตัวเลือกเพื่อให้ใกล้คำตอบมากขึ้นแต่จะทำให้แต่ถ้าเกิดการลู่เข้าสู่คำตอบ convergence จะช้า และต้องใช้หน่วยความจำในการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมดังกล่าวมาก

3.4.2 การทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมพันธุ

ขั้นตอนการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมมีดังนี้คือ

1. การสร้างจำนวนโครโมโซมและจำนวนบิต (initialization)
2. การหาค่าฟังก์ชัน (cost function)
3. การคัดเลือก (reproduction or selection)
4. การสร้างโครโมโซมลูก (crossover)
5. การกลายพันธุ์ (mutation)

การทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมพันธุเริ่มต้นจากโครโมโซมจำนวน k โครโมโซมซึ่งในแต่ละโครโมโซมประกอบด้วยจำนวน n บิต โครโมโซมดังกล่าวเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังสมการที่ (3.17)

$$\text{โครโมโซม } (k) = \{ \text{บิต1, บิต2, ..., บิต } n \} \quad (3.17)$$

โดยที่ค่า k มีค่าตั้งแต่ 1 ถึงจำนวนโครโมโซมที่ต้องการ

คำนวณค่าของแต่ละฟังก์ชันของแต่ละโครโมโซม ซึ่งค่าฟังก์ชันที่ได้แต่ละโครโมโซมจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าของบิตในแต่ละ โครโมโซมมีค่าแบบสุ่ม (randomly) จากนั้นทำการ

คัดเลือกโครโมโซมเพื่อเรียงลำดับโครโมโซมใหม่โดยการคัดเลือกโครโมโซมจะคัดเลือกค่าฟังก์ชันแต่ละโครโมโซม โดยเรียงลำดับจากโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุดไปยังค่าที่น้อยที่สุด แล้วทำการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุด ณ รุ่น (generation) นั้นซึ่งเรียกโครโมโซมเหล่านี้ว่าโครโมโซมพ่อ-แม่ (parent) จากโครโมโซมพ่อ-แม่ที่ได้สามารถสร้างโครโมโซมลูก (offspring) ได้โดยการ crossover การสร้างโครโมโซมลูกกระทำด้วยวิธีใดก็ได้ ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ หลังจากได้โครโมโซมลูกแล้ว ทำการกลายพันธุ์ หรือ mutation กับโครโมโซมลูกดังกล่าวแล้วหาฟังก์ชันใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุดไปยังค่าที่การน้อยสุดทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2, 3, 4 และ 5 จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ

3.5 ตัวอย่างการหาค่าจุดสูงสุดของฟังก์ชันโดยใช้จินตคณิตอัลกอริธึม

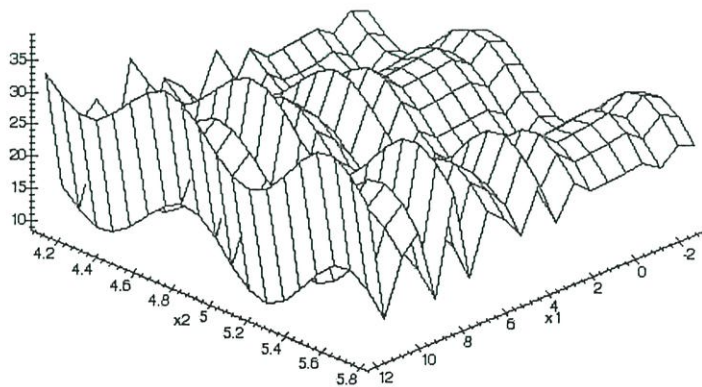
ในส่วนนี้จะแสดงรายละเอียดการทำงานเกี่ยวกับจินตคณิตอัลกอริธึม (genetic algorithms) ซึ่งเสนอโดย Michalewicz [11]

การหาค่าที่เหมาะสมในตัวอย่างนี้เป็นการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายแสดงดังสมการที่ 3.18. สมการเงื่อนไข 3.19 และ 3.20 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงภาพสามมิติของฟังก์ชันเป้าหมายได้ดังรูปที่ 3.13

$$\max f(x_1, x_2) = 21.5 + x_1 \sin(4\pi x_1) + x_2 \sin(20\pi x_2) \quad (3.18)$$

$$-3.0 \leq x_1 \leq 12.1 \quad (3.19)$$

$$4.1 \leq x_2 \leq 5.8 \quad (3.20)$$



รูป 3.13 กราฟสามมิติของฟังก์ชันเป้าหมาย

Initialized Population เป็นการสุ่มเซตของคำตอบในช่วงของตัวแปรที่กำหนดในรูปรหัสของเลขฐานสอง โดยความยาวของเลขฐานสอง (จำนวนบิต) ที่แทนคำตอบของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับความ

Initialized Population เป็นการสุ่มเซตของคำตอบในช่วงของตัวแปรที่กำหนดในรูปรหัสของเลขฐานสอง โดยความยาวของเลขฐานสอง (จำนวนบิต) ที่แทนคำตอบของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของคำตอบที่ต้องการ เช่น โดเมนคำตอบของตัวแปร x_j คือ $[a_j, b_j]$ และต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่ห้า ความเที่ยงตรงที่ต้องการนี้จะขึ้นอยู่กับช่วงของโดเมนของตัวแปรแต่ละตัว ซึ่งขั้นต้นจะแบ่งออกเป็น $(b_j - a_j) \times 10^5$ ส่วน ดังนั้นจำนวนบิตที่ต้องการ (m_j) สำหรับตัวแปรแต่ละตัวสามารถหาได้ดังนี้

$$2^{m_j-1} < (b_j - a_j) \times 10^5 \leq 2^{m_j} - 1 \quad (3.21)$$

ในการแปลงเซตคำตอบจากเลขฐานสองเป็นเลขฐานสิบของตัวแปร x_j สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.22

$$x_j = a_j + decimal(substring_j) \times \frac{b_j - a_j}{2^{m_i} - 1} \quad (3.22)$$

เมื่อ $decimal(substring_j)$ แทนค่าเลขฐานสิบของ $substring_j$ ของตัวแปร x_j เมื่อต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่ห้า จำนวนบิตที่ต้องการของตัวแปร x_1 และ x_2 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\{12.1 - (-3.0)\} \times 10,000 = 151,000$$

$$2^{17} < 151,000 \leq 2^{18} - 1, \quad m_1 = 18$$

$$(5.8 - 4.1) \times 10,000 = 17,000$$

$$2^{14} < 17,000 \leq 2^{15} - 1, \quad m_2 = 15$$

$$m = m_1 + m_2 = 18 + 15 = 33$$

ผลการคำนวณได้ความยาวของโครโมโซมเท่ากับ 33 บิต สมมุติเซตคำตอบให้เป็นดังนี้

$$v_j \quad 000001010100101001 \quad 10111101111110$$

จากเซตของคำตอบที่กำหนด สามารถแปลงให้อยู่ในเลขฐานสิบได้ดังนี้

	Binary Number	Decimal Number
x_1	000001010100101001	5417
x_2	10111101111110	244318

$$x_1 = -3.0 + 5417 \times \frac{12.1 - (-3.0)}{2^{18} - 1} = -2.687969$$

$$x_2 = 4.1 + 24318 \times \frac{5.8 - 4.1}{2^{15} - 1} = 5.36165$$

ทำการสุ่มเซตของคำตอบในช่วงของตัวแปรที่กำหนดในรูปรหัสของเลขฐานสอง ตามจำนวนบิตที่กำหนดไว้

$$v_1 = [00000101010010100110111101111110]$$

$$v_2 = [001110101110011000000010101001000]$$

$$v_3 = [111000111000001000010101001000110]$$

$$v_4 = [100110110100101101000000010111001]$$

$$v_5 = [000010111101100010001110001101000]$$

$$v_6 = [111110101011011000000010110011001]$$

$$v_7 = [110100010011111000100110011101101]$$

$$v_8 = [001011010100001100010110011001100]$$

$$v_9 = [111110001011101100011101000111101]$$

$$v_{10} = [111101001110101010000010101101010]$$

ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในระบบเลขฐานสิบได้เป็น

$$v_1 = [x_1, x_2] = [-2.687969, 5.361653]$$

$$v_2 = [x_1, x_2] = [0.474101, 4.170144]$$

$$v_3 = [x_1, x_2] = [10.419457, 4.66141]$$

$$v_4 = [x_1, x_2] = [6.159951, 4.109598]$$

$$v_5 = [x_1, x_2] = [-2.301286, 4.477282]$$

$$v_6 = [x_1, x_2] = [11.788084, 4.174346]$$

$$v_7 = [x_1, x_2] = [9.342067, 5.121702]$$

$$v_8 = [x_1, x_2] = [-0.330256, 4.694977]$$

$$v_9 = [x_1, x_2] = [11.671267, 4.873501]$$

$$v_{10} = [x_1, x_2] = [11.446273, 4.171908]$$

3.5.1 **ขั้นตอนที่ 1** การคัดเลือกเป็นการคัดเลือกคำตอบที่มีความน่าจะเป็นที่จะทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไขเป็นที่น่าพอใจ เริ่มต้นจาก Evaluation คือ การหาคำตอบที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเหมาะสมที่สุด (ต่ำสุดหรือสูงสุด ตามฟังก์ชันเป้าหมาย)

$$eval(v_1) = f(-2.687969, 5.361653) = 19.805119$$

$$eval(v_2) = f(0.474101, 4.170144) = 17.370896$$

$$eval(v_3) = f(10.419457, 4.66141) = \mathbf{9.590546}$$

$$eval(v_4) = f(6.159951, 4.109598) = \mathbf{29.406122}$$

$$eval(v_5) = f(-2.301286, 4.477282) = 15.686091$$

$$eval(v_6) = f(11.788084, 4.174346) = 11.900541$$

$$eval(v_7) = f(9.342067, 5.121702) = 17.958717$$

$$eval(v_8) = f(-0.330256, 4.694977) = 19.763190$$

$$eval(v_9) = f(11.671267, 4.873501) = 26.401669$$

$$eval(v_{10}) = f(11.446273, 4.171908) = 10.252480$$

จะเห็นว่าโครโมโซมที่ v_3 จะทำให้ผลลัพธ์ของฟังก์ชันมีค่าต่ำสุด และโครโมโซมที่ v_4 จะทำให้ผลลัพธ์ของฟังก์ชันมีค่าสูงสุด

เมื่อได้คำตอบของฟังก์ชันแล้วทำการหา Fitness (F) ซึ่งเป็นการหาผลรวมของคำตอบของทุกโครโมโซม

$$F = \sum_{k=1}^{pop_size} eval(v_k)$$

$$F = \sum_{k=1}^{10} eval(v_k) = 178.135372$$

ทำการหาความน่าจะเป็นที่ทำให้คำตอบนั้นผ่านการคัดเลือกของแต่ละโครโมโซม (p_k)

$$p_k = \frac{eval(v_k)}{F}, \quad k = 1, 2, \dots, pop_size$$

$$p_1 = 0.111180 \quad p_2 = 0.097515 \quad p_3 = 0.053839 \quad p_4 = 0.165077 \quad p_5 = 0.088057$$

$$p_6 = 0.066806 \quad p_7 = 0.100815 \quad p_8 = 0.110945 \quad p_9 = 0.148211 \quad p_{10} = 0.057554$$

ทำการหาความน่าจะเป็นที่ทำให้คำตอบนั้นผ่านการคัดเลือกของทุกโครโมโซม (q_k)

$$q_k = \sum_{j=1}^k p_j, \quad k = 1, 2, \dots, pop_size$$

$$q_1 = 0.111180 \quad q_2 = 0.208695 \quad q_3 = 0.262534 \quad q_4 = 0.427611 \quad q_5 = 0.515668$$

$$q_6 = 0.582475 \quad q_7 = 0.683290 \quad q_8 = 0.794234 \quad q_9 = 0.942446 \quad q_{10} = 1.000000$$

ทำการสุ่มค่าของเลขฐาน 10 ระหว่าง 0 ถึง 1 เป็นจำนวน 10 ค่า

$$0.301431 \quad 0.322062 \quad 0.766503 \quad 0.881893 \quad 0.350871$$

$$0.583392 \quad 0.177618 \quad 0.343242 \quad 0.032685 \quad 0.197577$$

หลังจากสุ่มค่าแล้วให้นำไปตรวจสอบค่า q_k ตัวอย่างเช่น 0.301431 เป็นตัวเลขที่ได้จากการสุ่มซึ่งนำไปเปรียบเทียบกับค่า q_k แล้วปรากฏว่ามีค่ามากกว่า q_3 แต่น้อยกว่า q_4 ดังนั้นโครโมโซม v_4 จะถูกเลือกดังนี้

$$v'_1 = [10011011010010110100000010111001] \quad (v_4)$$

$$v'_2 = [10011011010010110100000010111001] \quad (v_4)$$

$$v'_3 = [001011010100001100010110011001100] \quad (v_8)$$

$$v'_4 = [111110001011101100011101000111101] \quad (v_9)$$

$$v'_5 = [10011011010010110100000010111001] \quad (v_4)$$

$$v'_6 = [110100010011111000100110011101101] \quad (v_7)$$

$$v'_7 = [001110101110011000000010101001000] \quad (v_2)$$

$$v'_8 = [10011011010010110100000010111001] \quad (v_4)$$

$$v'_9 = [00000101010010100110111101111110] \quad (v_1)$$

$$v'_{10} = [001110101110011000000010101001000] \quad (v_2)$$

3.5.2 ขั้นตอนที่ 2 สร้างโครโมโซมลูก

เป็นการแลกเปลี่ยนรหัสของคำตอบยกตัวอย่างเช่น โครโมโซม v_1 กับ v_2 ทำการ Cross Over ที่ตำแหน่งบิตที่ 17 ดังนั้น โครโมโซมใหม่ทางพจน์ขวามือ

$$v_1 = [10011011010010110100000010111001] \quad v'_1 = [100110110100101100010110011001100]$$

$$v_2 = [001011010100001100010110011001100] \quad v'_2 = [00101101010000110100000010111001]$$

3.5.3 ขั้นตอนที่ 3 การกลายพันธุ์

คือการเปลี่ยนรหัสคำตอบในตำแหน่งบิตที่ต้องการหรือจากการสุ่มโดยการเปลี่ยนจากเลขฐานสอง จากเลขหนึ่งเป็นเลขศูนย์ หรือจากเลขศูนย์เป็นเลขหนึ่ง หลังจากผ่านการ Cross Over และ Mutation แล้วจะได้เซตของคำตอบในรูปของเลขฐานสองดังข้างล่างนี้

$$v'_1 = [10011011010010110100000010111001]$$

$$v'_2 = [10011011010010110100000010111001]$$

$$v'_7 = [100110110100101101000000010111001]$$

$$v'_8 = [100110110100101101000000010111001]$$

$$v'_9 = [00000101010010100110111101111110]$$

$$v'_{10} = [001110101110011000000010101001010]$$

จากนั้นนำคำตอบที่ได้จากเลขฐานสองแปลงเป็นเลขฐานสิบนำคำตอบที่ได้ไปแทนในฟังก์ชัน เพื่อหาเป้าหมายดังข้างล่างนี้

$$f(6.159951, 4.109598) = 29.406122$$

$$f(6.159951, 4.109598) = 29.406122$$

$$f(-0.0330256, 4.694977) = 19.763190$$

$$f(11.907206, 4.873501) = 5.702781$$

$$f(8.02413, 4.170248) = 19.91025$$

$$f(9.342067, 5.121702) = 17.958717$$

$$f(6.159951, 4.109598) = 29.406122$$

$$f(6.159951, 4.109598) = 29.406122$$

$$f(-2.687969, 5.361653) = 19.805119$$

$$f(0.474101, 4.170248) = 17.380896$$

หลังจากประมวลผลการหาค่าสูงสุดเป็นจำนวน 1000 รุ่นของประชากรแล้วเลือกโครโมโซมที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าสูงสุด นั่นคือได้คำตอบ $x_1 = 11.631407$ และ $x_2 = 5.724824$ ซึ่งทำให้ฟังก์ชันเป้าหมาย มีค่าสูงสุดคือ 38.818208

บทที่ 4

การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยหลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม

4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงวิธีการทำนายสมรรถนะโดยหลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 แนวทางโดย

แนวทางที่ 1 ใช้ข้อมูล 3 ชุดแต่ละชุดประกอบด้วยค่าแรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า กำลังเอาต์พุตและประสิทธิภาพจากแคทาลอกผู้ผลิต

แนวทางที่ 2 ใช้ข้อมูล 3 ชุดแต่ละชุดประกอบด้วยข้อมูลทางไฟฟ้าและทางกลคือค่าแรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบจากการทดสอบงานจริง

แนวทางที่ 3 ใช้ข้อมูล 2 จุด โดยจุด 1 ที่ภาระทางกล 100% ประกอบด้วยค่าแรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและ แรงบิดที่พิกัด จุดที่ 2 ที่จุดแรงบิดสูงสุด

จากข้อมูล 3 แนวทางนำไปประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์โดยอ้างอิงวงจรสมมูลทางไฟฟ้า 2 แบบคือแบบประมาณและแบบสมบูรณ์สามารถนำไปทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ เช่น กระแสอินพุต กำลังเอาต์พุตและประสิทธิภาพ เป็นต้น

4.2 การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในวิทยานิพนธ์ใช้ข้อมูลจากแคทาลอกของบริษัทผู้ผลิตซึ่งได้แก่ ค่ากำลังเอาต์พุต แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพ แรงบิดที่พิกัด และแรงบิดสูงสุดและใช้ข้อมูลจากการทดสอบงานจริงได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบ นำข้อมูลดังกล่าวประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณและแบบสมบูรณ์ดังรูปที่ 4.1 โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบเชิงตัวเลข ด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม เมื่อทราบค่าวงจรสมมูลทางไฟฟ้าจะสามารถทำการคำนวณหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์ที่ภาระทางกลต่างๆ ได้ กำหนดให้ $R_1, R_2, jX_1, jX_2, jX_m$ และ R_c เป็นค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟส s เป็นค่าสลิป V_1, I_1 , และ Z_1 เป็นค่าอินพุตต่อเฟสของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ตามลำดับ

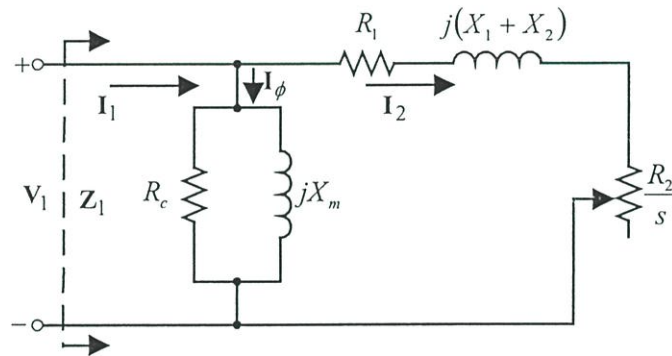
$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1(R_1, R_2, jX_1, jX_2, jX_m, R_c)} \quad (4.1)$$

$$P_1 = 3V_1 I_1 (PF) \quad (4.2)$$

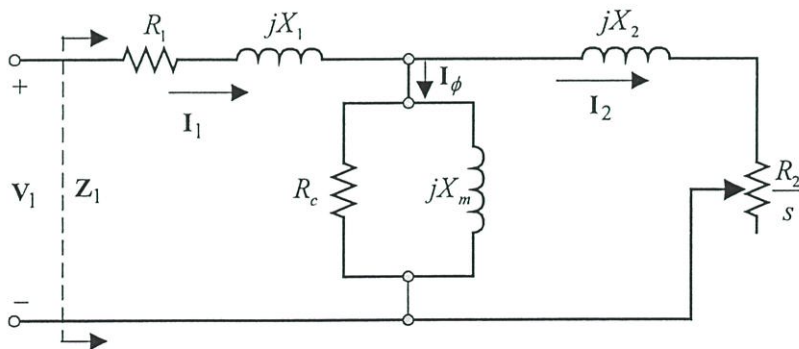
$$P_2 = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (4.3)$$

$$Eff = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (4.4)$$

โดยที่ P_1, P_2 และ Eff เป็นค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต กำลังเอาต์พุตและประสิทธิภาพ V_1, I_1, PF และ I_2 เป็นค่าต่อเฟสของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และกระแสไหลตามลำดับ



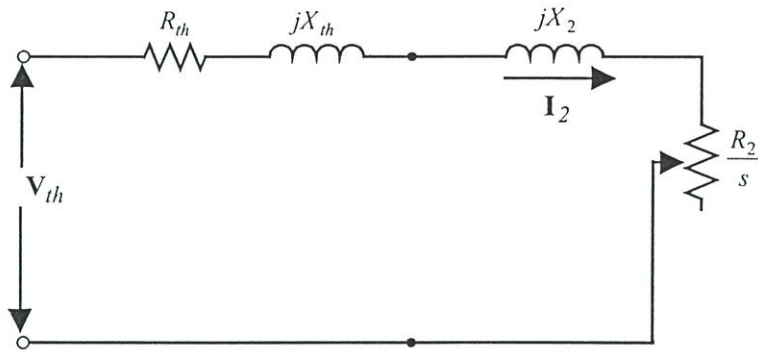
ก) แบบประมาณ



ข) แบบสมบูรณ์

รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้างดังรูปที่ 4.1 ข) เมื่อนำมาพิจารณาวงจรสมมูลตามความหมายในทฤษฎีของ Thevenin ดังรูปที่ 4.2 ดังนั้นจะได้แรงบิดที่พิกัดและแรงบิดสูงสุดดังสมการที่ (4.5) และ (4.6) ตามลำดับ เมื่อ V_{th}, R_{th} และ X_{th} เป็นค่าแรงดัน ความต้านทาน และลิกเกจรีแอกแตนซ์ตามความหมายทฤษฎี Thevenin



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าตามความหมายในทฤษฎีของ Thevenin

$$T_{FL} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{th}^2}{(R_1, R_2, jX_1, jX_2, jX_m, R_c)} \quad (4.5)$$

$$T_{PO} = \frac{3V_{th}^2}{2\omega_s (R_1, R_2, jX_1, jX_2, jX_m, R_c)} \quad (4.6)$$

เมื่อ T_{FL} , T_{PO} และ ω_s เป็นค่าแรงบิดที่พิกัดแรงบิดสูงสุดและความเร็วเชิงมุมซิงโครนัสมอเตอร์ตามลำดับ ในการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยจีเนติกอัลกอริทึมในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งใช้ข้อมูล 3 แนวทางดังนี้

4.2.1 แนวทางที่ 1

แนวทางที่ 1 ใช้ข้อมูล 3 ชุดที่ภาระทางกล 50%, 75% และ 100% ข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า กำลังเอาต์พุตและประสิทธิภาพจากแคทาล็อกผู้ผลิตมิติซูบิชิ [12] ตารางที่ 4.1 (ภาคผนวก ก.1.1 ถึง ก.1.3) และเทค โก [13] ตารางที่ 4.2 (ภาคผนวก ข.1.1 ถึง ข.1.3) โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายดังสมการที่ (4.7)

$$F_1 = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{I_{1i,cal}}{I_{1i,cat}} - 1 \right]^2 + \sum_{i=1}^3 \left[\frac{P_{2i,cal}}{P_{2i,cat}} - 1 \right]^2 + \sum_{i=1}^3 \left[\frac{Loss_{i,cal}}{Loss_{i,cat}} - 1 \right]^2 + \sum_{i=1}^3 \left[\frac{Eff_{i,cal}}{Eff_{i,cat}} - 1 \right]^2 \quad (4.7)$$

เมื่อ $I_{1i,cal}$, $P_{2i,cal}$, $Loss_{i,cal}$ และ $Eff_{i,cal}$ เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (4.1), (4.2), (4.3) และ (4.4) ของกระแสไฟฟ้าอินพุต กำลังเอาต์พุต ความสูญเสียและประสิทธิภาพตามลำดับ $I_{1i,cat}$, $P_{2i,cat}$, $Loss_{i,cat}$ และ $Eff_{i,cat}$ เป็นข้อมูลมอเตอร์ที่ได้จากแคทาล็อกบริษัทผู้ผลิตของค่ากระแสไฟฟ้าอินพุต กำลังเอาต์พุต ความสูญเสีย และประสิทธิภาพตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 380 V 4-pole, 50 Hz. มิตซูบิชิ (Mitsubishi)

Rated Power	0.75 kW	7.5kW	15kW	22kW	37kW
Current (A)	1.26	8.50	16.90	23.80	38.80
50% Load Efficiency (%)	74.0	85.0	91.0	89.0	91.0
Power Factor	0.61	0.79	0.75	0.79	0.79
Current (A)	1.51	11.70	22.40	32.30	52.10
75% Load Efficiency (%)	78.0	88.0	92.0	91.0	92.0
Power Factor	0.73	0.83	0.83	0.86	0.88
Current (A)	1.26	8.50	16.90	23.80	38.80
100% Load Efficiency (%)	74.0	85.0	91.0	89.0	91.0
Power Factor	0.61	0.79	0.75	0.79	0.79
speed(r/min)	1400	1430	1450	1460	1450
Full Load Torque (kg-m)	0.52	5.11	10.08	14.68	24.85
Pull Out Torque (% FLT)	275	238	306	263	289

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 380 V, 4-pole, 50 Hz. เทคโก (Teco) * จากการคำนวณ

Rated Power	0.75 kW	7.5kW	15kW	22kW	37kW
Current (A)	1.53 *	9.26 *	16.59*	24.21*	36.99*
50% Load Efficiency (%)	68.50	86.50	89.0	92.0	92.50
Power Factor	0.54	0.71	0.775	0.75	0.82
Current (A)	1.74 *	11.84 *	22.74*	33.21*	52.98*
75% Load Efficiency (%)	72.50	88.50	90.50	92.0	92.50
Power Factor	0.67	0.815	0.83	0.82	0.86
Current (A)	2.13	15.2	28.3	43.9	72.0
100% Load Efficiency (%)	72.0	87.50	90.5	90.50	91.50
Power Factor	0.74	0.855	0.885	0.855	0.86
Speed (r/min)	1395	1450	1465	1465	1470
Full Load Torque (kg-m)	0.52	5.006	9.909	14.864	24.689
Pull Out Torque (% FLT)	280	250	260	240	210

4.2.2 แนวทางที่ 2

แนวทางที่นี้ใช้ข้อมูล 3 ชุดที่ภาระทางกลใดๆ แต่ละชุดประกอบด้วยค่าทางไฟฟ้าและค่าทางกลคือแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบจากการทดสอบงานจริงแสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 (ภาคผนวก ก) ตามลำดับโดยมีฟังก์ชันเป้าหมายดังสมการที่ (4.8)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าขณะรับภาระทางกลพิกัด 0.75 kW

Step Load	$V_{(av)}$ (V)	$I_{(av)}$ (A)	$PF_{(av)}$	N_r (rpm)	Slip	T (N-m)
1	219.33	1.03	0.47	1480	0.0133	1.04
2	219.33	1.11	0.58	1468	0.0213	1.75
3	219.33	1.21	0.66	1456	0.0293	2.32
4	220	1.33	0.73	1443	0.038	3.03
5	220.33	1.45	0.78	1431	0.046	3.57
6	220	1.6	0.81	1415	0.0567	4.11
7	220	1.74	0.84	1400	0.0667	4.65
8	219.67	1.88	0.86	1384	0.0773	5.16
9	220	2.04	0.88	1366	0.0893	5.55

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

Step Load	$V_{(av)}$ (V)	$I_{(av)}$ (A)	P_{in} (W)	P_o (W)	P_{loss} (W)	Efficiency (%)
1	219.33	1.03	315	161.42	153.57	51.24
2	219.33	1.11	423	270.23	152.76	63.88
3	219.33	1.21	528	355.16	172.83	67.26
4	220	1.33	650	458.13	191.86	70.48
5	220.33	1.45	750	536.37	213.62	71.51
6	220	1.6	860	609.26	250.73	70.84
7	220	1.74	970	681.6	288.40	70.26
8	219.67	1.88	1070	747.78	322.21	69.88
9	220	2.04	1190	794.16	395.83	66.73

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าขณะรับภาระทางกลพิกัดกำลัง 5.5 kW

Step Load	$V_{(av)}$ (V)	$I_{(av)}$ (A)	$PF_{(av)}$	N_r (rpm)	Slip	T (N-m)
1	220.45	4.208	0.1812	1496.3	0.002467	1.26
2	219.92	4.332	0.2724	1492.8	0.0048	2.92
3	220.5	4.471	0.372	1490.8	0.006133	4.89
4	220.24	4.723	0.419	1486.7	0.008867	6.85
5	220.19	4.981	0.527	1484.3	0.010467	8.87
6	220.34	5.314	0.5917	1483	0.011333	10.79
7	220.5	5.672	0.6417	1478.6	0.014267	12.9
8	220.11	5.884	0.6675	1476.4	0.015733	13.91
9	220.19	6.274	0.6958	1473.8	0.017467	15.83
10	220.53	6.715	0.7332	1471.5	0.019	17.74
11	220.33	7.116	0.7581	1464.5	0.023667	19.56
12	220.47	7.553	0.7765	1463.5	0.024333	21.17
13	220.59	8.032	0.7935	1458.9	0.0274	23.29
14	219.98	8.334	0.804	1455.9	0.0294	24.4
15	220.21	8.79	0.8176	1451.6	0.032267	26.31
16	220.44	9.193	0.8229	1448.2	0.034533	27.72
17	220.16	9.923	0.8392	1444.9	0.036733	30.34
18	220.37	10.365	0.8449	1439.5	0.040333	32.85
19	220.24	10.786	0.8503	1435.6	0.042933	33.17
20	220.06	11.346	0.8571	1430.3	0.046467	34.98

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

Step Load	$V_{(av)}$ (V)	$I_{(av)}$ (A)	P_{in} (W)	P_o (W)	P_{loss} (W)	Efficiency (%)
1	220.45	4.208	505	190	315	37.62
2	219.92	4.332	774	450	324	58.13
3	220.5	4.471	1094	760	334	69.46
4	220.24	4.723	1419	1070	349	75.40
5	220.19	4.981	1752	1380	372	78.76
6	220.34	5.314	2073	1680	393	81.04
7	220.5	5.672	2410	2000	410	82.98
8	220.11	5.884	2586	2150	436	83.13
9	220.19	6.274	2906	2570	336	88.43
10	220.53	6.715	3224	2730	494	84.67
11	220.33	7.116	3552	3000	552	84.45
12	220.47	7.553	3853	3240	613	84.09
13	220.59	8.032	4225	3560	665	84.26
14	219.98	8.334	4429	3720	709	83.99
15	220.21	8.79	4752	4000	752	84.17
16	220.44	9.193	5016	4200	816	83.73
17	220.16	9.923	5524	4590	934	83.09
18	220.37	10.365	5819	4800	1019	82.48
19	220.24	10.786	6050	4990	1060	82.47
20	220.06	11.346	6400	5240	1160	81.87

$$F_2 = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{I_{i,cal}}{I_{i,test}} - 1 \right]^2 + \sum_{i=1}^3 \left[\frac{PF_{i,cal}}{PF_{i,test}} - 1 \right]^2 \quad (4.8)$$

เมื่อ $I_{i,cal}$ และ $PF_{i,cal}$ เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (4.1) และ (4.2) ของกระแสไฟฟ้าอินพุทและตัวประกอบกำลังไฟฟ้า $I_{i,test}$ และ $PF_{i,test}$ เป็นข้อมูลมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบงานจริงของค่ากระแสไฟฟ้าอินพุท และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

4.2.3 แนวทางที่ 3

แนวทางที่ 3 ใช้ข้อมูล 2 จุด โดยจุดที่ 1 ที่ภาระทางกล 100% ประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุท ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและแรงบิดที่พิกัด จุดที่ 2 ที่แรงบิดสูงสุดจากแคทาล็อก ผู้ผลิตแสดงดังตารางที่ 4.1, 4.2 และของแคทาล็อกซิเมนต์แสดงดังตารางที่ 4.5 (ภาคผนวก ง.1.1 ถึง ง.1.3) โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายดังสมการที่ (4.9)

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 400 V, 4-pole, 50 Hz. ซีเมนต์ (Siemens)

Rated Power	0.75 kW	7.5kW	15kW	22kW	37kW
Current (A)	1.86	15.10	28.50	41.0	66.0
100% Load Efficiency (%)	72.0	87.50	90.0	91.20	92.90
Power Factor	0.81	0.82	0.84	0.84	0.87
Speed (r/min)	1395	1455	1460	1460	1470
Full Load Torque (Nm)	5.10	49.0	98.0	144.0	241.0
Pull Out Torque (% FLT)	230	320	320	300	320

$$F_3 = \left[\frac{I_{1,cal}}{I_{1,cat}} - 1 \right]^2 + \left[\frac{P_{1,cal}}{P_{1,cat}} - 1 \right]^2 + \left[\frac{T_{FL,cal}}{T_{FL,cat}} - 1 \right]^2 + \left[\frac{T_{PO,cal}}{T_{PO,cat}} - 1 \right]^2 \quad (4.9)$$

เมื่อ $I_{1,cal}$, $P_{1,cal}$, $T_{FL,cal}$ และ $T_{PO,cal}$ เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (4.1) , (4.2), (4.5) และ (4.6) ตามลำดับ ของค่ากระแสไฟฟ้าอินพุท กำลังไฟฟ้าอินพุท แรงบิดที่พิกัดและแรงบิดสูงสุด $I_{1,cat}$, $P_{1,cat}$, $T_{FL,cat}$ และ $T_{PO,cat}$ เป็นข้อมูลมอเตอร์ของแคทาลอกบริษัทผู้ผลิต จากการประมวลผลหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมายของสมการที่ (4.7), (4.8) และ (4.9) จะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณและแบบสมบูรณ์ค่าต่อเฟสซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์เช่น กระแสไฟฟ้าอินพุท กำลังเอาต์พุทและประสิทธิภาพที่ภาระทางกลต่าง ๆ ได้

บทที่ 5

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์เปรียบเทียบการหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยแบ่งออกเป็น 3 แนวทางดังนี้

แนวทางที่ 1 ใช้ชุดข้อมูล 3 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยค่า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า กำลังเอาต์พุต และประสิทธิภาพ ของมอเตอร์พิกัด 380 โวลต์ 0.75 ถึง 37 กิโลวัตต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz จากแคทาล็อกผู้ผลิต

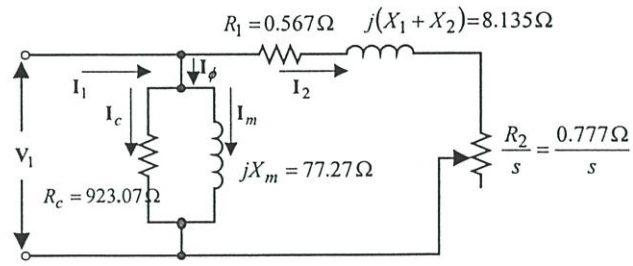
แนวทางที่ 2 ใช้ชุดข้อมูล 3 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของมอเตอร์พิกัด 380 โวลต์ 0.75, 2.2, 3.7 และ 5.5 กิโลวัตต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz ที่ได้จากการทดสอบในการใช้งานจริง

แนวทางที่ 3 ใช้ชุดข้อมูล 2 ชุดโดยจุดที่ 1 ประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและแรงบิดที่พิกัด จุดที่ 2 ที่แรงบิดสูงสุด ของมอเตอร์พิกัด 380 โวลต์ 0.75 ถึง 37 กิโลวัตต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz จากแคทาล็อกผู้ผลิต

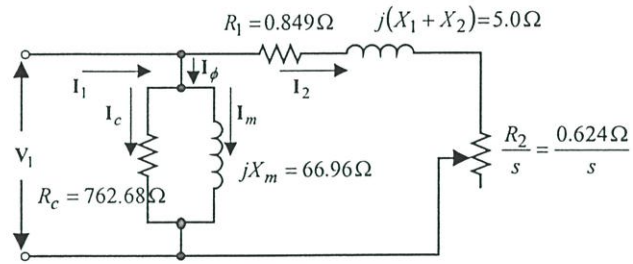
ในทุกแนวทางจะใช้การประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ด้วยวิธีจเนติกอัลกอริธึม โดยอ้างอิงจากวงจรสมมูลทางไฟฟ้า 2 แบบ คือ วงจรสมมูลแบบประมาณ และแบบสมบูรณ์

5.2 การทดสอบหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้แนวทางที่ 1

แนวทางที่ 1 นี้ใช้ข้อมูล 3 ชุดที่ภาระทางกล 50%, 75% และ 100% แต่ละชุดประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า กำลังเอาต์พุต และประสิทธิภาพ โดยใช้ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พิกัด 380 โวลต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz จากแคทาล็อกบริษัทผู้ผลิตมิตซูบิชิ และเทคโก โดยอ้างอิงวงจรสมมูลแบบประมาณ แบบสมบูรณ์ และแบบสมบูรณ์กรณีค่า ($X_1 = X_2$) ซึ่งประมวลผลด้วยจเนติกอัลกอริธึม ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ได้จากข้อมูลแคทาล็อกมิตซูบิชิแสดงดังภาคผนวก ก.1.4 และเทคโกแสดงดังภาคผนวก ข.1.4 ตัวอย่างการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์พิกัดกำลัง 15 กิโลวัตต์ แสดงดังรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้สามารถนำมาทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ทางด้านกระแสไฟฟ้าอินพุต กำลังเอาต์พุต และประสิทธิภาพได้แสดงดังรูปที่ 5.4 ถึง 5.6

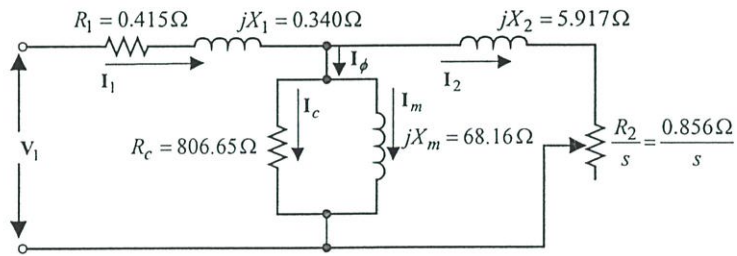


ก) แคทาลอกมิตซูบิชิ

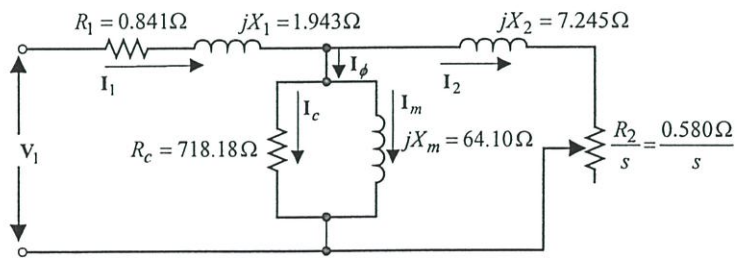


ข) แคทาลอกเทโก

รูปที่ 5.1 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบประมาณ โดยใช้แนวทางที่ 1 พิกัดกำลัง 15 kW, 4-pole, 50Hz.

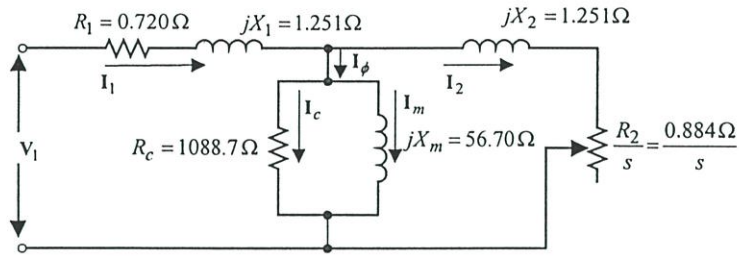


ก) แคทาลอกมิตซูบิชิ

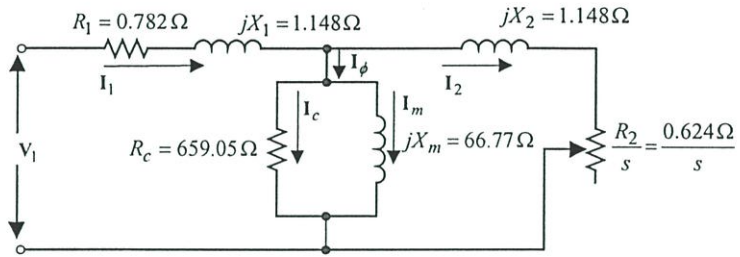


ข) แคทาลอกเทโก

รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบสมบูรณ์โดยใช้แนวทางที่ 1 พิกัดกำลัง 15 kW, 4-pole, 50 Hz.

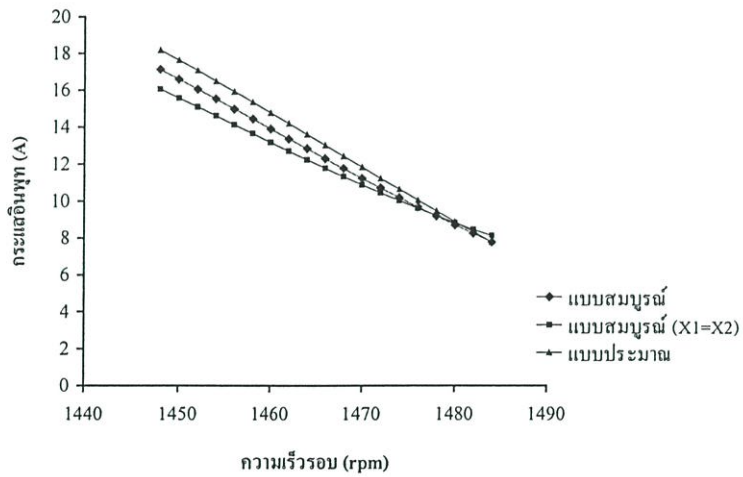


ก) แคทาลอกมิตซูบิชิ

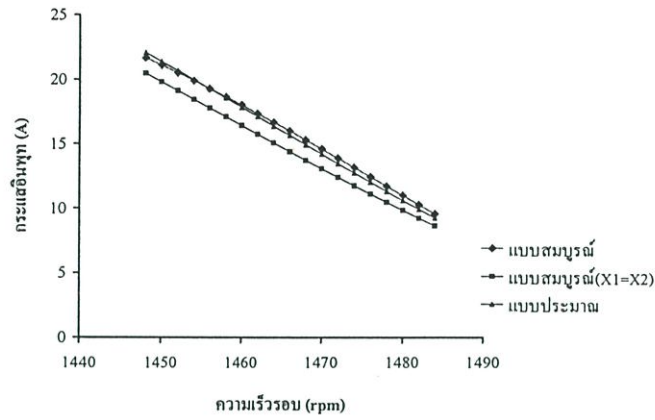


ข) แคทาลอกเทโก

รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบสมบูรณ์ กรณี ($X_1 = X_2$) โดยใช้แนวทางที่ 1 พิกัดกำลัง 15kW, 4-pole, 50Hz.

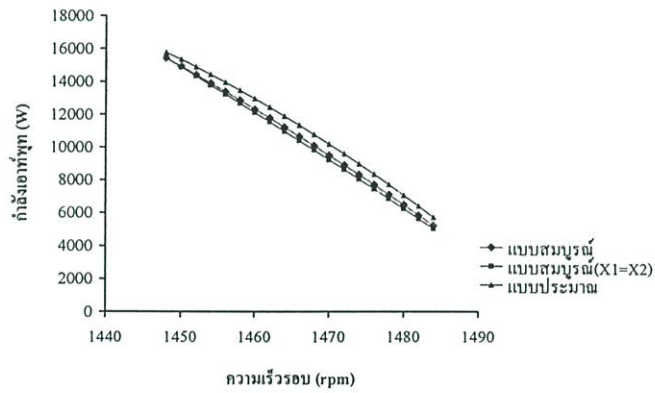


ก) แคทาลอกมิตซูบิชิ

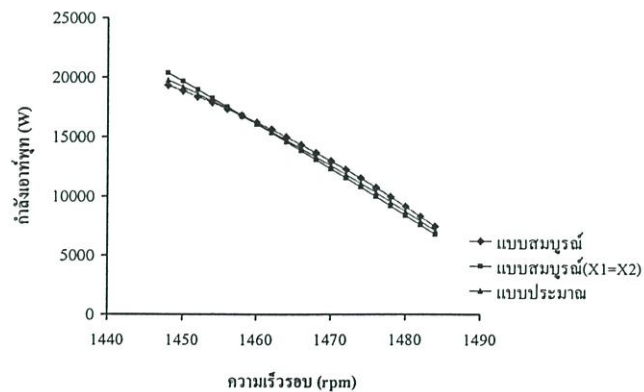


ข) แคทาลอกเทโก

รูปที่ 5.4 สมรรถนะกระแสไฟฟ้าโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ฟัดกำลัง 15 kW, 4-pole, 50 Hz.

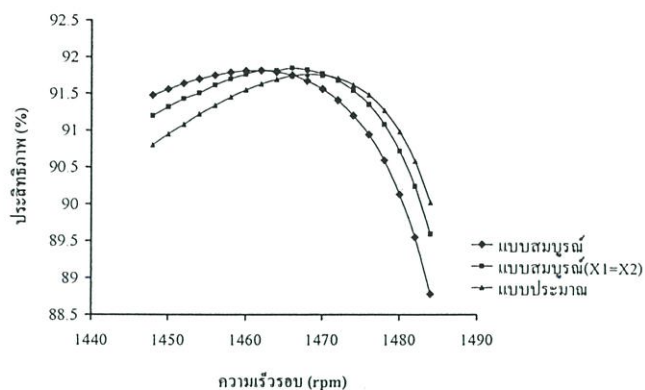


ก) แคทาลอกมิตซูบิชิ

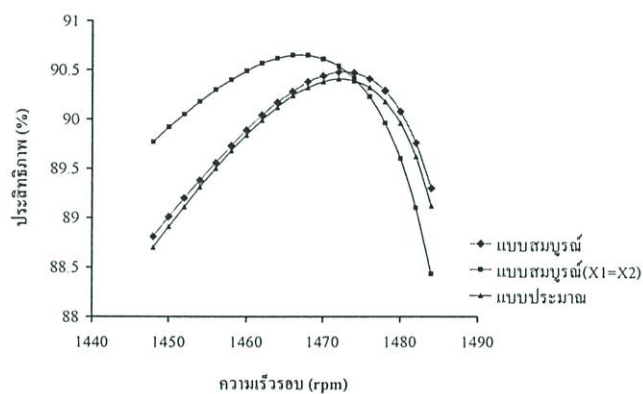


ข) แคทาลอกเทโก

รูปที่ 5.5 สมรรถนะกำลังเอาต์พุตโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ฟัดกำลัง 15 kW, 4-pole, 50 Hz



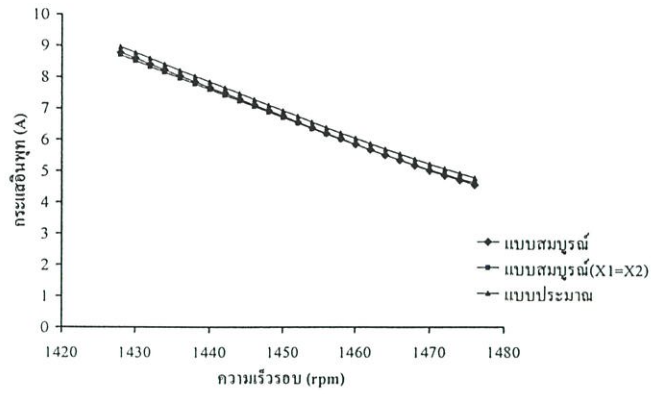
ก) แททาลอกमितซูบิชิ



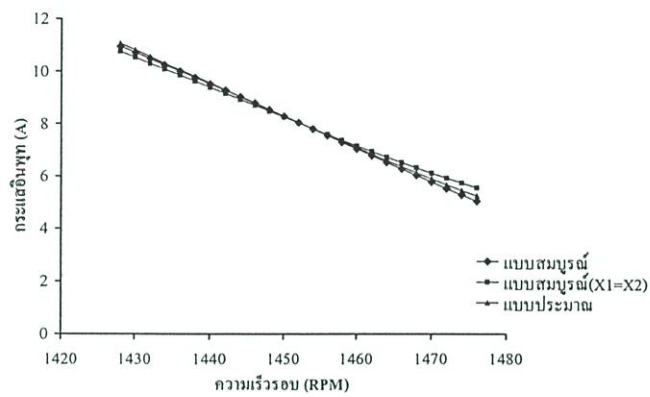
ข) แททาลอกเทโก

รูปที่ 5.6 สมรรถนะประสิทธิภาพโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์พิกัดกำลัง 15 kW, 4-pole, 50 Hz.

ผลการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 7.5 กิโลวัตต์ แสดงดังรูปที่ 5.7 ถึง 5.9 และที่พิกัด 37 กิโลวัตต์ แสดงดังรูปที่ 5.10 ถึง 5.12 โดยใช้ข้อมูลจากแททาลอกผู้ผลิตमितซูบิชิ และเทคโก ซึ่งสามารถทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายได้

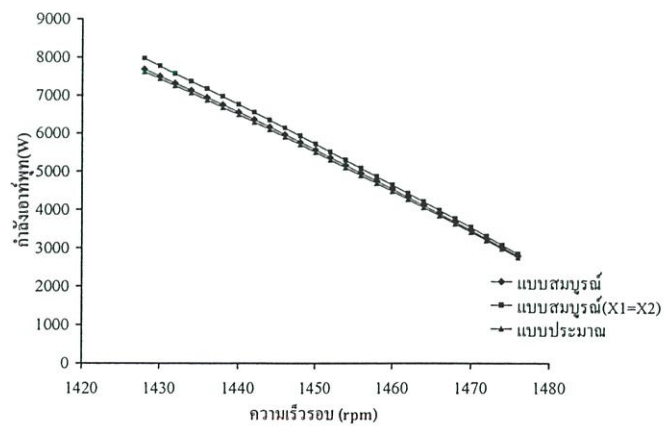


ก) แคทาลอกमितซูบิชิ

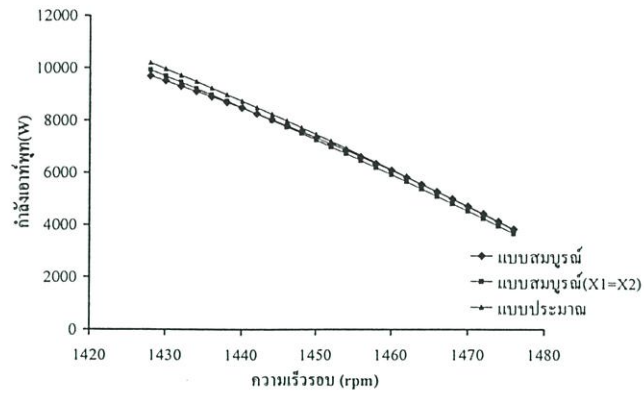


ข) แคทาลอกเทคโก

รูปที่ 5.7 สมรรถนะกระแสไฟฟ้าโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ฟัดกำลัง 7.5 kW, 4-pole, 50Hz.

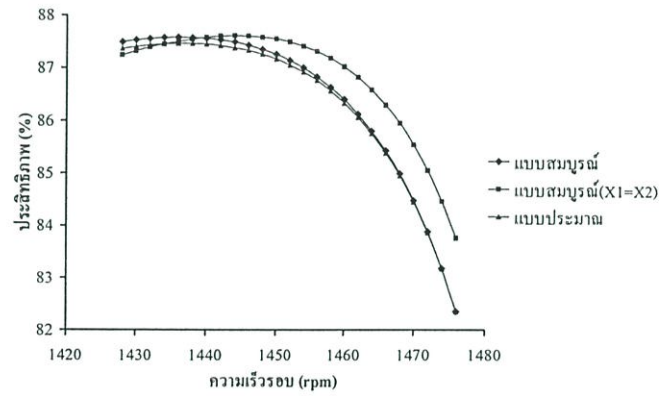


ก) แคทาลอกमितซูบิชิ

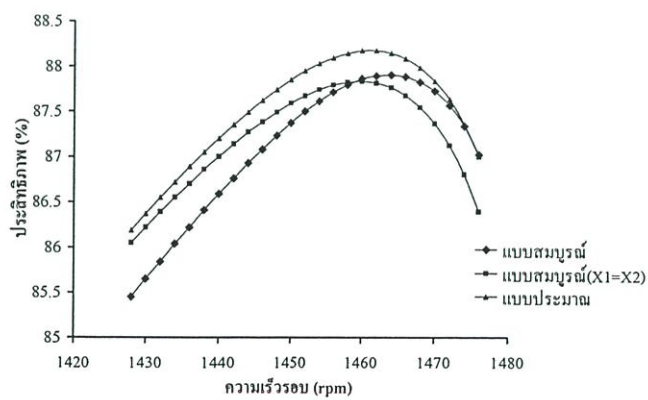


ข) แคทาลอกเทคโนโลยี

รูปที่ 5.8 สมรรถนะกำลังเอาต์พุตโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ฟิสิกส์กำลัง 7.5kW, 4pole, 50Hz

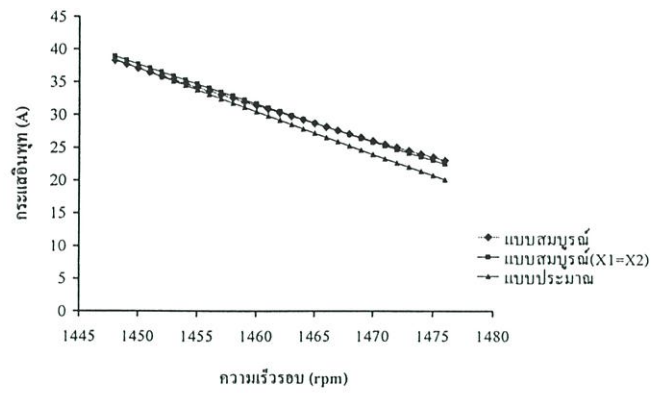


ก) แคทาลอกมิติซูบิซี

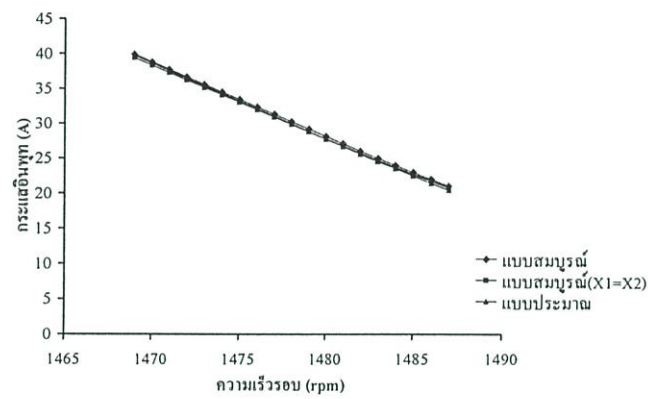


ข) แคทาลอกเทคโนโลยี

รูปที่ 5.9 สมรรถนะประสิทธิภาพโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ฟิสิกส์กำลัง 7.5 kW, 4-pole, 50Hz.

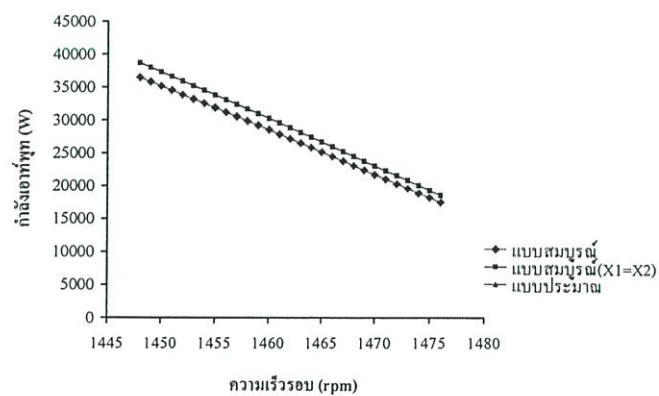


ก) แคทาลอกमितซูบิชิ

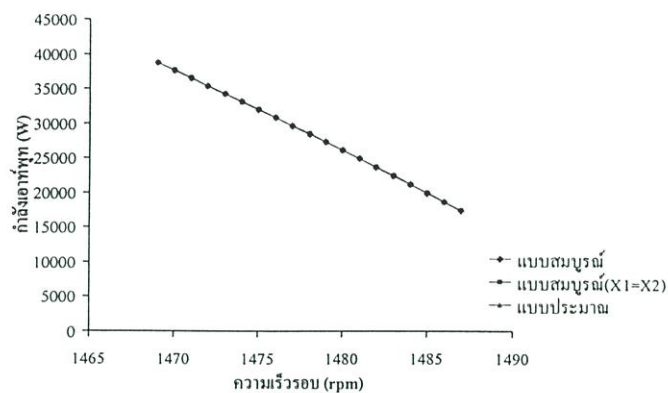


ข) แคทาลอกเทค โก

รูปที่ 5.10 สมรรถนะกระแสอินพุทโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ฟัดกำลัง 37 kW, 4-pole, 50Hz.

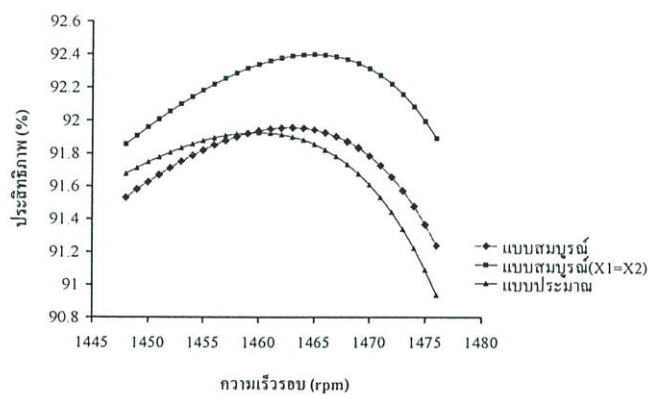


ก) แคทาลอกमितซูบิชิ

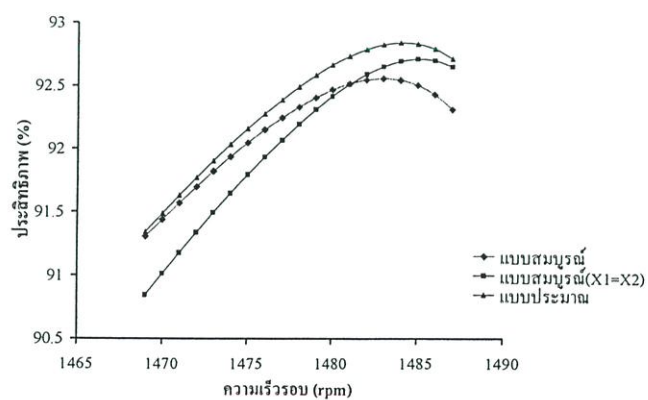


ข) แคทาลอกเทคโนโลยี

รูปที่ 5.11 สมรรถนะกำลังเอาต์พุตโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ฟัดกำลัง 37 kW, 4-pole, 50Hz



ก) แคทาลอกมิติซูบิซี



ข) แคทาลอกเทคโนโลยี

รูปที่ 5.12 สมรรถนะประสิทธิภาพโดยใช้แนวทางที่ 1 ของมอเตอร์ฟัดกำลัง 37 kW, 4-pole, 50Hz

ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะกระแสไฟฟ้าอินพุท กำลังเอาต์พุทและประสิทธิภาพที่พิกัดต่าง ๆ ของข้อมูลบริษัทผู้ผลิตมิถซูบิชิแสดงดังภาคผนวก ก.1.5 ถึง 1.7 และของเทคโนโลยีภาคผนวก ข.1.5 ถึง ข.1.7 ของมอเตอร์ที่พิกัด 380 V, 15, 7.5 และ 37 kW, 4-pole, 50Hz. ที่ภาระทางกลต่าง ๆ (65%, 85%) แสดงดังตารางที่ 5.3 ถึง 5.8

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50 Hz ใช้ข้อมูลจากแคทาล็อกมิถซูบิชิโดยแนวทางที่ 1

ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสไฟฟ้าอินพุทที่ระบุ (A)		28.70	-	22.40	-	16.90
ทำนาย	ประมาณ	30.53	25.59	22.53	19.45	16.38
	สมบูรณ์	29.20	24.07	22.68	18.54	16.77
ทำนาย	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	26.96	22.81	21.59	18.09	16.99
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	6.37	-	0.58	-	-3.07
	สมบูรณ์	1.74	-	1.25	-	-0.76
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-6.06	-	-3.61	-	0.53
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		15000	-	11250	-	7500
ทำนาย	ประมาณ	15341	13461	11211	9584	7709.5
	สมบูรณ์	15180	12864	11497	9497.1	7706.3
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	14880	12663	11245	9802	7739.4
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	2.27	-	-0.34	-	2.79
	สมบูรณ์	1.20	-	2.19	-	2.75
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.80	-	-0.044		3.19

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.0	-	92.0	-	91.0
ทำนาย	ประมาณ	90.94	91.55	91.65	91.71	91.27
	สมบูรณ์	91.52	91.79	91.80	91.56	90.91
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	91.32	91.70	91.83	91.82	91.45
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.06	-	-0.38	-	0.27
	สมบูรณ์	0.52	-	-0.20	-	-0.09
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.32	-	-0.17	-	0.45

ตารางที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50 Hz ใช้ข้อมูลจากแคตตาล็อกเทคโนโลยี แนวทางที่ 1 * จากการคำนวณ

ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสไฟฟ้าอินพุตที่ ระบุ (A)		28.30		22.74 *		16.50 *
ทำนาย	ประมาณ	28.37	24.59	22.70	19.58	16.59
	สมบูรณ์	28.3009	25.28	22.16	20.29	17.19
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	26.10	23.78	20.92	19.22	15.48
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	0.24	-	-0.17	-	0.54
	สมบูรณ์	0.0031	-	-2.55	-	4.18
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-7.77	-	-8.0	-	-6.18

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาต์พุตที่ระบุ (W)		15000	-	11250	-	7500
ทำนาย	ประมาณ	14738	12589	11394	9517.6	7484.50
	สมบูรณ์	14683	12980	11127	9945.9	7868.9
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	14597	13084	11155	9976.4	7164.7
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-1.74	-	1.28	-	-0.20
	สมบูรณ์	-2.11	-	-1.09	-	4.91
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.68	-	-0.84	-	-4.47
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		90.50	-	90.50	-	89.0
ทำนาย	ประมาณ	90.13	90.38	90.35	90.18	89.39
	สมบูรณ์	90.23	90.44	90.45	90.29	89.55
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	90.62	90.65	90.48	90.23	88.79
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.37	-	-0.15	-	0.39
	สมบูรณ์	-0.27	-	-0.05	-	0.55
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.12	-	-0.02	-	-0.21

ตารางที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ฟัด 380 V, 7.5 kW, 4-pole, 50 Hz ใช้ข้อมูลจากแคทาลอกมิตซูบิชิ แนวทางที่ 1.

ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุตที่ระบุ (A)		16.10	-	13.10	-	10.50
ทำนาย	ประมาณ	15.48	13.92	12.64	11.60	10.04
	สมบูรณ์	15.72	13.97	12.90	11.67	10.32
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	15.15	13.3	12.10	11.36	10.30

ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-3.85	-	-3.51	-	-4.38
	สมบูรณ์	-2.36	-	-1.52	-	-1.71
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-5.90	-	-7.63	-	1.90
กำลังเอาท์พุทที่ระบุ (W)		7500	-	5625	-	3750
ทำนาย	ประมาณ	7577	6333.1	5506.1	4890.5	3818.7
	สมบูรณ์	7477.6	6365.2	5197.1	4863.3	3614.5
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	7315.3	6404.5	5861.6	4839.4	3954.5
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	1.02	-	-2.11	-	1.832
	สมบูรณ์	-0.29	-	-7.60	-	-3.61
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.46	-	4.20	-	5.45
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		88.0	-	88.0	-	84.0
ทำนาย	ประมาณ	87.40	87.42	86.95	86.76	85.17
	สมบูรณ์	85.53	87.53	87.26	86.63	85.43
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	87.33	87.61	87.46	87.18	86.14
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.60	-	-1.05	-	1.17
	สมบูรณ์	-2.47	-	-0.74	-	1.43
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.67	-	-0.54	-	2.14

ตารางที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 380 V, 7.5 kW, 4-pole, 50 Hz ใช้ข้อมูลจากแคทาล็อกเทคโนโลยี แนวทางที่ 1 * จากการคำนวณ

ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		15.20	-	11.84 *	-	9.26 *
ทำนาย	ประมาณ	14.58	12.66	11.60	10.59	9.05
	สมบูรณ์	14.34	12.60	11.27	10.42	8.71
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	14.49	12.76	11.63	10.92	9.61
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-4.07	-	-2.02	-	-2.26
	สมบูรณ์	-5.65	-	-4.81	-	-5.93
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-4.67	-	-1.52	-	3.77
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		7500	-	5625	-	3750
ทำนาย	ประมาณ	7586.5	6391.5	5633.3	4985.4	3803.5
	สมบูรณ์	7342.7	6344.8	5550.1	4996.7	3839.4
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	7374.4	6191.9	5374.3	4816.1	3668.1
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	1.15	-	0.14	-	1.42
	สมบูรณ์	-2.09	-	-1.33	-	2.38
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.67	-	-4.45	-	-2.18
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		87.50	-	88.50	-	86.50
ทำนาย	ประมาณ	87.79	88.14	88.05	87.98	86.99
	สมบูรณ์	87.38	87.79	87.92	87.82	87.04
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	87.54	87.82	87.76	87.54	86.39
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	0.29	-	-0.45	-	0.49
	สมบูรณ์	-0.12	-	-0.58	-	0.54
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.04	-	-0.74	-	-0.11

ตารางที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 380 V, 37 kW, 4-pole, 50Hz. ใช้ข้อมูลจากแคทาลอกมิตซูบิชิ แนวทางที่ 1

ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
37 kW						
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		56.10	-	43.10	-	32.0
ทำนาย	ประมาณ	56.27	50.66	44.99	39.38	32.82
	สมบูรณ์	53.22	48.53	42.38	37.60	31.02
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	55.49	49.46	42.29	37.60	30.74
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	0.30	-	4.38	-	2.56
	สมบูรณ์	-5.13	-	-1.67	-	-3.06
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.08	-	-1.87	-	-3.93
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		37000	-	27750	-	18500
ทำนาย	ประมาณ	33666	31448	27435	24423	17800
	สมบูรณ์	34907	31572	26010	24340	20460
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	39477	31779	26860	24869	18818
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-9.01	-	-1.13	-	-3.78
	สมบูรณ์	-5.65	-	-6.27	-	10.59
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	6.69	-	-3.20	-	1.71
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		92.0	-	92.0	-	91.0
ทำนาย	ประมาณ	91.74	91.917	91.83	91.73	91.08
	สมบูรณ์	91.57	91.819	91.94	91.92	91.57
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	91.97	92.285	92.38	92.36	92.02
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.26	-	-0.17	-	0.08
	สมบูรณ์	-0.43	-	-0.09	-	0.57
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.03	-	0.38	-	1.02

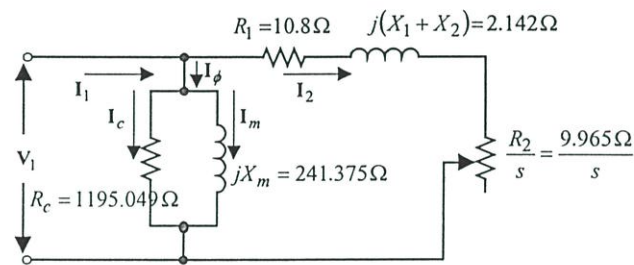
ตารางที่ 5.8 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ฟีด 380 V, 37 kW, 4-pole, 50 Hz ใช้ข้อมูลจากแคทาล็อกเทคโนโลยี * จากการคำนวณ

ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		72.0	-	52.98 *	-	36.99 *
ทำนาย	ประมาณ	66.92	57.44	49.82	46.17	37.06
	สมบูรณ์	67.23	57.93	50.53	46.89	38.08
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	64.52	57.15	50.66	46.28	37.77
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-7.05	-	-5.96	-	0.18
	สมบูรณ์	-6.625	-	-4.62	-	2.94
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-10.38	-	-4.37	-	2.10
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		37000	-	27750	-	18500
ทำนาย	ประมาณ	37434	31985	27034	24891	18657
	สมบูรณ์	37683	32013	27297	24878	18655
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	36811	32039	27851	24929	18829
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	1.17	-	-2.58	-	0.84
	สมบูรณ์	1.84	-	0.97	-	0.026
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.51	-	0.36	-	1.77
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.50	-	92.50	-	92.50
ทำนาย	ประมาณ	91.21	92.15	92.31	92.73	92.60
	สมบูรณ์	91.43	92.04	92.40	92.51	92.42
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	91.07	91.79	92.21	92.50	92.66
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.29	-	-0.19	-	0.10
	สมบูรณ์	-0.07	-	-0.10	-	-0.08
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.43	-	-0.29	-	0.16

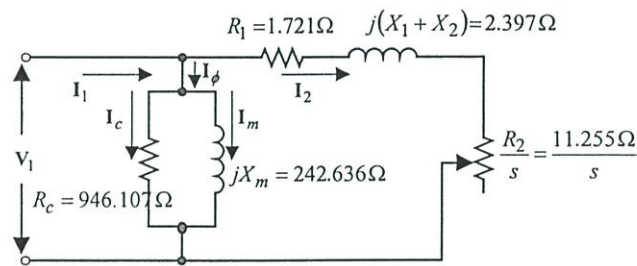
ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังตารางที่ 5.3 ถึง 5.8 จากการใช้ชุดข้อมูลผู้ผลิตมิถุนาและเทคโกที่พิกัด 15, 7.5, และ 37 กิโลวัตต์ 4-pole, 50 Hz.แนวทางที่ 1 เมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดจากการทำนายทางด้านค่าของกระแสไฟฟ้าอินพุตมีความผิดพลาดประมาณ 3% กำลังเอาต์พุตมีความผิดพลาดประมาณ 1% และค่าความผิดพลาดค่าประสิทธิภาพประมาณ 1% ซึ่งถือว่ายอมรับได้

5.3 การทดสอบหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้แนวทางที่ 2

การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแนวทางที่ 2 นี้ใช้ข้อมูล 3 ชุดที่ภาระโหลดใด ๆ แต่ละชุดประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบ โดยใช้ชุดข้อมูลจากการทดสอบงานจริง แสดงดังภาคผนวก ก.1 ถึง ก.2 ชุดข้อมูลจากการทดสอบขณะรับภาระทางกลสามารถนำมาหาค่าพารามิเตอร์โดยวิธีจันติกอัลกอริทึมโดยอ้างอิงวงจรสมมูลแบบประมาณกรณี (R_1 , ทดสอบ) แบบประมาณกรณี (R_1 , ตัวแปร) แบบสมบูรณ์ (R_1 , ทดสอบ) และแบบสมบูรณ์กรณี (R_1 , ตัวแปร) พารามิเตอร์ที่ได้จากวงจรสมมูลแสดงดังภาคผนวก ก.3 ตัวอย่างการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่พิกัด 0.75 และ 5.5 kW, 4-pole, 50 Hz. (มีตชูปิซี) แสดงดังรูปที่ 5.13 ถึง 5.16

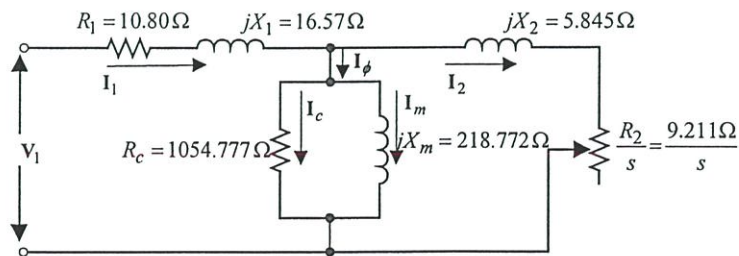


ก) R_1 , ทดสอบ

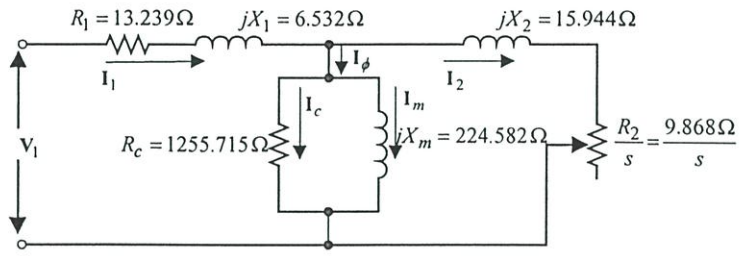


ข) R_1 , ตัวแปร

รูปที่ 5.13 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบประมาณ โดยใช้แนวทางที่ 2 ที่พิกัด 0.75 kW, 4-pole, 50 Hz.

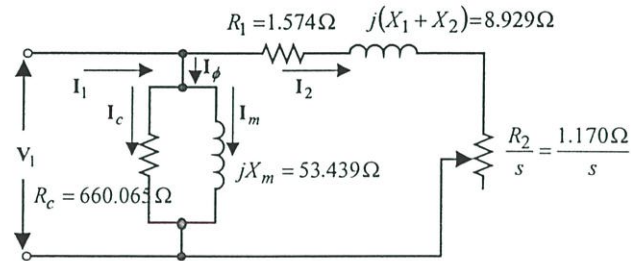


ก) R_1 , ทดสอบ

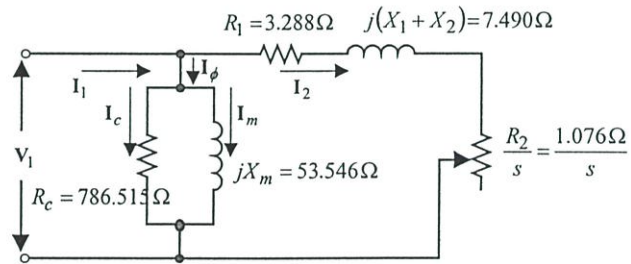


ข) R_1 , ตัวแปร

รูปที่ 5.14 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบสมบูรณ์โดยใช้แนวทางที่ 2 ที่พิกัด 0.75 kW, 4-pole, 50Hz.

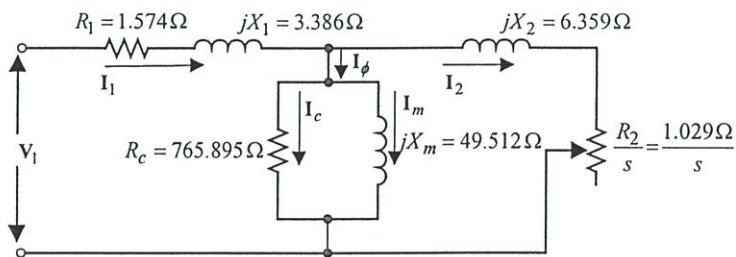


ก) R_1 , ทดสอบ

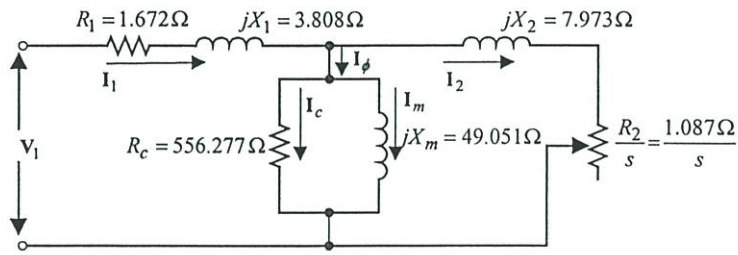


ข) R_1 , ตัวแปร

รูปที่ 5.15 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบประมาณโดยใช้แนวทางที่ 2 ที่พิกัด 5.5 kW, 4-pole, 50Hz.



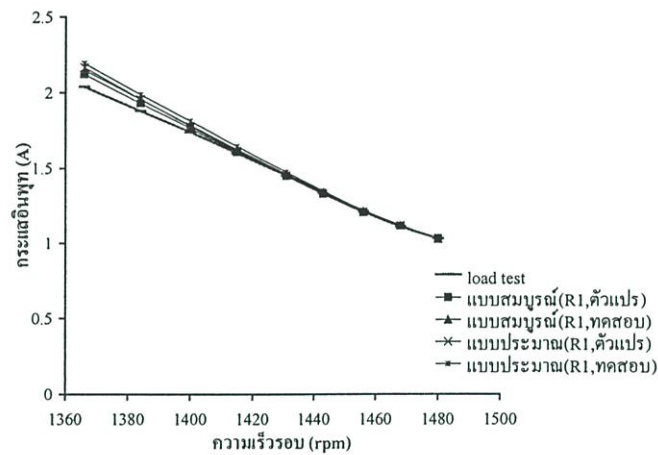
ก) R_1 , ทดสอบ



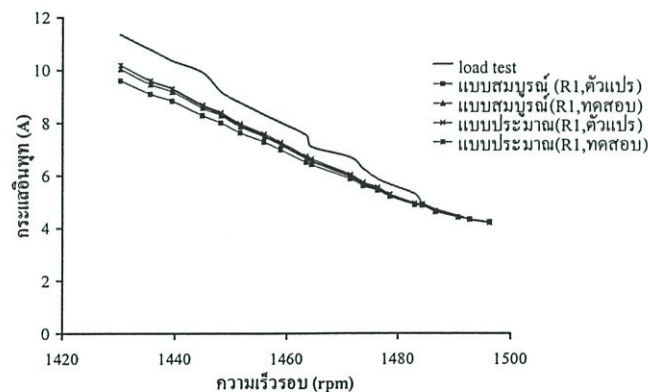
ข) R_1 , ตัวแปร

รูปที่ 5.16 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบสมบูรณ์โดยใช้แนวทางที่ 2 ที่พิกัด 5.5 kW, 4-pole, 50Hz.

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาสมรรถนะของมอเตอร์ทางด้านกระแสไฟฟ้า อินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า กำลังเอาต์พุตและประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 5.17 ถึง 5.20

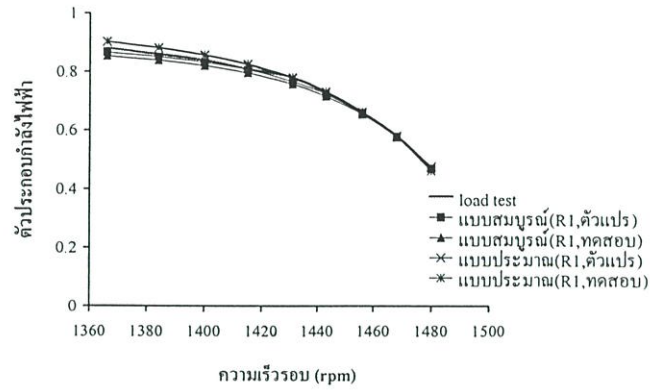


ก) พิกัด 0.75 kW, 4-pole, 50 Hz.

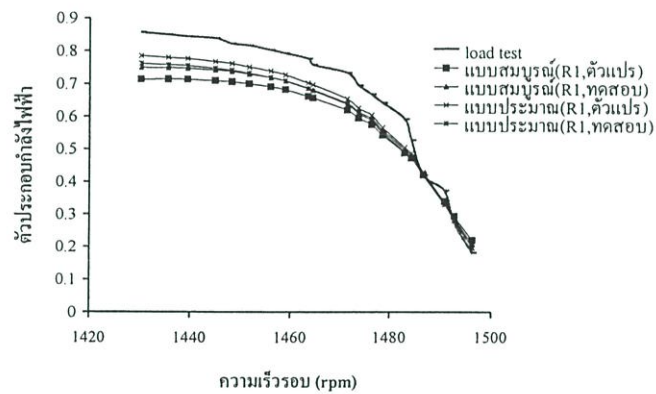


ข) พิกัด 5.5 kW, 4 pole, 50 Hz.

รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบสมรรถนะกระแสอินพุตโดยใช้แนวทางที่ 2

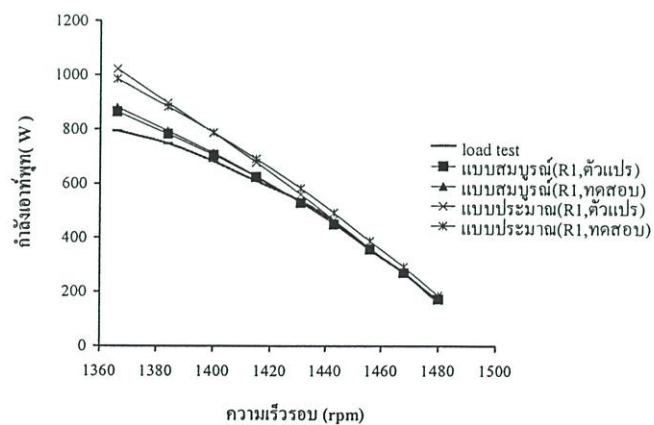


ก) พิกัด 0.75 kW, 4-pole ,50 Hz.

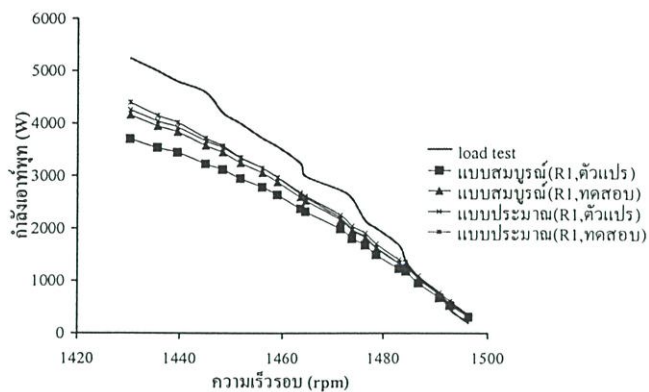


ข) พิกัด 5.5 kW,4-pole, 50 Hz.

รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบสมรรถนะตัวประกอบกำลังไฟฟ้าโดยใช้แนวทางที่ 2

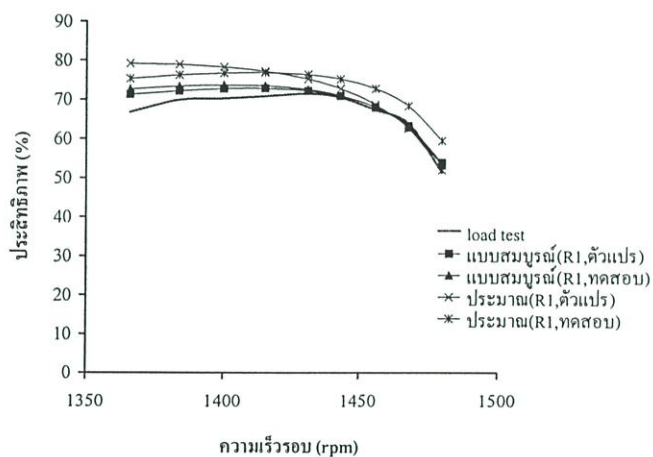


ก) พิกัด 0.75 kW,4-pole , 50 Hz

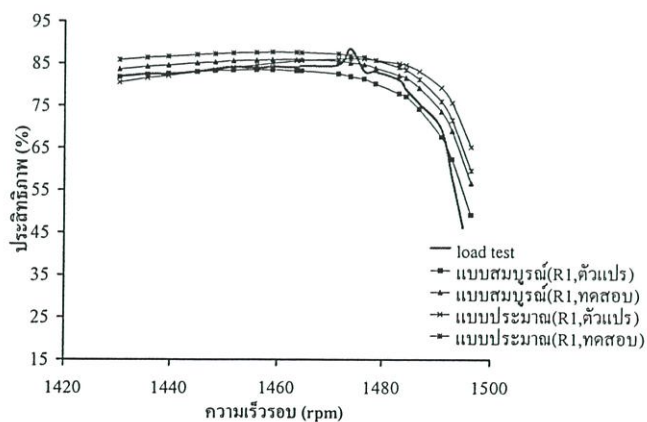


ข) พิกัด 5.5 kW, 4-pole, 50 Hz

รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบสมรรถนะกำลังเอาต์พุต โดยใช้แนวทางที่ 2



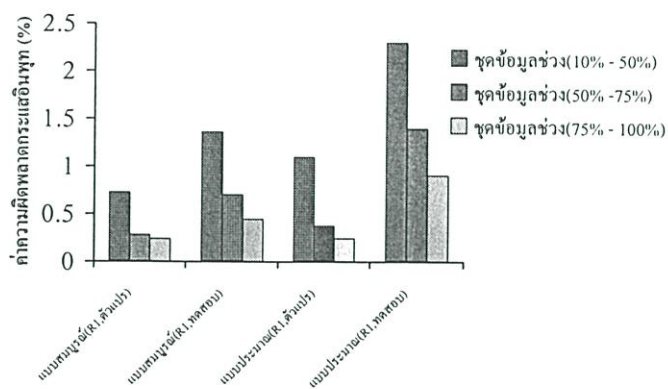
ก) พิกัด 0.75 kW, 4-pole, 50 Hz.



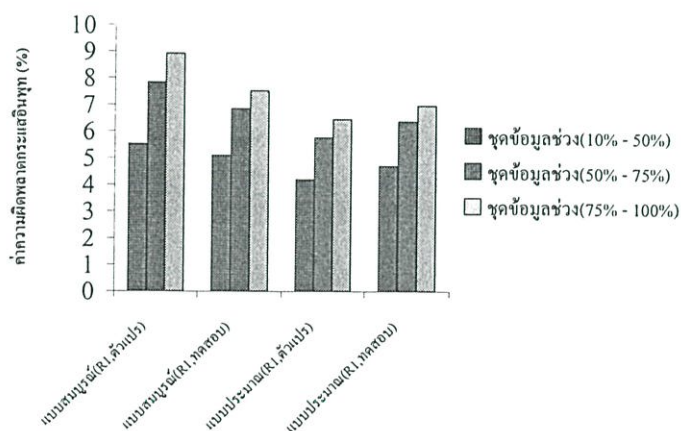
ข) พิกัด 5.5 kW, 4 pole, 50 Hz

รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบสมรรถนะประสิทธิภาพใช้แนวทางที่ 2

การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของสมรรถนะมอเตอร์จากการทำนายโดยจีเน็ติก อัลกอริทึมกับชุดทดสอบงานจริงที่ภาระทางกลช่วง 10% - 100% ของทางด้านสมรรถนะ กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพ (ภาคผนวก ก.6 ถึง ก.7) แสดงด้วยรูปที่ 5.21 ถึง 5.23

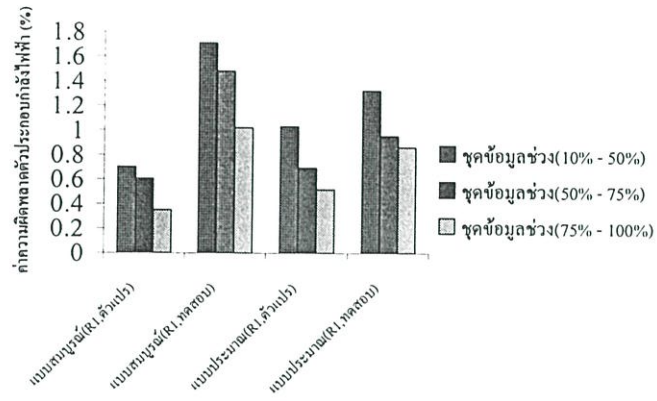


ก) พิกัดกำลัง 0.75 kW, 4-pole, 50 Hz.

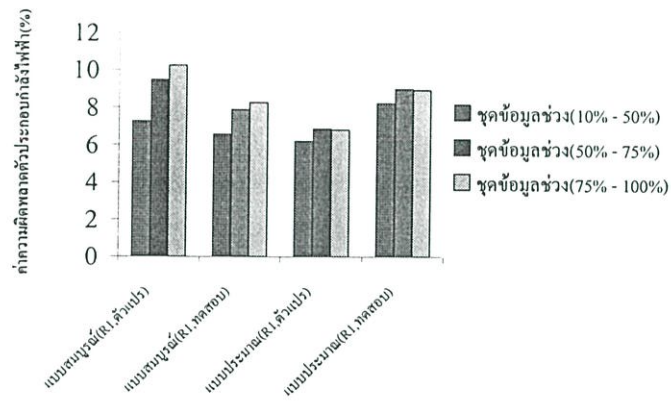


ข) พิกัดกำลัง 5.5 kW , 4-pole, 50 Hz.

รูปที่ 5.21 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของกระแสอินพุตใช้แนวทางที่ 2

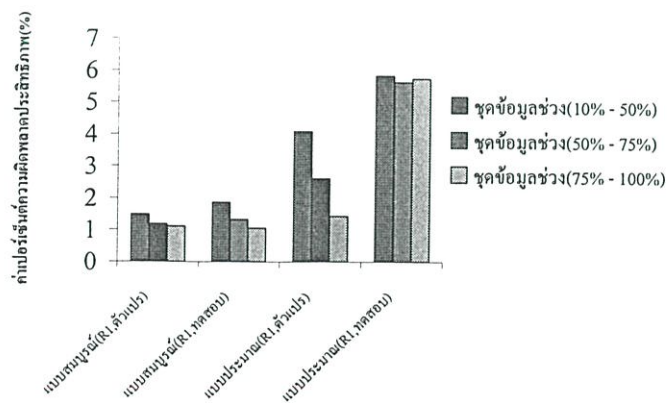


ก) พิกัดกำลัง 0.75 kW, 4-pole, 50 Hz.

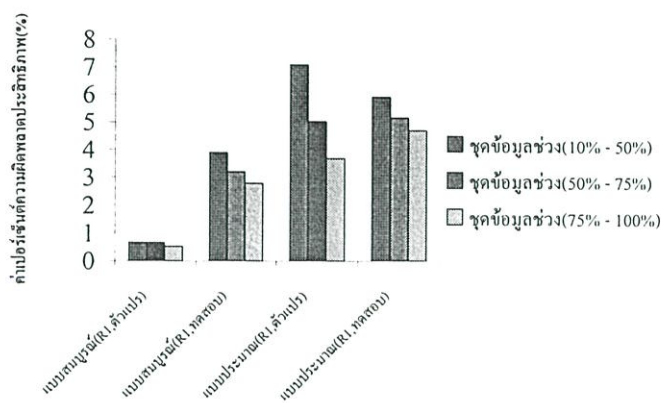


ข) พิกัดกำลัง 5.5 kW, 4-pole, 50 Hz.

รูปที่ 5.22 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใช้แนวทางที่ 2



ก) พิกัดกำลัง 0.75 kW 4-pole, 50 Hz.



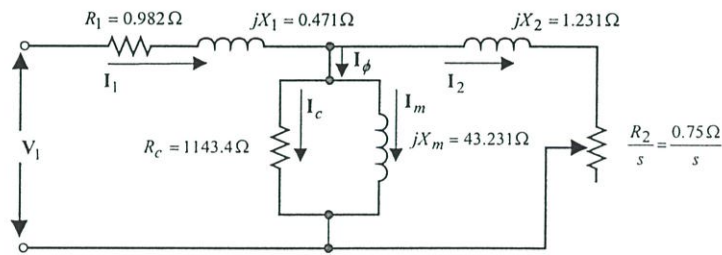
ข) พิกัดกำลัง 5.5 kW, 4-pole, 50 Hz.

รูปที่ 5.23 ค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของประสิทธิภาพใช้แนวทางที่ 2

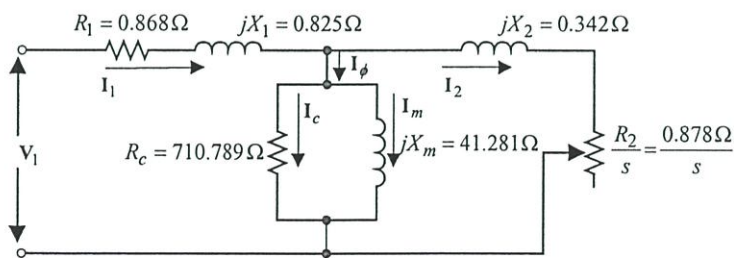
จากรูปที่ 5.21 ถึง 5.23 เมื่อพิจารณาผลค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของสมรรถนะมอเตอร์จากการทำนายโดยวิธีจันติกอัคริมเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลการทดสอบงานจริงที่พิกัดกำลัง 0.75 และ 5.5 kW ทางด้านกระแสไฟฟ้าอินพุตมีค่าประมาณ 1% และ 5% ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าประมาณ 1% และ 7% และประสิทธิภาพค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ใช้วงจรสมมูลแบบสมบูรณ์ที่พิกัด 0.75 และ 5.5 kW มีค่าประมาณ 2% และวงจรสมมูลแบบประมาณ มีค่าประมาณ 5% ตามลำดับซึ่งถือว่ายอมรับได้

5.4 การทดสอบหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้แนวทางที่ 3

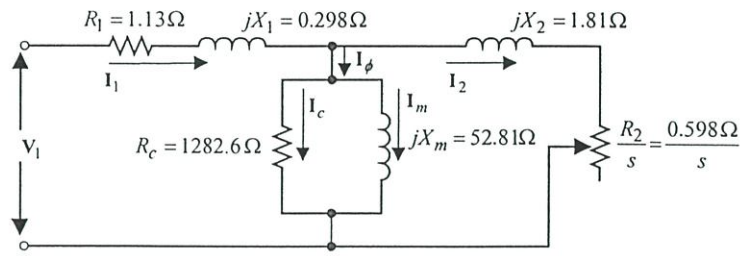
การทำนายสมรรถนะโดยแนวทางที่ 3 นี้ใช้ข้อมูล 2 จุดโดยจุดที่ 1 ที่ภาระทางกล 100 % ประกอบด้วยค่าแรงดัน กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและแรงบิดที่พิกัด จุดที่ 2 ที่แรงบิดสูงสุด โดยใช้ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พิกัด 400 โวลต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz. จากแคทาล็อกบริษัทผู้ผลิตซีเมนต์ แสดงดังภาคผนวก ง.1.1 ถึง ง.1.3 และที่พิกัด 380 โวลต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz มิตซูบิชิ แสดงดังภาคผนวก ก.1.1 ถึง ก.1.3 และเทค โท ภาคผนวก ข.1.1 ถึง ข.1.3 โดยอ้างอิงวงจรสมมูลแบบสมบูรณ์ และแบบสมบูรณ์กรณีค่า ($X_1 = X_2$) ซึ่งประมวลผลด้วยจินตคณิตอัลกอริทึมค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ได้จากข้อมูลแคทาล็อกผู้ผลิตซีเมนต์แสดงดังภาคผนวก ง.1.4 ของมิตซูบิชิแสดงดังภาคผนวก ง.1.5 และเทค โทแสดงดังภาคผนวก ง.1.6 ตัวอย่างการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์พิกัดกำลัง 15 กิโลวัตต์ แสดงดังรูปที่ 5.24 และ 5.25 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวงจรสมมูลสามารถนำมาทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ทางด้านกระแสไฟฟ้าอินพุต กำลังเอาต์พุต และประสิทธิภาพที่พิกัด 400 โวลต์ 15, 7.5 และ 37 กิโลวัตต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz. ของชุดข้อมูลแคทาล็อกผู้ผลิตซีเมนต์ แสดงดังรูปที่ 5.26 ถึง 5.28 และที่พิกัด 380 โวลต์ 15 กิโลวัตต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz. ของชุดข้อมูลแคทาล็อกมิตซูบิชิและเทค โท แสดงดังรูปที่ 5.29 ถึง 5.31



ก) แคทาล็อกซีเมนต์

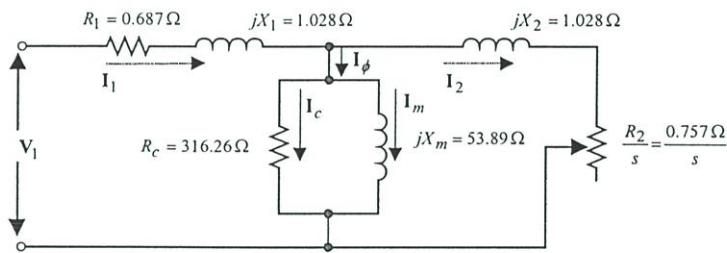


ข) แคทาล็อกมิตซูบิชิ

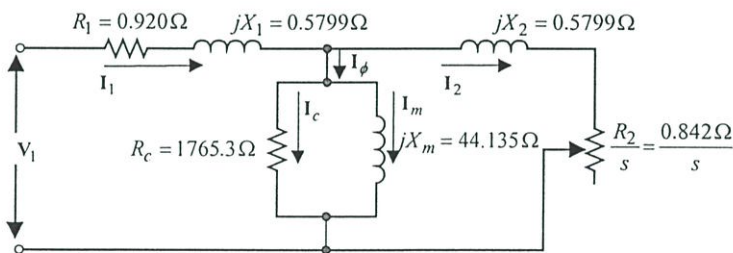


ค) แคทาลอกเทโก

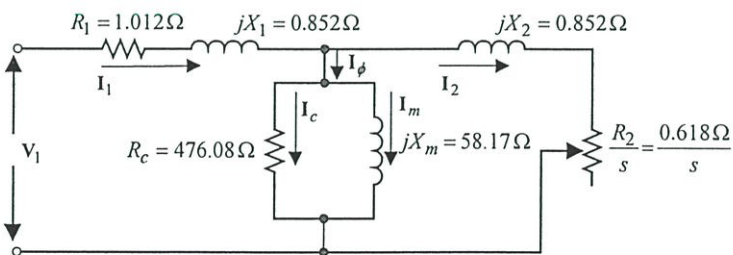
รูปที่ 5.24 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบสมบูรณ์โดยใช้แนวทางที่ 3 ที่พิกัด 15 kW, 4-pole, 50Hz.



ก) แคทาลอกซีเมนต์

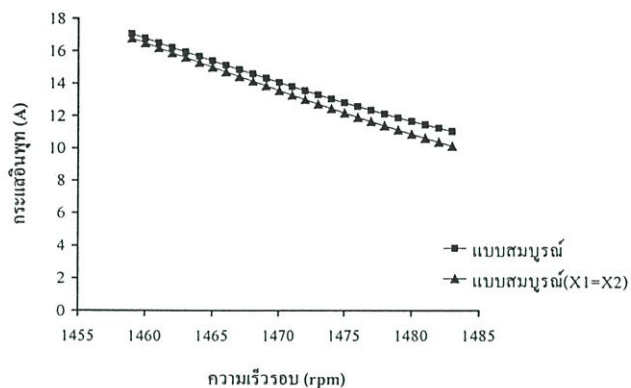


ข) แคทาลอกमितซูบิชิ

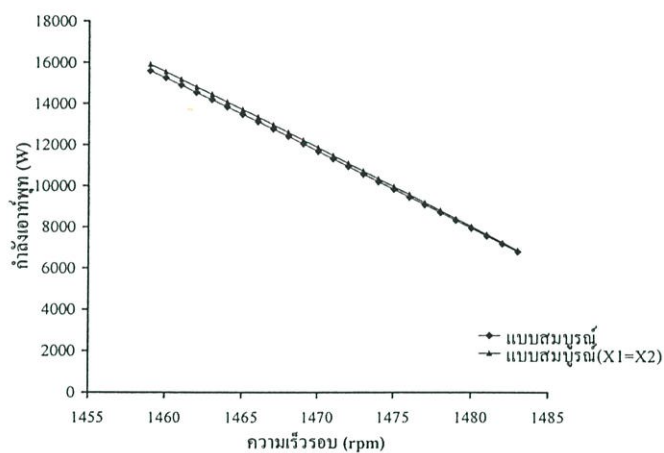


ค) แคทาลอกเทคโก

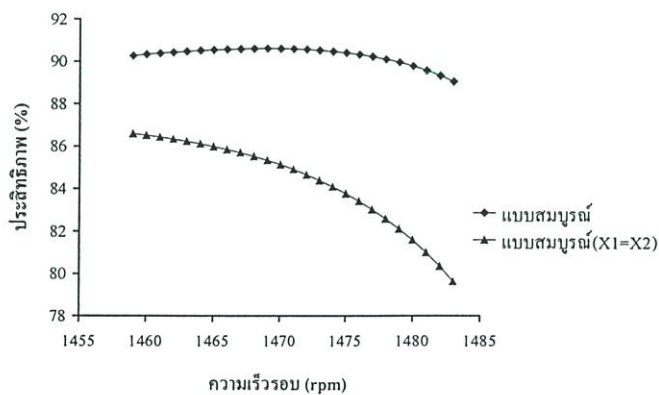
รูปที่ 5.25 วงจรสมมูลไฟฟ้าแบบสมบูรณ์กรณี ($X_1 = X_2$) โดยใช้แนวทางที่ 3 ที่พิกัด 15 kW ,
4-pole, 50 Hz .



ก) กระแสอินพุท

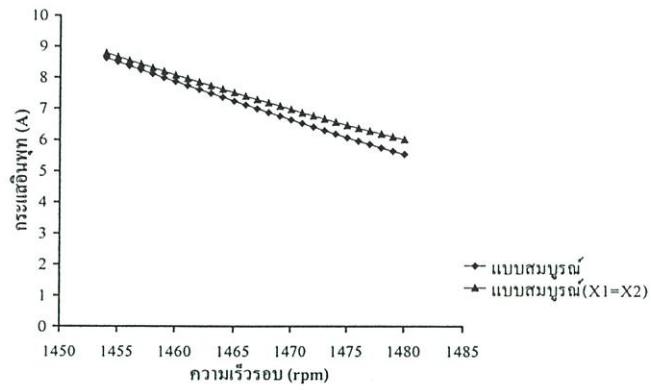


ข) กำลังเอาต์พุท

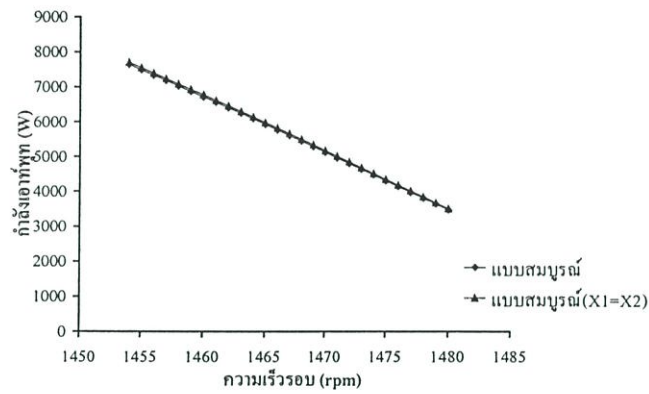


ค) ประสิทธิภาพ

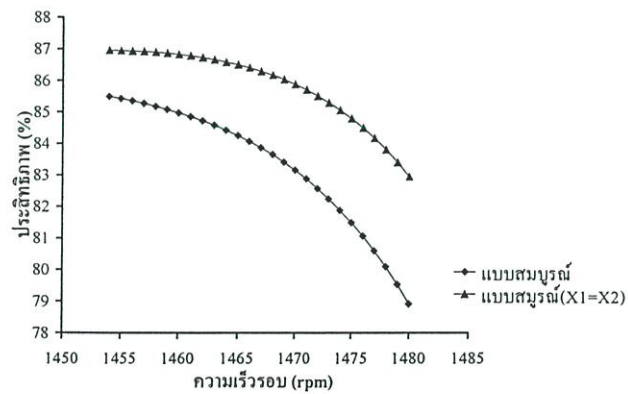
รูปที่ 5.26 การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์โดยใช้แนวทางที่ 3 ที่พิกัด 15kW, 4-pole, 50Hz.
แคลคูลอกซิเมนต์



ก) กระแสอินพุท

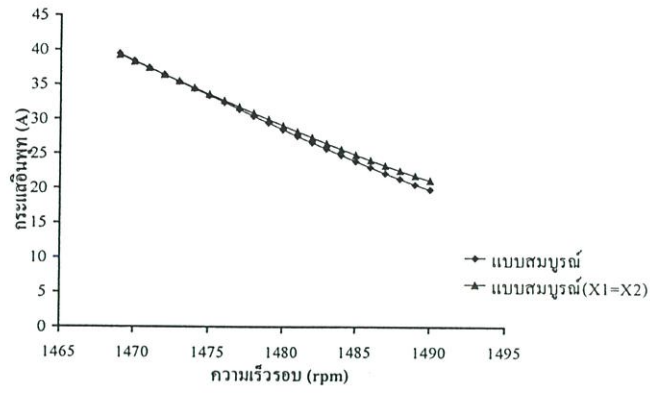


ข) กำลังเอาต์พุท

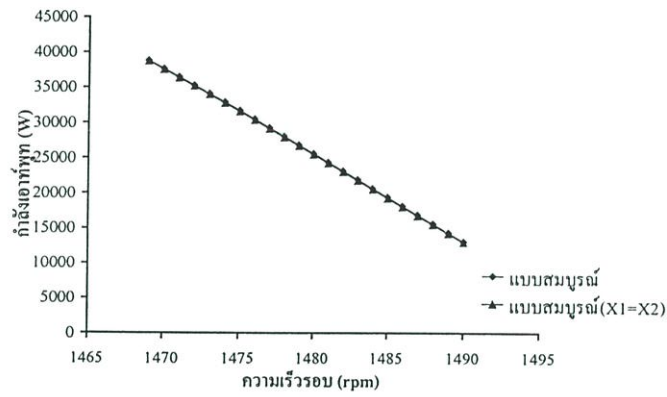


ค) ประสิทธิภาพ

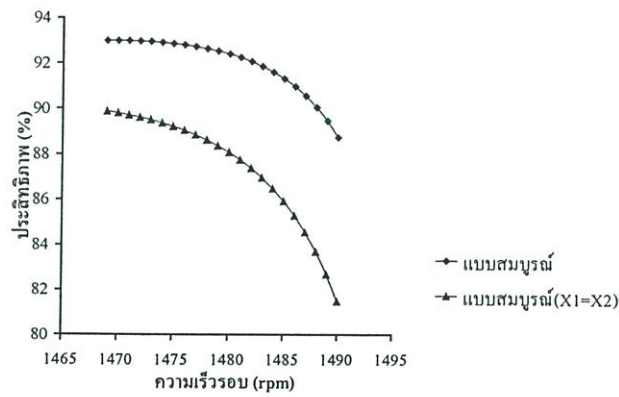
รูปที่ 5.27 การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์โดยใช้แนวทางที่ 3 ที่พิกัด 7.5 kW, 4-pole, 50Hz.
แคลคูลอกซิเมนต์



ก) กระแสอินพุท

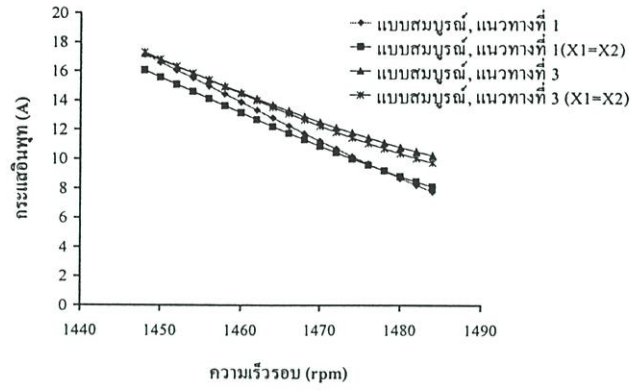


ข) กำลังอาทพุท

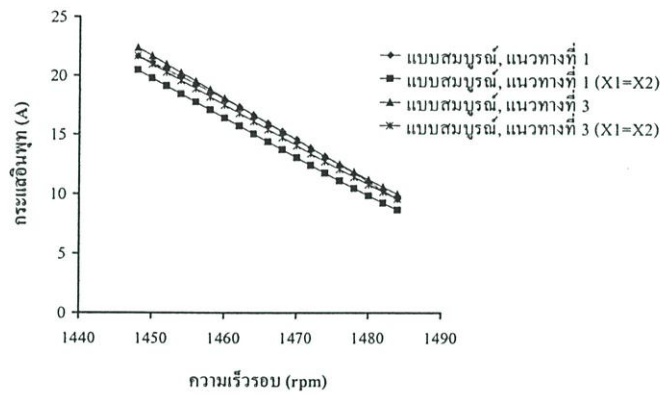


ค) ประสิทธิภาพ

รูปที่ 5.28 การทำนายสมรรถนะประสิทธิภาพโดยใช้แนวทางที่ 3 ที่พิกัด 37 kW, 4-pole, 50Hz.
แคทาลอกซิเมนต์

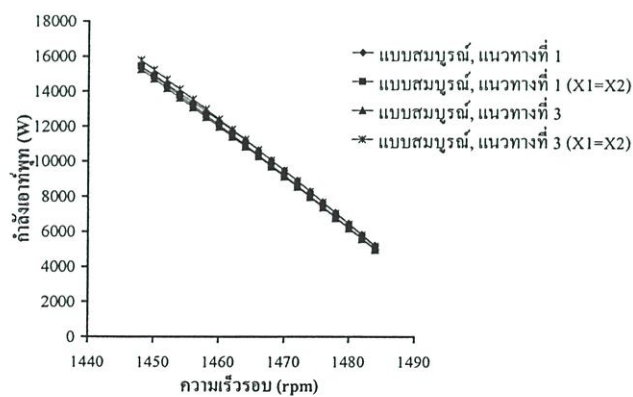


ก) แคะทาลอกमितซูบิชิ

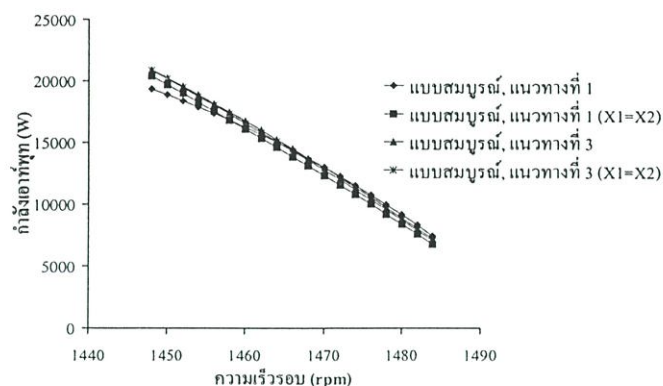


ข) แคะทาลอกเทค โโก

รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกระแสอินพุทโดยใช้แนวทางที่ 1 กับ แนวทางที่ 3 ที่พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50Hz.

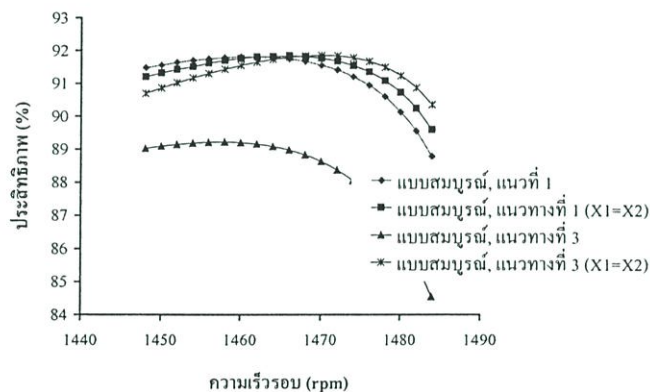


ก) แคะทาลอกमितซูบิชิ

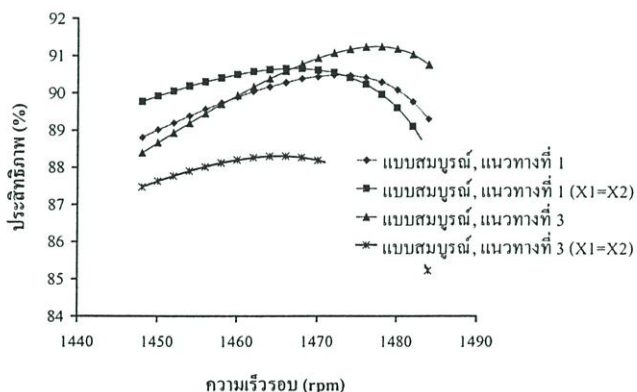


ข) แคทาลอกเทคโนโลยี

รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกำลังเอาต์พุตโดยใช้แนวทางที่ 1 กับ แนวทางที่ 3 ที่พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50Hz.



ก) แคทาลอกमितซูบิชิ



ข) แคทาลอกเทคโนโลยี

รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะประสิทธิภาพโดยใช้แนวทางที่ 1 กับ แนวทางที่ 3 ที่พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50Hz.

ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ภาระทางกลต่าง ๆ (50%, 65%, 75%, 85%) ที่พิกัด 400 V, 15, 7.5 และ 37 kW, 4-pole, 50 Hz. ของแคทาล็อกผู้ผลิตซีเมนต์แสดงดังภาคผนวก ง.2.1 ถึง ง.2.3 แสดงดังตารางที่ 5.9 ถึง 5.11 และที่พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50 Hz. ของแคทาล็อกมิตซูบิชิแสดงดังภาคผนวก ง.3.1 ถึง ง.3.3 และเทคโกแสดงดังภาคผนวก ง.4.1 ถึง ง.4.3 แสดงดังตารางที่ 5.12.

ตารางที่ 5.9 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 400 V, 15 kW, 4-pole, 50 Hz, ใช้ข้อมูลแคทาล็อกบริษัทซีเมนต์ แนวทางที่ 3

		15kW				
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุตที่ระบุ (A)		28.50	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	28.57	25.72	23.90	22.16	19.81
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	27.52	24.49	22.51	20.61	18.35
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	0.24	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-3.43	-	-	-	-
กำลังเอาต์พุตที่ระบุ (W)		15000	-	11250	-	7500
ทำนาย	สมบูรณ์	14901	12772	11318	9834.9	7558.7
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	14822	12610	11108	9583.7	7647.3
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.66	-	0.60	-	0.78
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.18	-	-1.26	-	1.96
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		90.0	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	90.37	90.58	90.584	90.40	89.57
ทำนาย	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	86.34	85.52	84.66	83.41	80.99
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	0.37	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-3.66	-	-	-	-

ตารางที่ 5.10 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์พิกัด 400 V, 7.5 kW, 4-pole, 50 Hz, ใช้ข้อมูลแคทาล็อกบริษัทซีเมนต์ แนวทางที่ 3

7.5 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		15.10	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	14.71	13.18	12.10	11.09	9.94
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	14.80	13.39	12.62	11.70	10.56
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-2.58	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.98	-	-	-	-
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		7500	-	5625	-	3750
ทำนาย	สมบูรณ์	7489.4	6404.7	5610.6	4800.7	3808.3
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	7400.3	6307.2	5667.3	4851.8	3681.8
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.14	-	-0.25	-	1.55
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.32	-	0.75	-	-1.81
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		87.50	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	85.49	84.72	83.87	82.57	80.08
ทำนาย	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	86.95	86.66	86.29	85.51	83.39
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-2.01	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.55	-	-	-	-

ตารางที่ 5.11 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ พิกัด 400 V, 37 kW, 4-pole, 50 Hz, ใช้ข้อมูลแคทาล็อกบริษัทซิเมนต์ แนวทางที่ 3

		37 kW				
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุตที่ระบุ (A)		66.0	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	66.57	57.83	52.68	47.69	39.83
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	66.35	58.19	53.43	48.82	41.61
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	0.86	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.53	-	-	-	-
กำลังเอาต์พุตที่ระบุ (W)		37000	-	27750	-	18500
ทำนาย	สมบูรณ์	37664	31750	28112	24437	18178
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	37548	31566	27922	24237	18004
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.79	-	1.30	-	-1.74
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	1.48	-	0.61	-	-2.68
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		92.90	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	92.98	92.85	92.63	92.25	90.96
ทำนาย	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	89.80	89.21	88.62	87.75	85.29
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	0.08	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-3.10	-	-	-	-

ตารางที่ 5.12 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50 Hz, แนวทางที่ 3

แคทาลอกมิตซูบิชิ						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		28.70	-	22.40	-	16.90
ทำนาย	สมบูรณ์	28.99	25.94	24.47	22.37	19.83
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	28.30	25.84	23.48	21.23	19.19
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.01	-	9.24	-	17.33
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.39	-	4.82	-	13.55
แคทาลอกเทคโก						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		28.30	-	22.74 *	-	16.59 *
ทำนาย	สมบูรณ์	28.87	25.20	22.81	20.48	17.26
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	27.91	24.36	22.03	19.77	16.57
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	2.01	-	0.30	-	4.03
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.37	-	-3.12	-	-0.12

ตารางที่ 5.12 (ต่อ)

แคทาลอกमितซูบิชิ						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาท์พุทที่ระบุ (W)		15000	-	11250	-	7500
ทำนาย	สมบูรณ์	14723	12537	11418	9709	7371.1
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	14686	12996	11262	9484.4	7663.6
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-1.84	-	1.49	-	-1.71
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.09	-	0.10	-	2.18
แคทาลอกเทคโโก						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาท์พุทที่ระบุ (W)		15000	-	11250	-	7500
ทำนาย	สมบูรณ์	15250	12950	11361	9726.5	7190.8
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	15044	12733	11147	9526.1	7026.8
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.66	-	0.98	-	-4.12
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.29	-	-0.91	-	-6.30
แคทาลอกमितซูบิชิ						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.0	-	92.0	-	91.0
ทำนาย	สมบูรณ์	89.09	89.21	89.15	88.82	87.63
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	91.017	91.43	91.73	91.86	91.67
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-1.91	-	-2.85	-	-3.37
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.017	-	-0.27	-	4.04

ตารางที่ 5.12 (ต่อ)

แคทาล็อกเทคโนโลยี						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		90.5	-	90.50	-	89.0
ทำนาย	สมบูรณ์	90.38	90.92	91.16	91.23	90.75
	สมบูรณ์ ($x_1 = x_2$)	88.29	88.19	87.87	87.23	85.22
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.12	-	0.66	-	1.75
	สมบูรณ์ ($x_1 = x_2$)	-2.21	-	-2.63	-	-3.78

จากตารางที่ 5.9 ถึง 5.11 เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะมอเตอร์ ที่พิกัด 400 V, 7.5, 15 และ 37 kW, 4-pole, 50 Hz. ของแคทาล็อกผู้ผลิตซีเมนส์ ค่าความผิดพลาดทางด้านกระแสไฟฟ้าอินพุต กำลังเอาต์พุต และประสิทธิภาพประมาณ 2 % และจากตารางที่ 5.12 ของข้อมูลแคทาล็อกผู้ผลิตมิตซูบิชิ ค่าความผิดพลาดทางด้าน กระแสไฟฟ้าอินพุต ประมาณ 5 % กำลังเอาต์พุตและประสิทธิภาพประมาณ 2 % และของแคทาล็อกผู้ผลิตเทคโนโลยีค่าความผิดพลาดทางด้านกระแสไฟฟ้าอินพุต กำลังเอาต์พุตและประสิทธิภาพประมาณ 2 %. ยกเว้นกรณีที่ภาระทางกล 50 % ของข้อมูลผู้ผลิตมิตซูบิชิค่าความผิดพลาดทางด้านกระแสไฟฟ้าอินพุตมากกว่า 10 %.

บทที่ 6

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจินตคณิตอัลกอริทึมแบบไบนารี โดยใช้ชุดข้อมูลแบ่งเป็น 3 แนวทาง โดยแนวทางที่ 1 กับแนวทางที่ 3 ใช้ชุดข้อมูลจากแคทาล็อกผู้ผลิตประกอบด้วยค่าแรงดัน กระแสอินพุท ตัวประกอบกำลัง แรงบิดที่พิกัด และแรงบิดสูงสุด แนวทางที่ 2 ใช้ชุดข้อมูลจากการทดสอบงานจริงประกอบด้วยค่าแรงดัน กระแสอินพุท ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบ ซึ่งอ้างอิงวงจรมูลแบบประมาณและแบบสมบูรณ์ ค่าพารามิเตอร์จากวงจรมูลสามารถนำมาคำนวณหาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำทางด้านกระแสไฟฟ้าอินพุท กำลังเอาต์พุท และประสิทธิภาพที่ภาระทางกลต่าง ๆ

6.1 สรุปการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ใช้ชุดข้อมูลแนวทางที่ 1 กับแนวทางที่ 3

กล่าวถึงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้ชุดข้อมูลแนวทางที่ 1 กับแนวทางที่ 3 ของแคทาล็อกบริษัทผู้ผลิตมิตซูบิชิและเทคโกทางด้านกระแสอินพุท กำลังเอาต์พุทและประสิทธิภาพที่พิกัด 380 โวลต์ 15 กิโลวัตต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz. แสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ใช้ชุดข้อมูลแนวทางที่ 1 กับแนวทางที่ 3

แนวทางที่ 1, แคทาล็อกมิตซูบิชิ						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		28.7	-	22.40	-	16.90
ทำนาย	ประมาณ	30.53	25.59	22.53	19.45	16.38
	สมบูรณ์	29.20	24.07	22.68	18.54	16.77
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	26.96	23.81	21.59	18.98	16.99
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	6.37	-	0.58	-	-3.07
	สมบูรณ์	1.74	-	1.25	-	-0.76
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-6.06	-	-3.61	-	0.53

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

แนวทางที่ 3						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสนินพุทที่ระบุ (A)		28.70	-	22.40	-	16.90
ทำนาย	สมบูรณ์	29.0	25.94	24.47	22.37	19.83
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	29.13	25.84	23.48	21.23	19.19
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.04	-	9.24	-	17.33
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	1.49	-	4.82	-	13.55
แนวทางที่ 1, แคทาลอกเทคโนโลยี *จากการคำนวณ						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสนินพุทที่ระบุ (A)		28.30	-	22.74	-	16.59
ทำนาย	ประมาณ	28.37	24.59	22.70	19.58	16.02
	สมบูรณ์	28.30088	25.28	22.16	20.299	17.19
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	26.10	23.78	20.92	19.22	15.48
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	0.24	-	-0.17	-	-3.43
	สมบูรณ์	0.0031	-	-2.55	-	3.61
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-7.77	-	-8.0	-	-6.69
แนวทางที่ 3						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสนินพุทที่ระบุ (A)		28.30	-	22.74 *	-	16.59 *
ทำนาย	สมบูรณ์	28.26	25.20	22.81	20.48	17.26
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	27.33	24.36	22.03	19.77	16.57
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.14	-	0.30	-	4.03
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-3.42	-	-3.12	-	-0.12

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

แนวทางที่ 1, แคทาลอกमितซูบิจิ						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาท์พุทที่ระบุ (W)		15000	-	11250	-	7500
ทำนาย	ประมาณ	14768	12825	10708	9682	7877.3
	สมบูรณ์	15309	12538	10852	9821.5	7719.3
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	15719	12815	11244	9649.6	7487.2
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-1.54	-	-4.81	-	5.03
	สมบูรณ์	2.06	-	-3.53	-	2.92
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	4.79	-	-0.053	-	-0.17
แนวทางที่ 3						
กำลังเอาท์พุทที่ระบุ (W)		15000	-	11250	-	7500
ทำนาย	สมบูรณ์	14723	12537	11418	9709	7371.1
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	14686	12996	11262	9484.4	7663.6
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-1.84	-	1.49	-	-1.71
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.09	-	0.10	-	2.18
แนวทางที่ 1, แคทาลอกเทคโก						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาท์พุทที่ระบุ (W)		15000	-	11250	-	7500
ทำนาย	ประมาณ	14738	12589	11394	9517.6	7484.5
	สมบูรณ์	14683	12980	11127	9945.9	7868.9
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	14597	13084	11155	9976.4	7164.7
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-1.74	-	1.28	-	-0.20
	สมบูรณ์	-2.11	-	-1.09	-	4.91
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.68	-	-0.84	-	-4.47

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

แนวทางที่ 3, แคทาลอกเทคโนโลยี						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาท์พุทที่ระบุ (W)		15000	-	11250	-	7500
ทำนาย	สมบูรณ์	15250	12950	11361	9726.5	7190.8
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	15044	12733	11147	9526.1	7026.8
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.66	-	0.98	-	-4.12
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.29	-	-0.91	-	-6.30
แนวทางที่ 1, แคทาลอกमितซูบิชิ						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.0	-	92.0	-	91.0
ทำนาย	ประมาณ	90.94	91.55	91.65	91.71	91.27
	สมบูรณ์	91.52	91.79	91.80	91.56	90.94
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	91.32	91.70	91.83	91.82	91.45
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.06	-	-0.35	-	0.27
	สมบูรณ์	0.52	-	-0.20	-	-0.06
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.32	-	-0.17	-	0.45
แนวทางที่ 3						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.0	-	92.0	-	91.0
ทำนาย	สมบูรณ์	89.09	89.21	89.15	88.82	87.63
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	91.017	91.43	91.73	91.86	91.67
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-1.91	-	-2.85	-	-3.37
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.017	-	-0.27	-	0.67

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

แนวทางที่ 1, แคนทาลอกเทคโนโลยี						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.50	-	90.50	-	89.0
ทำนาย	ประมาณ	90.13	90.38	90.35	90.18	89.39
	สมบูรณ์	90.23	90.44	90.45	90.29	89.55
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	90.62	90.65	90.48	90.23	88.79
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.37	-	-0.15	-	0.39
	สมบูรณ์	-0.27	-	-0.05	-	0.55
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.12	-	-0.02	-	-0.21
แนวทางที่ 3						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		90.5	-	90.50	-	89.0
ทำนาย	สมบูรณ์	90.381	90.92	91.16	91.23	91.75
	สมบูรณ์	88.29	88.19	87.87	87.23	85.22
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)					
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.119	-	0.66	-	2.75
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.21	-	-2.63	-	-3.78

จากตารางที่ 6.1 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัด 380 โวลต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz. ทางด้าน

กระแสอินพุทใช้ชุดข้อมูลของแคนทาลอกบริษัทผู้ผลิตมิติซูบิซิแนวทางที่ 1 ค่าความผิดพลาดประมาณ 3 % แนวทางที่ 3 ค่าความผิดพลาดมากกว่า 10% และของเทคโนโลยีแนวทางที่ 1 ค่าความผิดพลาดประมาณ 3% แนวทางที่ 3 ค่าความผิดพลาดประมาณ 3%

กำลังเอาท์พุทใช้ชุดข้อมูลของแคนทาลอกบริษัทผู้ผลิตมิติซูบิซิและเทคโนโลยีแนวทางที่ 1 ค่าความผิดพลาดประมาณ 2% แนวทางที่ 3 ค่าความผิดพลาดประมาณ 2 %

ประสิทธิภาพโดยใช้ข้อมูลแคนทาลอกบริษัทผู้ผลิตมิติซูบิซิและเทคโนโลยีแนวทางที่ 1 และแนวทางที่ 3 มีค่าความผิดพลาดประมาณ 2 %

6.2 สรุปเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ใช้ชุดข้อมูลแนวทางที่ 2

แนวทางนี้เป็นการการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ใช้ชุดข้อมูลจากการทดสอบงานจริงของชุดข้อมูลภาระทางกลใด ๆ 3 ชุด โดยนำชุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบงานจริงมาประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์โดยวิธีเจเนติกอัลกอริธึม ซึ่งอ้างอิงจากวงจรสมมูลแบบประมาณและแบบสมบูรณ์ พารามิเตอร์ที่ได้จากวงจรสมมูลสามารถนำมาคำนวณสมรรถนะของมอเตอร์ทางด้านกระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดสมรรถนะของมอเตอร์จากการทำนายเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลทดสอบงานจริงได้ข้อสรุปคือกระแสอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพมีค่าความผิดพลาดประมาณ 5%

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริธึมซึ่งใช้ชุดข้อมูล 3 แนวทาง โดยแนวทางที่ 1 กับแนวทางที่ 3 ใช้ชุดข้อมูลจากแคทาลอกบริษัทผู้ผลิตและแนวทางที่ 2 ใช้ชุดข้อมูลจากการทดสอบงานจริง นำชุดข้อมูลในแต่ละแนวทางประมวลผลด้วยโปรแกรมจาก MATLAB หาค่าพารามิเตอร์โดยอ้างอิงจากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณและแบบสมบูรณ์ ซึ่งพารามิเตอร์สามารถคำนวณหาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำทางด้าน กระแสอินพุต ประสิทธิภาพ กำลังเอาต์พุต ที่ภาระทางกลต่าง ๆ ได้ ประโยชน์ของการทำนาย เพื่อพิจารณาในการเลือกใช้มอเตอร์ของบริษัทผู้ผลิตต่าง ๆ ให้ได้ความเหมาะสมกับความต้องการและวางแผนในการประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตามการทำนายโดยใช้ชุดข้อมูลแคทาลอกบริษัทผู้ผลิต ความเชื่อถือได้ของข้อมูลจะขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต

6.3 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยหลักการที่เหมาะสมแบบสโตศาสตร์ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริธึมแบบไบนารีซึ่งบางกรณีผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่เหมาะสมกับวิธีดังกล่าวดังนั้นการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ในแต่ละแนวทางมีข้อเสนอแนะดังนี้

แนวทางที่ 1 กับแนวทางที่ 3 ซึ่งใช้ชุดข้อมูลจากแคทาลอกบริษัทผู้ผลิตต่าง ๆ โดยทำการวางแผนจัดการการใช้พลังงานในระยะยาวเช่นในงานทางด้านอุตสาหกรรมที่สร้างระบบขึ้นมาใหม่
แนวทางที่ 2 ใช้ชุดข้อมูลจากการทดสอบงานจริงที่ภาระโหลดสูง ๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motor and Generators*,
IEEE 112-1996, New York, 1995.
- [2] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, “เอกสารประกอบการสอน วิชา Electrical Machines”,
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] โกวิท มาศรัตน์. “เครื่องจักรกลไฟฟ้า” โครงการตำราวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
มหานคร, 2534.
- [4] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, “เอกสารประกอบการสอน วิชา Design Optimization for Electrical
Engineering”, คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] Ashok D. Belegundu., Tirupathi R. Chandrupatla. **Optimization Concepts and
Applications in Engineering**. New Jersey : Prentice-Hall. Inc. 1999.
- [6] Jasbir S. Arora. **Introduction to Optimum design**. New York : McGraw-Hill, Inc. 1989
- [7] Garret N. Vanderplaats. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design
with Applications**. New York : McGraw-Hill, Inc. 1984.
- [8] Mitsuo Gen., Runwei Cheng. **Genetic Algorithms & Engineering Design**. New York :
John Wiley & Sons, Inc. 1996
- [9] กาญจณี วงศ์วิภาพร 2541, “การจัดตารางสอนของโรงเรียนแบบอัตโนมัติโดยจีเนติก
อัลกอริทึม” , วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [10] David E. Goldberg. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine
Learning**. Reading, Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989
- [11] Zbigniew Michalewicz. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**.
3rd Ed. New York : Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1996.
- [12] Super Line Series: Induction Motors, MITSUBISHI ELECTRIC, Oriental Electric
Industry Company Limited
- [13] The Motor Expert 3-phase Induction Motors, TECO High Tech Tech.& Reliable, Teco
Electric & Machinery (Thai) Company Limited
- [14] Low-Voltage Three-Phase Motor, 1LA Squirrel-Cage Motor, SIEMENS.

ภาคผนวก ก.

ชุดข้อมูลแคทาล็อกผู้ผลิตมีดซูบิชิ ค่าพารามิเตอร์และการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนาย
สมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแนวทางที่ 1

ตารางที่ ก.1.1 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 2-pole, 50 Hz. มิตซูบิชิ (Mitsubishi)

Rated Power	0.75 kW	2.2kW	3.7kW	5.5kW	7.5kW	11kW
Current (A)	1.12	2.60	4.13	6.65	7.89	11.70
50% Load Efficiency (%)	81.0	82.0	86.0	85.0	90.0	89.0
Power Factor	0.63	0.79	0.79	0.74	0.80	0.80
Current (A)	1.54	3.42	5.53	8.69	10.8	15.80
75% Load Efficiency (%)	72.0	84.0	88.0	88.0	91.0	90.0
Power Factor	0.77	0.87	0.87	0.82	0.87	0.88
Current (A)	1.75	4.35	7.12	11.0	14.1	20.30
100% Load Efficiency (%)	76.0	85.0	88.0	88.0	91.0	90.0
Power Factor	0.86	0.90	0.90	0.86	0.89	0.91
Speed (r/min)	2830	2850	2890	2900	2900	2910
Full Load Torque (kg-m)	0.258	0.75	1.25	1.85	2.51	3.68
Pull Out Torque (% FLT)	321	323	287	264	274	292

ตารางที่ ก.1.1 (ต่อ)

Rated Power	15 kW	18.5kW	22kW	30kW	37kW
Current (A)	15.30	18.20	21.50	29.40	37.90
50% Load Efficiency (%)	93.0	92.0	91.0	91.0	92.0
Power Factor	0.80	0.84	0.85	0.85	0.81
Current (A)	21.0	25.20	30.20	41.4	52.20
75% Load Efficiency (%)	94.0	93.0	92.0	92.0	93.0
Power Factor	0.87	0.90	0.90	0.90	0.87
Current (A)	27.10	32.80	39.6	54.5	68.0
100% Load Efficiency (%)	93.0	92.0	92.0	91.0	93.0
Power Factor	0.90	0.93	0.92	0.92	0.89
Speed (r/min)	2910	2910	2910	2920	2920
Full Load Torque (kg-m)	5.02	6.19	7.36	10.0	12.30
Pull Out Torque (% FLT)	304	330	278	266	243

ตารางที่ ก.1.2 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz. มิตซูบิชิ (Mitsubishi)

Rated Power	0.75 kW	2.2kW	3.7kW	5.5kW	7.5kW	11kW
Current (A)	1.26	3.16	4.82	6.49	8.50	12.80
50% Load Efficiency (%)	74.0	80.0	85.0	83.0	85.0	90.0
Power Factor	0.61	0.66	0.68	0.77	0.79	0.73
Current (A)	1.51	3.95	6.20	8.94	11.70	16.90
75% Load Efficiency (%)	78.0	82.0	86.0	85.0	88.0	91.0
Power Factor	0.73	0.78	0.79	0.82	0.83	0.81
Current (A)	1.81	4.92	7.81	11.0	15.40	21.70
100% Load Efficiency (%)	78.0	83.0	86.0	86.0	88.0	91.0
Power Factor	0.80	0.82	0.83	0.84	0.84	0.85
Speed (r/min)	1400	1420	1420	1430	1430	1430
Full Load Torque (kg-m)	0.52	1.51	2.54	3.75	5.11	7.49
Pull Out Torque (% FLT)	275	268	289	238	238	245

ตารางที่ ก.1.2 (ต่อ)

Rated Power	15 kW	18.5kW	22kW	30kW	37kW
Current (A)	16.90	20.50	23.80	32.0	38.80
50% Load Efficiency (%)	91.0	90.0	89.0	91.0	91.0
Power Factor	0.75	0.76	0.79	0.78	0.79
Current (A)	22.40	27.40	32.30	43.10	52.10
75% Load Efficiency (%)	92.0	91.0	91.0	92.0	92.0
Power Factor	0.83	0.85	0.86	0.86	0.88
Current (A)	28.70	35.10	41.7	56.10	66.90
100% Load Efficiency (%)	91.0	91.0	91.0	92.0	92.0
Power Factor	0.87	0.89	0.89	0.89	0.91
Speed (r/min)	1450	1460	1460	1460	1450
Full Load Torque (kg-m)	10.08	12.34	14.68	20.01	24.85
Pull Out Torque (% FLT)	306	280	263	267	289

ตารางที่ ก.1.3 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V 6-pole, 50 Hz. มิตซูบิชิ (Mitsubishi)

Rated Power	0.75 kW	2.2kW	3.7kW	5.5kW	7.5kW	11kW
Current (A)	1.61	3.82	5.39	8.14	10.50	14.30
50% Load Efficiency (%)	71.0	82.0	84.0	86.0	86.0	89.0
Power Factor	0.50	0.53	0.62	0.60	0.63	0.66
Current (A)	1.82	4.47	6.64	10.0	13.10	18.40
75% Load Efficiency (%)	76.0	85.0	86.0	87.0	88.0	90.0
Power Factor	0.62	0.66	0.74	0.72	0.74	0.76
Current (A)	2.08	5.32	8.08	12.30	16.10	23.3
100% Load Efficiency (%)	78.0	84.0	86.0	87.0	88.0	90.0
Power Factor	0.70	0.75	0.81	0.78	0.80	0.80
Speed (r/min)	940	940	940	950	950	960
Full Load Torque (kg-m)	0.78	2.28	3.83	5.64	7.69	11.2
Pull Out Torque (% FLT)	252	266	230	234	208	204

ตารางที่ ก.1.3 (ต่อ)

Rated Power	15 kW	18.5kW	22kW	30kW	37kW
Current (A)	19.70	21.70	25.40	34.50	43.40
50% Load Efficiency (%)	90.0	90.0	91.0	93.0	92.0
Power Factor	0.64	0.72	0.72	0.71	0.70
Current (A)	24.90	28.0	33.80	45.90	57.0
75% Load Efficiency (%)	92.0	90.0	92.0	93.0	94.0
Power Factor	0.75	0.81	0.81	0.80	0.79
Current (A)	31.0	37.10	43.50	59.10	73.0
100% Load Efficiency (%)	91.0	90.0	90.0	92.0	92.0
Power Factor	0.80	0.84	0.85	0.84	0.83
Speed (r/min)	960	960	960	960	960
Full Load Torque (kg-m)	15.20	18.80	22.30	30.40	37.50
Pull Out Torque (% FLT)	267	213	234	224	251

ตารางที่ ก.1.4 ค่าพารามิเตอร์จากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ 4 ขั้วแม่เหล็กใช้ชุดข้อมูลแคทาลอกमितซูบิชิ แนวทางที่ 1

ขนาดพิกัด (กิโลวัตต์)	พารามิเตอร์ (โอห์ม)	แบบสมบูรณ์	แบบสมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	แบบประมาณ
0.75	R_1	24.08	25.81	24.0
	X_1	22.45	15.13	-
	X_2	31.392	15.13	-
	X_m	597.39	613.9	703.73
	R_2	30.77	30.89	31.34
	R_c	4838.8	4882.2	5419.4
	X_{eq}	-	-	94.431
7.5	R_1	1.0	1.665	1.0
	X_1	2.319	1.8	-
	X_2	9.39	1.8	-
	X_m	110	103.86	103.17
	R_2	2.38	2.3	2.44
	R_c	864	1042.5	909.81
	X_{eq}	-	-	8.08
11	R_1	0.17	1.121	0.274
	X_1	0.72	1.417	-
	X_2	8.812	1.417	-
	X_m	82.385	70.36	79.61
	R_2	1.631	1.786	1.71
	R_c	919.03	1756.5	955.78
	X_{eq}	-	-	4.642

ตารางที่ ก.1.4 (ต่อ)

ขนาดพิกัด (กิโลวัตต์)	พารามิเตอร์ (โอห์ม)	แบบสมบูรณ์	แบบสมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	แบบประมาณ
15	R_1	0.415	0.72	0.567
	X_1	0.340	1.251	-
	X_2	5.917	1.251	-
	X_m	68.16	56.70	77.27
	R_2	0.856	0.884	0.777
	R_c	806.65	1088.7	923.07
	X_{eq}	-	-	8.135
37	R_1	0.247	0.237	0.179
	X_1	0.218	0.845	-
	X_2	0.186	0.845	-
	X_m	23.50	25.906	42.74
	R_2	0.378	0.357	0.361
	R_c	419.41	431.929	325
	X_{eq}	-	-	0.482

ตารางที่ ก.1.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์
ใช้ชุดข้อมูลบริษัทแคทาลอกมิตซูบิชิ แนวทางที่ 1

0.75 kW, พิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz.						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสไฟฟ้าที่ระบุ (A)		1.81	-	1.51	-	1.26
ทำนาย	ประมาณ	1.83	1.60	1.49	1.40	1.22
	สมบูรณ์	1.78	1.56	1.491	1.40	1.27
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	1.76	1.58	1.47	1.38	1.266
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	1.10	-	-1.32	-	-3.17
	สมบูรณ์	-1.65	-	-1.25	-	0.79
7.5 kW, พิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz.						
กระแสไฟฟ้าที่ระบุ (A)		15.40	-	11.70	-	8.50
ทำนาย	ประมาณ	15.18	13.24	11.82	11.05	9.45
	สมบูรณ์	14.87	12.95	11.69	10.73	9.20
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	14.73	12.83	11.13	10.68	9.12
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-1.42	-	1.02	-	11.17
	สมบูรณ์	-3.44	-	-0.085	-	8.23
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-4.35	-	-4.87	-	7.29
15 kW, พิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz.						
กระแสไฟฟ้าที่ระบุ (A)		28.70		22.40		16.90
ทำนาย	ประมาณ	30.53	25.59	22.53	19.45	16.38
	สมบูรณ์	29.20	24.07	22.68	18.54	16.77
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	26.96	23.81	21.59	18.98	16.99
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	6.37	-	0.58	-	-3.07
	สมบูรณ์	1.74	-	1.25	-	-0.76
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-6.06	-	-3.61	-	0.53

ตารางที่ 1.5 (ต่อ)

37 kW., พิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz						
ภาระทางกล (%)	100	85	75	65	50	
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)	66.90	-	52.10	-	38.80	
ทำนาย	ประมาณ	64.25	55.07	49.36	43.70	35.92
	สมบูรณ์	65.19	56.30	53.41	46.88	42.46
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	65.33	56.94	51.83	46.71	40.25
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-3.96	-	-5.25	-	-7.42
	สมบูรณ์	-2.55	-	2.51	-	9.43
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.34	-	-0.51	-	3.73

ตารางที่ ก.1.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์ ใช้ชุดข้อมูลบริษัทเกาหลีกมิตซูบิชิ แนวทางที่ 1

0.75 kW, พิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz.						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		750	-	562.50	-	375
ทำนาย	ประมาณ	751.11	642.02	551.06	492.96	381.39
	สมบูรณ์	764.8	644.66	560.13	486.99	364.85
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	756.82	638.04	561.56	482.12	376.73
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	0.14	-	-2.03	-	1.70
	สมบูรณ์	1.97	-	-0.42	-	-2.70
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.90	-	-0.16	-	0.46
7.5 kW						
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		7500	-	5625	-	3750
ทำนาย	ประมาณ	7577	6333.1	5506.1	4890.5	3818.7
	สมบูรณ์	7477.6	6365.2	5197.1	4863.3	3614.5
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	7315.3	6404.5	5861.6	4839.4	3954.5
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	1.02	-	-2.11	-	1.832
	สมบูรณ์	-0.29	-	-7.60	-	-3.61
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.46	-	4.20	-	5.45
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.58	-	0.62	-	2.21
15 kW						
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		15000	-	11250	-	7500
ทำนาย	ประมาณ	14768	12825	10708	9682	7877.3
	สมบูรณ์	15309	12538	10852	9821.5	7719.3
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	15719	12815	11244	9649.6	7487.2

ตารางที่ ก.1.6 (ต่อ)

15 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-1.54	-	-4.81	-	5.03
	สมบูรณ์	2.06	-	-3.53	-	2.92
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	4.79	-	-0.053	-	-0.17
37 kW						
กำลังเอาต์พุตที่ระบุ (A)		37000	-	27750	-	18500
ทำนาย	ประมาณ	33666	31448	27435	24423	17800
	สมบูรณ์	34907	31572	26010	24340	20460
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	39477	31779	26860	24869	18818
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-9.01	-	-1.13	-	-3.78
	สมบูรณ์	-5.65	-	-6.27	-	10.59
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	6.69	-	-3.20	-	1.71

ตารางที่ ก.1.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายสมรรถนะประสิทธิภาพของมอเตอร์ ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกมิตซูบิชิ แนวทางที่ 1

พิกัด 380 V, 0.75 kW, 4-pole, 50 Hz						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		78.0	-	78.0	-	74.0
ทำนาย	ประมาณ	78.783	78.032	77.75	77.09	74.63
	สมบูรณ์	78.44	78.25	77.64	76.64	73.50
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	78.18	78.01	77.48	76.41	73.82
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	0.783	-	-0.25	-	0.63
	สมบูรณ์	0.44	-	-0.36	-	-0.50
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.18	-	-0.52	-	-0.18
7.5 kW						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		88.0	-	88.0	-	84.0
ทำนาย	ประมาณ	87.40	87.42	86.95	86.76	85.17
	สมบูรณ์	85.53	87.53	87.26	86.63	85.43
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	87.33	87.61	87.46	87.18	86.14
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.60	-	-1.05	-	1.17
	สมบูรณ์	-2.47	-	-0.74	-	1.43
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.67	-	-0.54	-	2.14

ตารางที่ ก.1.7 (ต่อ)

พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50 Hz						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.0	-	92.0	-	91.0
ทำนาย	ประมาณ	90.94	91.55	91.65	91.71	91.27
	สมบูรณ์	91.52	91.79	91.80	91.56	90.94
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	91.32	91.70	91.83	91.82	91.45
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.06	-	-0.35	-	0.27
	สมบูรณ์	0.52	-	-0.20	-	-0.06
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.32	-	-0.17	-	0.45
37 kW						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		92.0	-	92.0	-	91.0
ทำนาย	ประมาณ	91.74	91.917	91.83	91.732	91.08
	สมบูรณ์	91.57	91.819	91.94	91.925	91.57
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	91.97	92.285	92.38	92.367	92.02
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.26	-	-0.17	-	0.08
	สมบูรณ์	-0.43	-	-0.09	-	0.57
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.03	-	0.38	-	1.02

ภาคผนวก ข.

ชุดข้อมูลแคตาล็อกผู้ผลิตเทคโนโลยี ค่าพารามิเตอร์และการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนาย
สมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแนวทางที่ 1

ตารางที่ ข.1.1 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 2-pole, 50 Hz. แยกทาลอกผู้ผลิตเทโก (Teco) * จากกรคำนวณ

Rated Power	0.75 kW	2.2kW	3.7kW	5.5kW	7.5kW	11kW
Current (A)	1.02 *	2.64 *	4.20 *	6.02 *	8.38 *	11.77 *
50% Load Efficiency (%)	76.0	83.0	84.50	85.50	87.0	87.0
Power Factor	0.73	0.755	0.79	0.81	0.78	0.815
Current (A)	1.31 *	3.51 *	5.59 *	8.27 *	11.34 *	16.17 *
75% Load Efficiency (%)	79.0	84.50	86.50	87.50	88.50	88.50
Power Factor	0.82	0.84	0.87	0.865	0.85	0.875
Current (A)	1.70	4.60	7.36	11.10	14.50	21.30
100% Load Efficiency (%)	76.5	83.50	85.50	86.50	88.50	88.50
Power Factor	0.87	0.885	0.90	0.885	0.88	0.90
Speed (r/min)	2800	2845	2880	2905	2905	2940
Full Load Torque (kg-m)	0.259	0.765	1.26	1.874	2.499	3.703
Pull Out Torque (% FLT)	280	280	320	260	250	290

ตารางที่ ข.1.1 (ต่อ)

Rated Power	15 kW	18.5kW	22kW	30kW	37kW
Current (A)	14.37 *	17.73 *	22.49 *	29.11 *	36.75 *
50% Load Efficiency (%)	90.50	90.0	90.0	91.0	90.50
Power Factor	0.875	0.88	0.825	0.86	0.845
Current (A)	20.87 *	25.30 *	31.29 *	41.27 *	52.94 *
75% Load Efficiency (%)	91.0	91.0	91.50	92.0	91.0
Power Factor	0.90	0.915	0.875	0.90	0.875
Current (A)	27.70	35.20	41.30	54.20	70.80
100% Load Efficiency (%)	90.0	90.0	91.50	92.0	91.50
Power Factor	0.91	0.895	0.90	0.91	0.875
Speed (r/min)	2920	2930	2940	2920	2940
Full Load Torque (kg-m)	4.972	6.193	7.407	9.943	12.345
Pull Out Torque (% FLT)	260	290	250	240	210

ตารางที่ ข.1.2 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz. แยกทาลอกผู้ผลิตเทโค (Teco) * จากการคำนวณ

Rated Power	0.75 kW	2.2kW	3.7kW	5.5kW	7.5kW	11kW
Current (A)	1.53 *	3.40 *	5.23 *	7.67 *	9.26 *	12.34 *
50% Load Efficiency (%)	68.50	79.0	84.50	83.0	86.50	89.0
Power Factor	0.54	0.62	0.65	0.655	0.71	0.76
Current (A)	1.74 *	4.14 *	6.54 *	9.50 *	11.84 *	16.57 *
75% Load Efficiency (%)	72.50	81.50	86.50	85.50	88.50	90.0
Power Factor	0.67	0.74	0.765	0.77	0.815	0.84
Current (A)	2.13	5.18	8.03	12.0	15.20	21.60
100% Load Efficiency (%)	72.0	80.0	85.50	86.0	87.50	89.50
Power Factor	0.74	0.82	0.835	0.825	0.855	0.88
Speed (r/min)	1395	1435	1445	1445	1450	1460
Full Load Torque (kg-m)	0.52	1.517	2.512	3.767	5.006	7.457
Pull Out Torque (% FLT)	280	260	290	280	250	250

ตารางที่ ข.1.2 (ต่อ)

Rated Power	15 kW	18.5kW	22kW	30kW	37kW
Current (A)	16.59 *	20.31 *	24.21 *	33.37 *	36.99 *
50% Load Efficiency (%)	89.0	91.0	92.0	91.0	92.50
Power Factor	0.775	0.76	0.75	0.75	0.82
Current (A)	22.74 *	28.09 *	33.21 *	45.55 *	52.98 *
75% Load Efficiency (%)	90.50	91.50	92.0	91.50	92.50
Power Factor	0.83	0.82	0.82	0.82	0.86
Current (A)	28.30	36.0	43.90	58.60	72.0
100% Load Efficiency (%)	90.50	91.0	90.50	91.0	91.50
Power Factor	0.885	0.865	0.855	0.85	0.86
Speed (r/min)	1465	1455	1465	1455	1470
Full Load Torque (kg-m)	9.909	12.472	14.864	19.955	24.689
Pull Out Torque (% FLT)	260	240	240	230	210

ตารางที่ ข.1.3 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 380 V, 6-pole, 50 Hz. แยกทาลอกผู้ผลิตเทโก (Teco) * จากการคำนวณ

Rated Power	0.75 kW	2.2kW	3.7kW	5.5kW	7.5kW	11kW
Current (A)	1.73 *	3.96 *	6.80 *	8.59 *	11.48 *	13.64 *
50% Load Efficiency (%)	66.50	76.50	77.0	81.0	84.0	88.0
Power Factor	0.49	0.55	0.535	0.60	0.59	0.695
Current (A)	1.95 *	4.69 *	7.88 *	10.49 *	13.80 *	17.61 *
75% Load Efficiency (%)	71.50	79.0	81.0	84.0	86.50	89.50
Power Factor	0.61	0.675	0.655	0.71	0.715	0.795
Current (A)	2.28	5.74	9.32	13.0	16.60	22.90
100% Load Efficiency (%)	71.0	78.0	80.50	84.50	85.50	88.50
Power Factor	0.70	0.76	0.755	0.775	0.80	0.84
Speed (r/min)	930	955	960	960	975	970
Full Load Torque (kg-m)	1.561	2.280	3.781	5.671	7.445	11.225
Pull Out Torque (% FLT)	220	230	230	230	300	260

ตารางที่ ข.1.3 (ต่อ)

Rated Power	15 kW	18.5kW	22kW	30kW	37kW
Current (A)	17.82 *	22.30 *	28.43 *	33.84 *	45.75 *
50% Load Efficiency (%)	90.0	90.0	89.0	91.0	91.0
Power Factor	0.71	0.70	0.66	0.74	0.675
Current (A)	23.90 *	29.85 *	36.37 *	46.69 *	60.62 *
75% Load Efficiency (%)	90.50	90.50	90.50	91.50	91.50
Power Factor	0.79	0.78	0.76	0.80	0.76
Current (A)	30.90	38.20	46.30	60.0	78.70
100% Load Efficiency (%)	89.0	90.0	89.50	91.0	90.0
Power Factor	0.825	0.825	0.82	0.83	0.80
Speed (r/min)	975	975	975	970	975
Full Load Torque (kg-m)	14.889	18.612	22.334	29.932	37.223
Pull Out Torque (% FLT)	230	240	260	200	210

ตารางที่ ข.1.4 ค่าพารามิเตอร์จากการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ 4 ขั้วแม่เหล็กใช้ชุดข้อมูลแคทาลอกเทคโนโลยีแนวทางที่ 1

ขนาดพิกัด (กิโลวัตต์)	พารามิเตอร์ (โอห์ม)	แบบสมบูรณ์	แบบสมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	แบบประมาณ
0.75	R_1	43.597	46.1	31.88
	X_1	8.82	1.228	-
	X_2	51.424	1.228	-
	X_m	449.47	452.41	501.74
	R_2	26.843	26.696	30.92
	R_c	7207.9	7606	4869.5
	X_{eq}	-	-	57.45
7.5	R_1	2.394	2.39	2.15
	X_1	2.692	3.01	-
	X_2	9.5	3.01	-
	X_m	119.8	86.16	105.8
	R_2	1.654	1.734	1.723
	R_c	1241.9	1362.4	1312.7
	X_{eq}	-	-	2.16
11	R_1	1.10	1.527	1.13
	X_1	1.80	5.789	-
	X_2	8.58	5.789	-
	X_m	94.35	72.481	86.85
	R_2	0.873	0.845	0.943
	R_c	850.46	1095.2	937.97
	X_{eq}	-	-	7.23

ตารางที่ ข.1.4 (ต่อ)

ขนาดพิกัด (กิโลวัตต์)	พารามิเตอร์ (โอห์ม)	แบบสมบูรณ์	แบบสมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	แบบประมาณ
15	R_1	0.841	0.782	0.849
	X_1	1.943	1.148	-
	X_2	7.245	1.148	-
	X_m	64.1	66.77	66.96
	R_2	0.58	0.653	0.624
	R_c	718.18	659.05	762.68
	X_{eq}	-	-	5.0
37	R_1	0.467	0.56	0.469
	X_1	0.323	0.2055	-
	X_2	0.895	0.2055	-
	X_m	29.04	29.114	32.37
	R_2	0.203	0.2005	0.205
	R_c	607.46	807.733	685.88
	X_{eq}	-	-	0.876

ตารางที่ ข.1.5 ผลเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะกระแสอินพุทของมอเตอร์ ใช้ชุด
ข้อมูลแคทาลอกเทคโนโลยี *จากการคำนวณ แนวทางที่ 1

พิกัด 380 V, 0.75 kW, 4-pole, 50Hz.						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		2.13	-	1.74 *	-	1.53 *
ทำนาย	ประมาณ	2.09	1.85	1.732	1.64	1.532
	สมบูรณ์	2.133	1.91	1.79	1.72	1.59
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	2.02	1.83	1.75	1.66	1.57
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-1.87	-	-0.45	-	0.13
	สมบูรณ์	0.14	-	2.87	-	3.92
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-5.16	-	0.57	-	2.61
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-1.15	-	-1.44	-	-4.70
	สมบูรณ์	0.17	-	-2.41	-	-2.94
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-5.21	-	-1.44	-	2.64
7.5 kW						
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		15.20	-	11.84 *	-	9.26 *
ทำนาย	ประมาณ	14.58	12.66	11.60	10.59	9.05
	สมบูรณ์	14.34	12.60	11.27	10.42	8.71
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	14.49	12.76	11.63	10.92	9.61
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-4.07	-	-2.02	-	-2.26
	สมบูรณ์	-5.65	-	-4.81	-	-5.93
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-4.67	-	-1.52	-	3.77

ตารางที่ ข.1.5 (ต่อ)

พัดกัก 380 V, 15 kW, 4-pole, 50 Hz. * จากการคำนวณ						
กระแสอินพุตที่ระบุ (A)		28.30	-	22.74 *	-	16.59 *
ทำนาย	ประมาณ	28.37	24.59	22.70	19.58	16.02
	สมบูรณ์	28.30088	25.28	22.16	20.299	17.19
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	26.10	23.78	20.92	19.22	15.48
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	0.24	-	-0.17	-	-3.43
	สมบูรณ์	0.0031	-	-2.55	-	3.61
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-7.77	-	-8.0	-	-6.69
37 kW						
กระแสอินพุตที่ระบุ (A)		72.0	-	52.98 *	-	36.99 *
ทำนาย	ประมาณ	66.92	57.44	49.82	46.17	37.06
	สมบูรณ์	67.23	57.93	50.53	46.89	38.08
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	64.52	57.15	50.66	46.28	37.77
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-7.05	-	-5.96	-	0.18
	สมบูรณ์	-6.625	-	-4.62	-	2.94
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-10.38	-	-4.37	-	2.10

ตารางที่ ข.1.6 ผลเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์ ใช้
ชุดข้อมูลบริษัทแคทาลอกเทคโนโลยีแนวทางที่ 1

พิกัด 380 V, 0.75 kW, 4-pole, 50 Hz.						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		750	-	562.50	-	375
ทำนาย	ประมาณ	776.13	642.82	543.03	493.65	374.75
	สมบูรณ์	755.25	617.42	553.06	470.64	382.35
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	768.83	635.83	569.65	485.89	373.99
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	3.48	-	-3.46	-	-0.066
	สมบูรณ์	0.70	-	-1.67	-	1.96
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	2.51	-	1.27	-	-0.26
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-6.15	-	-3.93	-	2.40
	สมบูรณ์	5.07	-	-0.26	-	-1.54
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.077	-	-1.80	-	-0.79
7.5 kW						
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		7500	-	5625	-	3750
ทำนาย	ประมาณ	7586.5	6391.5	5633.3	4985.4	3803.5
	สมบูรณ์	7342.7	6344.8	5550.1	4996.7	3839.4
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	7374.4	6191.9	5374.3	4816.1	3668.1
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	1.15	-	0.14	-	1.42
	สมบูรณ์	-2.09	-	-1.33	-	2.38
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.67	-	-4.45	-	-2.18

ตารางที่ ข.1.6 (ต่อ)

พิกัด 380 V, 15 kW, 4-pole, 50 Hz.						
กำลังเอาต์พุตที่ระบุ (W)		15000	-	11250	-	7500
ทำนาย	ประมาณ	14738	12589	11394	9517.6	7484.5
	สมบูรณ์	14683	12980	11127	9945.9	7868.9
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	14597	13084	11155	9976.4	7164.7
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-1.74	-	1.28	-	-0.20
	สมบูรณ์	-2.11	-	-1.09	-	4.91
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.68	-	-0.84	-	-4.47
37 kW						
กำลังเอาต์พุตที่ระบุ (W)		37000	-	27750	-	18500
ทำนาย	ประมาณ	37434	31985	27034	24891	18657
	สมบูรณ์	37683	32013	27297	24878	18655
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	36811	32039	27851	24929	18829
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	1.17	-	-2.58	-	0.84
	สมบูรณ์	1.84	-	0.97	-	0.026
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.51	-	0.36	-	1.77

ตารางที่ ข.1.7 ผลเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายสมรรถนะประสิทธิภาพของมอเตอร์ ใช้
ข้อมูลบริษัทแคทาลอกเทคโนโลยีทางที่ 1

พิกัด 380 V, 0.75 kW, 4-pole, 50 Hz.						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		72.0	-	72.50	-	68.50
ทำนาย	ประมาณ	72.99	72.90	71.80	71.09	68.13
	สมบูรณ์	71.62	72.25	72.02	71.09	69.0
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	72.50	72.83	72.52	71.52	68.68
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	0.99	-	-0.70	-	-0.37
	สมบูรณ์	-0.38	-	-0.48	-	0.50
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.50	-	0.02	-	0.18
7.5 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		87.50	-	88.50	-	86.50
ทำนาย	ประมาณ	87.79	88.14	88.05	87.98	86.99
	สมบูรณ์	87.38	87.79	87.92	87.82	87.04
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	87.54	87.82	87.76	87.54	86.39
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	0.29	-	-0.45	-	0.49
	สมบูรณ์	-0.12	-	-0.58	-	0.54
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.04	-	-0.74	-	-0.11

ตารางที่ ข.1.7 (ต่อ)

พิกัด 380 V, 15 kW , 4-pole, 50Hz.						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		90.50	-	90.50	-	89.0
ทำนาย	ประมาณ	90.13	90.38	90.35	90.18	89.39
	สมบูรณ์	90.23	90.44	90.45	90.29	89.55
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	90.62	90.65	90.48	90.23	88.79
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.37	-	-0.15	-	0.39
	สมบูรณ์	-0.27	-	-0.05	-	0.55
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.12	-	-0.02	-	-0.21
37 kW						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.50	-	92.50	-	92.50
ทำนาย	ประมาณ	91.21	92.15	92.31	92.73	92.60
	สมบูรณ์	91.43	92.04	92.40	92.51	92.42
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	91.07	91.79	92.21	92.50	92.66
ผิดพลาด (%)	ประมาณ	-0.29	-	-0.19	-	0.10
	สมบูรณ์	-0.07	-	-0.10	-	-0.08
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.43	-	-0.29	-	0.16

ภาคผนวก ค

การทดสอบขณะรับภาระทางกล ค่าพารามิเตอร์และการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนาย
สมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแนวทางที่ 2

ค.1 การทดสอบหาคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะรับภาระทางกล

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากวงจรสมมูลในแต่ละแบบจะมีความถูกต้องหรือผิดพลาดเพียงใดจะต้องนำมาคำนวณหาสมรรถนะทางการทำงานต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทางด้านกระแสอินพุท, กำลังไฟฟ้าอินพุท, กำลังไฟฟ้าเอาต์พุท, ค่าความสูญเสียทั้งหมด, แรงบิด และประสิทธิภาพเป็นต้นเพื่อนำค่าต่าง ๆ ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบงานจริงจะทำการทดสอบโดยนำมอเตอร์เหนี่ยวนำไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจำลองให้เป็นโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ เริ่มต้นที่สถานะไม่มีโหลดจนถึงสถานะพิกัดกำลังที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วรอบ เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบมีดังนี้

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

- แหล่งจ่ายไฟฟ้าปรับค่าได้ 3 เฟส (Voltage regulator) 0-400 V	1 เครื่อง
- Mesurment and Analyzing Unit	1 เครื่อง
-แหล่งจ่ายไฟฟ้าปรับค่าได้ 1 เฟส (Variac 1 ϕ) 0-240 V	1 เครื่อง
- วงจร Bridge Rectifier	1 ชุด
- DC generator	1 ตัว
- Digital Power Meter	1 ตัว
- Digital Multimeter	1 ตัว
- Tachometer	1 ตัว
- DC Ampmeter	2 ตัว
- DC Voltmeter	2 ตัว
- หลอดไฟ	1 ชุด

ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

- ต่อวงจรดังรูป ค.1 ทำการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยค่อยๆ ปรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจนถึงพิกัดแรงดันในสถานะไม่มีโหลดจนความเร็วคงที่

- ปรับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 เฟส จ่ายกระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็กให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (ขณะไม่มีโหลด)

- วัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าอินพุท

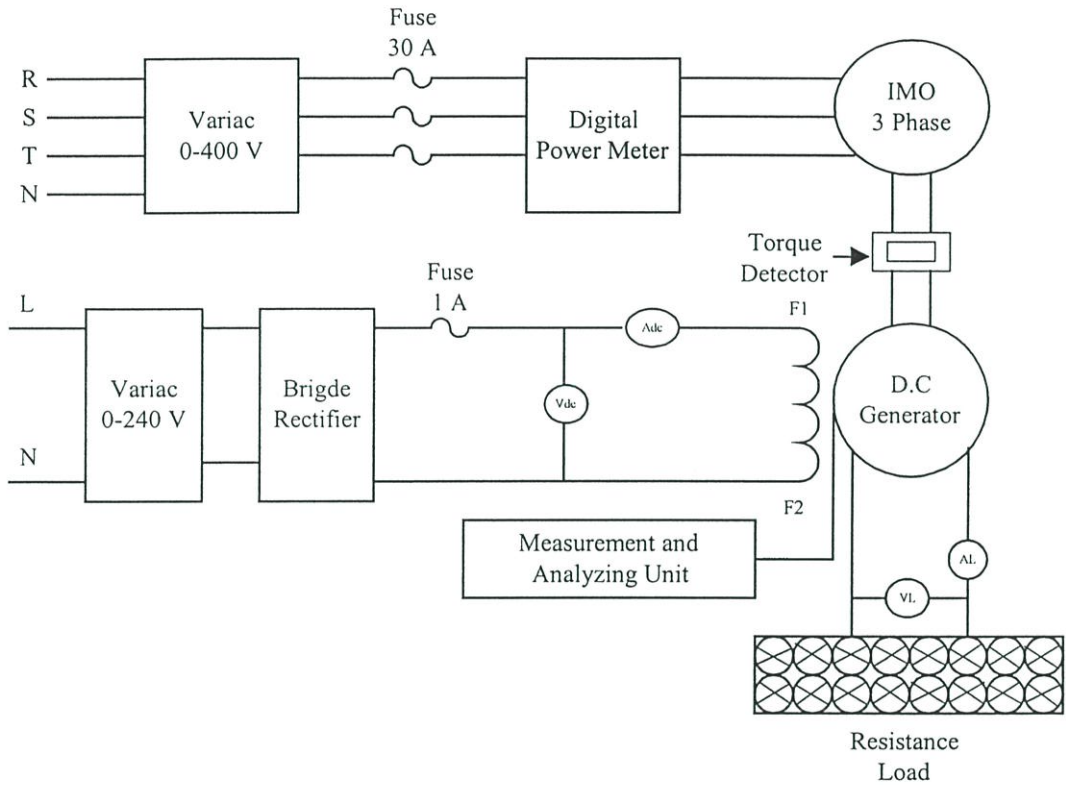
- วัดและบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุท แรงบิดและความเร็วรอบ

- ปรับเพิ่มภาระโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเริ่มที่สถานะโหลด 10 % ของพิกัดโหลดจนถึงเต็มพิกัด โหลด 100 % (โดยเพิ่มครั้ง 10 %) หรือใกล้เคียง

- วัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าอินพุท

- วัดและบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุท แรงบิดและความเร็วรอบ

- ปรับเพิ่มภาระโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเปิดหลอดไฟเพิ่มครั้งละ 1 หลอดจนกระทั่งมอเตอร์เหนี่ยวนำหยุดหมุนหรือหมุนที่ความเร็วต่ำ ๆ
- วัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าอินพุท
- วัดและบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุท แรงบิดและความเร็วรอบ



รูปที่ ค.1 วงจรทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะรับภาระทางกล

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าขณะรับภาระทางกลพิกัดขนาด 2.2 กิโลวัตต์

Step Load	$V_{(av)}$ (V)	$I_{(av)}$ (A)	$PF_{(av)}$	N_r (rpm)	Slip	T (N-m)
1	220.3	2.38	0.195	1494	0.004	0.60
2	220.3	2.41	0.295	1488	0.008	1.61
3	220.5	2.51	0.386	1485	0.010	2.62
4	220.5	2.61	0.468	1480	0.0133	3.63
5	220.4	2.75	0.541	1475	0.0167	4.64
6	220.8	2.94	0.604	1469	0.0207	5.65
7	220.7	3.12	0.654	1464	0.0240	6.75
8	220.6	3.29	0.689	1459	0.0273	7.56

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

Step Load	$V_{(av)}$ (V)	$I_{(av)}$ (A)	$PF_{(av)}$	N_r (rpm)	Slip	T (N-m)
9	220.6	3.51	0.729	1453	0.0313	8.67
10	220.2	3.71	0.759	1446	0.0360	9.58
11	220.4	3.95	0.783	1442	0.0387	10.58
12	220.7	4.23	0.806	1433	0.0447	11.59
13	220.2	4.48	0.823	1426	0.0493	12.60
14	220.6	4.72	0.836	1419	0.0540	13.61
15	220.5	5.05	0.853	1409	0.0607	14.62
16	220.1	5.25	0.864	1401	0.0660	15.52
17	219.8	5.56	0.872	1391	0.0727	16.43

ตารางที่ ค. 1 (ต่อ)

Step Load	$V_{(av)}$ (V)	$I_{(av)}$ (A)	P_{in} (W)	P_o (W)	P_{loss} (W)	Efficiency (%)
1	220.3	2.38	310	90	220	29.03
2	220.3	2.41	470	250	220	53.19
3	220.5	2.51	640	400	240	62.50
4	220.5	2.61	810	560	250	69.13
5	220.4	2.75	980	720	260	73.46
6	220.8	2.94	1170	870	300	74.35
7	220.7	3.12	1350	1030	320	76.29
8	220.6	3.29	1500	1160	340	77.33
9	220.6	3.51	1690	1320	370	78.10
10	220.2	3.71	1850	1450	400	78.37

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

Step Load	$V_{(av)}$ (V)	$I_{(av)}$ (A)	P_{in} (W)	P_o (W)	P_{loss} (W)	Efficiency (%)
11	220.4	3.95	2050	1600	450	78.04
12	220.7	4.23	2250	1750	500	77.77
13	220.2	4.48	2450	1880	570	76.73
14	220.6	4.72	2620	2020	600	77.09
15	220.5	5.05	2830	2160	670	76.32
16	220.1	5.25	3010	2280	730	75.74
17	219.8	5.56	3220	2390	830	74.22

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าขณะรับภาระทางกลพิกัดขนาด 3.7 กิโลวัตต์

Step Load	$V_{(av)}$ (V)	$I_{(av)}$ (A)	$PF_{(av)}$	N_r (rpm)	Slip	T (N-m)
1	220.81	3.244	0.1418	1498.7	0.000867	0.5
2	220.68	3.314	0.2265	1495.1	0.003267	1.7
3	220.46	3.402	0.3096	1492.6	0.004933	2.92
4	220.38	3.513	0.3795	1488.4	0.007733	4.03
5	220.18	3.628	0.4483	1486.7	0.008867	5.24
6	220.47	3.789	0.5077	1484.6	0.010267	6.45
7	220.33	3.986	0.5564	1481.8	0.012133	7.66
8	220.21	4.181	0.6023	1478.2	0.014533	8.77
9	220.35	4.408	0.6374	1475.5	0.016333	9.88
10	220.84	4.631	0.6704	1474	0.017333	11.19
11	220.14	4.881	0.6977	1470.1	0.019933	12.3
12	220.44	5.121	0.7219	1466.6	0.022267	13.41
13	220.21	5.398	0.7422	1463	0.024667	14.62
14	220.12	5.698	0.7629	1457.2	0.028533	15.93
15	220.68	6.039	0.7762	1454.6	0.030267	17.24
16	220.31	6.333	0.7914	1451.6	0.032267	18.35
17	220.02	6.594	0.8026	1449.5	0.033667	19.35
18	220.23	6.891	0.8091	1446.1	0.035933	20.36

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

Step Load	$V_{(av)}$ (V)	$I_{(av)}$ (A)	$PF_{(av)}$	N_r (rpm)	Slip	T (N-m)
19	220.35	7.334	0.8206	1440.1	0.039933	21.98
20	220.09	7.702	0.8275	1436.9	0.042067	23.19
21	220.16	7.984	0.8343	1434.3	0.0438	24.4

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

Step Load	$V_{(av)}$ (V)	$I_{(av)}$ (A)	P_{in} (W)	P_o (W)	P_{loss} (W)	Efficiency (%)
1	220.81	3.244	307	78	229	25.40
2	220.68	3.314	501	270	231	53.89
3	220.46	3.402	689	460	229	66.76
4	220.38	3.513	882	630	252	71.42
5	220.18	3.628	1073	820	253	76.42
6	220.47	3.789	1277	1000	277	78.30
7	220.33	3.986	1464	1190	274	81.28
8	220.21	4.181	1661	1360	301	81.87
9	220.35	4.408	1851	1530	321	82.65
10	220.84	4.631	2058	1730	328	84.06
11	220.14	4.881	2249	1890	359	84.03
12	220.44	5.121	2445	2060	385	84.25
13	220.21	5.398	2642	2240	402	84.78
14	220.12	5.698	2874	2430	444	84.55
15	220.68	6.039	3112	2630	482	84.51
16	220.31	6.333	3276	2790	486	85.16
17	220.02	6.594	3485	2940	545	84.36
18	220.23	6.891	3695	3080	615	83.35
19	220.35	7.334	3963	3310	653	83.52
20	220.09	7.702	4181	3490	691	83.47
21	220.16	7.984	4426	3660	766	82.69

ตารางที่ ค.3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบงานจริง

พารามิเตอร์ (โอห์ม)	แบบสมบูรณ์ R_1 (ทดสอบ)	แบบสมบูรณ์ R_1 (ตัวแปร)	แบบประมาณ R_1 (ทดสอบ)	แบบประมาณ R_1 (ตัวแปร)
พิกัดกำลัง 0.75 kW, 4-pole, 50 Hz.				
R_1	10.8	13.23	10.80	1.72
X_1	16.57	6.53	-	-
X_2	5.84	15.944	-	-
X_m	218.77	224.58	241.37	242.63
R_2	9.211	9.86	9.96	11.25
R_c	1054.7	1255.71	1195.04	946.10
X_{eq}	-	-	2.14	2.39
พิกัดกำลัง 2.2 kW, 4-pole, 50 Hz.				
R_1	3.743	1.12	3.74	8.15
X_1	6.74	2.06	-	-
X_2	7.78	3.26	-	-
X_m	87.24	92.39	95.107	95.27
R_2	3.03	3.31	3.1889	3.12
R_c	952.50	923.98	995.574	975.17
X_{eq}	-	-	1.562	1.59
พิกัดกำลัง 3.7 kW, 4-pole, 50 Hz.				
R_1	2.0	1.33	2.0	3.23
X_1	3.13	7.46	-	-
X_2	7.35	3.16	-	-
X_m	66.31	62.38	70.31	71.63
R_2	1.28	1.16	1.42	1.36
R_c	793.11	680.91	772.99	752.06
X_{eq}	-	-	8.90	9.35

ตารางที่ ค.3 (ต่อ)

พารามิเตอร์ (โอห์ม)	แบบสมบูร์ณ R_1 (ทดสอบ)	แบบสมบูร์ณ R_1 (ตัวแปร)	แบบประมาณ R_1 (ทดสอบ)	แบบประมาณ R_1 (ตัวแปร)
พิกัดกำลัง 5.5 kW, 4-pole, 50 Hz.				
R_1	1.57	1.67	1.57	3.28
X_1	3.38	3.80	-	-
X_2	6.35	7.97	-	-
X_m	49.51	49.05	53.43	53.54
R_2	1.02	1.08	1.17	1.07
R_c	765.89	556.27	660.06	786.51
X_{eq}	-	-	8.92	7.49

ตารางที่ ค.4 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสมรรถนะของมอเตอร์โดยใช้ชุดข้อมูลแนวทางที่ 2
(แบบสมบูรณ์)

ขนาดพิกัด (kW)	ช่วงข้อมูลโหลด (%)	แบบสมบูรณ์ R_1 (ทดสอบ)	แบบสมบูรณ์ R_1 (ตัวแปร)
กระแสอินพุท (%)			
0.75	10 - 50 %	1.364	0.728
	50 - 75 %	0.704	0.2842
	75 - 100 %	0.448	0.243
2.2	10 - 50 %	2.401	2.366
	50 - 75 %	4.275	0.598
	75 - 100 %	4.700	4.373
3.7	10 - 50%	1.459	1.564
	50 - 75 %	0.911	0.949
	75 - 100 %	0.909	0.9247
5.5	10 - 50 %	5.101	5.515
	50 - 75 %	6.842	7.834
	75 - 100 %	7.525	8.923
ประสิทธิภาพ (%)			
0.75	10% - 50 %	1.863	1.488
	50 - 75 %	1.331	1.186
	75 - 100 %	1.062	1.119
2.2	10 - 50 %	5.073	9.029
	50 - 75 %	4.287	8.511
	75 - 100 %	4.159	8.792
3.7	10 - 50 %	1.303	2.586
	50 - 75 %	1.072	2.529
	75 - 100 %	1.022	2.692
5.5	10 - 50 %	3.898	0.670
	50 - 75 %	3.200	0.672
	75% - 100%	2.796	0.523

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ขนาดพิกัด (kW)	ช่วงข้อมูล เปอร์เซ็นต์โหลด	แบบสมบูรณ์ R_1 (ทดสอบ)	แบบสมบูรณ์ R_1 (ตัวแปร)
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (%)			
0.75	10 - 50%	1.709	0.702
	50 - 75 %	1.480	0.606
	75 - 100 %	1.020	0.352
2.2	10 - 50 %	3.563	4.272
	50 - 75 %	5.822	4.565
	75 - 100 %	6.664	3.9555
3.7	10 - 50 %	3.322	0.579
	50 - 75 %	1.748	1.883
	75 - 100 %	0.347	3.159
5.5	10 - 50 %	6.562	7.266
	50 - 75 %	7.885	9.471
	75 - 100 %	8.274	10.250

ตารางที่ ก.5 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสมรรถนะมอเตอร์โดยใช้ชุดข้อมูลแนวทางที่2
(แบบประมาณ)

ขนาดพิกัด (kW)	ช่วงข้อมูลโหลด (%)	แบบประมาณ R_1 (ทดสอบ)	แบบประมาณ R_1 (ตัวแปร)
กระแสอินพุท (%)			
0.75	10 - 50%	2.299	1.099
	50 - 75 %	1.396	0.377
	75 - 100 %	0.908	0.244
2.2	10 - 50 %	2.037	2.236
	50 - 75 %	3.723	4.503
	75 - 100 %	3.838	5.4093
3.7	10 - 50 %	0.674	2.211
	50 - 75 %	0.311	1.374
	75 - 100 %	0.681	1.264

ตารางที่ ค.5 (ต่อ)

ขนาดพิกัด (kW)	ช่วงข้อมูล โหลด (%)	แบบประมาณ R_1 (ทดสอบ)	แบบประมาณ R_1 (ตัวแปร)
กระแสอินพุท (%)			
5.5	10 - 50 %	4.707	4.194
	50 - 75 %	6.364	5.763
	75 - 100 %	6.963	6.456
ประสิทธิภาพ (%)			
0.75	10 - 50 %	0.582	4.091
	50 - 75 %	5.625	2.6167
	75 - 100 %	5.726	1.431
2.2	10 - 50 %	11.537	9.562
	50 - 75 %	9.652	6.620
	75 - 100 %	8.980	5.070
3.7	1% - 50 %	4.316	3.446
	50 % - 75 %	3.766	2.491
	75 - 100%	3.553	1.884
5.5	1% - 50%	5.908	7.078
	50% - 75 %	5.152	5.023
	75% - 100%	4.687	3.692
	50 - 75 %	6.998	4.091
	75 - 100 %	5.903	2.100
5.5	10 - 50 %	2.318	2.589
	50 - 75 %	6.677	3.302
	75 - 100 %	8.460	6.262

ตารางที่ ค.5 (ต่อ)

ขนาดพิกัด (kW)	ช่วงข้อมูลโหลด (%)	แบบประมาณ R_1 (ทดสอบ)	แบบประมาณ R_1 (ตัวแปร)
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (%)			
0.75	10 - 50 %	1.324	1.032
	50 - 75 %	0.955	0.696
	75 - 100 %	0.863	0.520
2.2	10 - 50 %	2.649	2.192
	50 - 75 %	2.397	2.513
	75 - 100 %	1.524	1.9134
3.7	10 - 50 %	1.714	2.459
	50 - 75 %	0.855	1.260
	75 - 100 %	0.021	0.167
5.5	10 - 50 %	8.239	6.204
	50 - 75 %	8.998	6.863
	75 - 100 %	8.932	6.806

ภาคผนวก ง

ชุดข้อมูลแคตาล็อกผู้ผลิตซิเมนต์ ค่าพารามิเตอร์และการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนาย
สมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแนวทางที่ 3

ตารางที่ ง.1.1 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 400 V, 2-pole, 50 Hz. ซิเมนส์ (Siemens)

Rated Power	0.75 kW	2.2kW	4kW	5.5kW	7.5kW	11kW
Current (A)	1.73	4.60	7.70	11.10	14.70	21.40
100% Load Efficiency (%)	73.0	81.0	85.50	84.50	86.0	87.0
Power Factor	0.86	0.85	0.88	0.85	0.86	0.85
Speed (r/min)	2855	2880	2900	2915	2915	2920
Full Load Torque (Nm)	2.50	7.30	13.0	18.0	25.0	36.0
Pull Out Torque (% FLT)	240	310	290	280	300	280

ตารางที่ ง.1.1 (ต่อ)

Rated Power	15 kW	18.5kW	22kW	30kW	37kW
Current (A)	28.20	34.70	39.0	53.0	65.0
100% Load Efficiency (%)	88.50	90.0	91.70	92.30	92.8
Power Factor	0.87	0.85	0.88	0.89	0.89
Speed (r/min)	2925	2935	2940	2945	2945
Full Load Torque (Nm)	49.0	60.0	71.0	97.0	120
Pull Out Torque (% FLT)	310	330	320	280	280

ตารางที่ ง.1.2 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 400 V, 4-pole, 50 Hz. ซิเมนส์ (Siemens)

Rated Power	0.75 kW	2.2kW	4kW	5.5kW	7.5kW	11kW
Current (A)	1.86	4.90	8.30	11.40	15.10	21.40
100% Load Efficiency (%)	72.0	80.0	84.0	86.0	87.50	88.50
Power Factor	0.81	0.82	0.83	0.81	0.82	0.84
Speed (r/min)	1395	1420	1440	1455	1455	1460
Full Load Torque (Nm)	5.10	20.0	27.0	36.0	49.0	72.0
Pull Out Torque (% FLT)	230	280	300	310	320	290

ตารางที่ ง.1.2 (ต่อ)

Rated Power	15 kW	18.5kW	22kW	30kW	37kW
Current (A)	28.50	35.0	41.0	55.0	66.0
100% Load Efficiency (%)	90.0	90.5	91.20	91.80	92.90
Power Factor	0.84	0.83	0.84	0.86	0.87
Speed (r/min)	1460	1460	1460	1465	1470
Full Load Torque (Nm)	98.0	121.0	144.0	196	241
Pull Out Torque (% FLT)	320	300	300	320	320

ตารางที่ ง.1.3 ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 400 V, 6-pole, 50 Hz. ซิเมนส์ (Siemens)

Rated Power	0.75 kW	2.2kW	4kW	5.5kW	7.5kW	11kW
Current (A)	2.10	5.20	9.40	12.80	17.0	24.50
100% Load Efficiency (%)	69.0	78.0	80.50	83.0	86.0	87.50
Power Factor	0.76	0.78	0.76	0.76	0.74	0.74
Speed (r/min)	915	940	950	950	960	960
Full Load Torque (Nm)	7.80	22.0	40.0	55.0	75.0	109
Pull Out Torque (% FLT)	220	250	240	260	250	260

ตารางที่ ง.1.3 (ต่อ)

Rated Power	15 kW	18.5kW	22kW	30kW	37kW
Current (A)	31.50	38.50	45.50	61.0	68.0
100% Load Efficiency (%)	89.50	90.20	90.80	91.80	92.40
Power Factor	0.77	0.77	0.77	0.77	0.86
Speed (r/min)	970	975	975	978	980
Full Load Torque (Nm)	148.0	181.0	215	294	361.0
Pull Out Torque (% FLT)	240	280	290	290	220

ตารางที่ ง.1.4 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ใช้ชุดข้อมูลแคลคูลอกซิเมนต์ แนวทางที่ 3

ขนาดพิกัด (กิโลวัตต์)	พารามิเตอร์ (โอห์ม)	แบบสมบูรณ์	แบบสมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)
0.75	R_1	22.221	17.193
	X_1	2.426	25.841
	X_2	67.865	25.841
	X_m	640.6	659.2
	R_2	36.48	37.915
	R_c	3232.8	1703.6
4	R_1	2.09	2.605
	X_1	1.022	3.881
	X_2	11.64	3.881
	X_m	164.23	186.63
	R_2	4.142	4.25
	R_c	1206.70	521.67
11	R_1	1.738	1.679
	X_1	0.386	0.575
	X_2	0.635	0.575
	X_m	53.166	53.029
	R_2	1.029	1.014
	R_c	1483.6	1623.70
18.5	R_1	0.963	1.04
	X_1	0.119	0.142
	X_2	1.04	0.142
	X_m	39.462	36.194
	R_2	0.601	0.594
	R_c	1522.30	1300.10

ตารางที่ ง.1.5 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ชุดข้อมูลแคทาลอกผู้ผลิตमितซูบิชิแนวทางที่ 3

ขนาดพิกัด (กิโลวัตต์)	พารามิเตอร์ (โอห์ม)	แบบสมบูรณ์	แบบสมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)
0.75	R_1	21.232	22.43
	X_1	3.5622	6.422
	X_2	26.187	6.422
	X_m	632.91	565.07
	R_2	32.054	32.247
	R_c	4199.2	4542.9
11	R_1	1.301	1.633
	X_1	0.463	0.882
	X_2	3.216	0.882
	X_m	69.021	65.603
	R_2	1.600	1.533
	R_c	4355.8	3345.90
18.5	R_1	0.853	0.964
	X_1	0.323	0.292
	X_2	0.920	0.2923
	X_m	43.724	41.143
	R_2	0.550	0.541
	R_c	679.441	1686.3
22	R_1	0.3156	0.449
	X_1	0.126	0.807
	X_2	2.825	0.807
	X_m	51.744	39.219
	R_2	0.481	0.474
	R_c	318.291	373.129

ตารางที่ ง.1.6 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ใช้ชุดข้อมูลแคตาล็อกผู้ผลิตเทคโนโลยี แนวทางที่ 3

ขนาดพิกัด (กิโลวัตต์)	พารามิเตอร์ (โอห์ม)	แบบสมบูรณ์	แบบสมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)
0.75	R_1	11.89	22.82
	X_1	21.93	5.21
	X_2	14.57	5.21
	X_m	427.70	433.51
	R_2	36.07	31.901
	R_c	1581.70	2794.2
11	R_1	0.906	1.1417
	X_1	1.151	1.369
	X_2	2.793	1.369
	X_m	64.57	55.766
	R_2	0.931	1.001
	R_c	461.04	460.064
18.5	R_1	0.747	0.997
	X_1	0.865	0.574
	X_2	0.785	0.5745
	X_m	42.544	38.0914
	R_2	0.6014	0.60
	R_c	509.099	798.955
22	R_1	0.9554	0.8737
	X_1	0.1723	0.351
	X_2	0.198	0.351
	X_m	29.568	34.813
	R_2	0.3858	0.391
	R_c	1944.2	370.694

ตารางที่ ง.2.1 ผลการเปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะกระแสอินพุทของมอเตอร์พิกัด 400 V, 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกซีเมนต์ แนวทางที่ 3

0.75 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		1.86	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	1.85	1.68	1.59	1.48	1.35
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	1.86016	1.686	1.61	1.50	1.36
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.53	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.0086	-	-	-	-
4 kW						
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		8.30	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	8.27	7.34	6.78	6.26	5.61
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	8.33	7.43	6.89	6.37	5.54
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.36	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.36	-	-	-	-
11 kW						
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		21.40	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	21.90	20.07	18.70	17.23	15.65
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	22.03	19.72	18.48	17.28	15.69
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	2.33	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	2.94	-	-	-	-

ตารางที่ ง.2.1 (ต่อ)

18.5 kW						
กระแสอินพุตที่ระบุ (A)		35.0	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	34.81	30.53	28.17	25.92	22.81
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	35.24	31.15	28.92	26.79	23.88
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.54	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.68	-	-	-	-
22 kW						
กระแสอินพุตที่ระบุ (A)		41.0	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	41.74	36.42	33.46	30.58	26.53
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	40.84	36.54	33.08	30.43	26.77
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.80	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.39	-	-	-	-
30kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุตที่ระบุ (A)		55.0	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	51.81	43.14	39.48	35.88	28.92
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	55.54	48.75	44.39	41.22	35.35
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-5.80	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.98	-	-	-	-

ตารางที่ ง.2.2 ผลเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์พิกัด 400 V, 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคลทลอกซิเมนต์ แนวทางที่ 3

0.75 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		750	-	562.5	-	375
ทำนาย	สมบูรณ์	744.34	629.32	578.13	498.31	386.31
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	752.05	629.87	576.57	494.55	381.32
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.75	-	2.77	-	3.01
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.27	-	2.50	-	1.68
4 kW						
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		4000	-	3000	-	2000
ทำนาย	สมบูรณ์	4047.8	3405.2	3007.6	2601.1	2045.9
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	4073.1	3441.6	3053.6	2658.5	1984.7
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.19	-	0.25	-	2.29
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	1.82	-	1.78	-	-0.76
11 kW						
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		11000	-	8250	-	5500
ทำนาย	สมบูรณ์	11075	9592.3	8575.5	7272.8	5664
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	11278	9508.8	8466.6	7402	5485.8
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	0.68	-	3.94	-	2.98
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	2.52	-	2.62	-	-0.25

ตารางที่ ง.2.2 (ต่อ)

18.5 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาต์พุตที่ระบุ (W)		18500	-	13875	-	9250
ทำนาย	สมบูรณ์	18732	15734	13964	12153	9360.5
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	18813	15798	14019	12200	9394.2
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.25	-	0.64	-	1.19
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	1.69	-	1.03	-	1.55
22 kW						
กำลังเอาต์พุตที่ระบุ (W)		22000	-	16500	-	11000
ทำนาย	สมบูรณ์	22392	18845	16761	14637	11380
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	22381	19283	16628	14457	11120
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.78	-	1.58	-	3.45
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	1.73	-	0.77	-	1.09
30kW						
กำลังเอาต์พุตที่ระบุ (W)		30000	-	22500	-	15000
ทำนาย	สมบูรณ์	31054	25144	22564	19956	14655
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	30689	25692	22298	19719	14477
ผิดพลาด (W)	สมบูรณ์	3.51	-	0.28	-	-2.30
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	2.29	-	-0.89	-	-3.48

ตารางที่ ง.2.3 ผลการเปรียบเทียบการทำนายสมรรถนะประสิทธิภาพของมอเตอร์พิกัด 400 V, 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกซีเมนต์ แนวทางที่ 3

0.75 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		72.0	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	73.75	72.89	72.19	70.62	67.0
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	66.79	64.47	63.10	60.41	55.20
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.75	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-5.21	-	-	-	-
4 kW						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		84.0	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	85.53	84.89	84.18	83.09	80.69
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	77.0	75.22	73.67	71.63	66.46
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.53	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-7.0	-	-	-	-
11 kW						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		88.50	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	88.53	88.77	88.78	88.54	87.60
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	88.97	89.27	89.28	89.11	88.28
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	0.03	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.47	-	-	-	-

ตารางที่ ง.2.1 (ต่อ)

18.5 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		90.50				
ทำนาย	สมบูรณ์	90.49	91.07	91.29	91.38	91.07
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	89.79	90.28	90.42	90.41	89.88
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.01	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.71	-	-	-	-
22 kW						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.20	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	90.43	90.25	89.96	89.46	88.07
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	89.72	89.91	89.87	89.63	88.65
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.77	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.48	-	-	-	-
30 kW						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.80	-	-	-	-
ทำนาย	สมบูรณ์	91.06	90.71	90.37	89.87	87.99
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	88.85	88.26	87.55	86.77	84.09
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.74	-	-	-	-
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.95	-	-	-	-

ตารางที่ ง.3.1 ผลเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายกระแสอินพุทของมอเตอร์พิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกमितซูบิชิ แนวทางที่ 3

0.75 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		1.81	-	1.51	-	1.26
ทำนาย	สมบูรณ์	1.78	1.62	1.505	1.44	1.27
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	1.79	1.65	1.56	1.46	1.36
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-1.65	-	-0.33	-	0.79
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.10	-	3.31	-	7.93
11 kW						
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		21.70	-	16.90	-	12.80
ทำนาย	สมบูรณ์	21.28	18.96	17.16	15.41	13.37
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	21.42	18.70	16.93	15.65	13.30
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-1.93	-	1.53	-	4.45
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.29	-	0.17	-	3.90
22 kW						
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		41.70	-	32.30	-	23.80
ทำนาย	สมบูรณ์	40.97	35.90	32.54	29.21	24.33
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	40.85	36.11	32.24	29.25	24.99
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-1.75	-	0.74	-	2.22
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.03	-	-0.18	-	5.0

ตารางที่ ง.3.2 ผลเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์พิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกมิตซูบิชิ แนวทางที่ 3

0.75 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		750	-	562.5	-	375
ทำนาย	สมบูรณ์	744.64	640.31	558.23	487.32	369.14
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	736.57	632.52	564.72	480.52	378.45
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.71	-	-0.75	-	-1.56
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-1.79	-	0.39	-	0.92
11 kW						
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		11000	-	8250	-	5500
ทำนาย	สมบูรณ์	11225	9567.7	8413.2	7219.1	5671.3
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	11268	9549.5	8354	7118	5515.4
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	2.04	-	1.97	-	3.11
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	2.43	-	1.26	-	0.28
22 kW						
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		22000	-	16500	-	11000
ทำนาย	สมบูรณ์	21917	18924	16863	14752	11496
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	22426	19267	16579	14391	11609
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.37	-	2.20	-	4.50
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	1.93	-	0.47	-	5.53

ตารางที่ ง.3.3 ผลเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายประสิทธิภาพของมอเตอร์ฟัดด์380 V, 4-pole, 50 Hz, ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกमितซูบิซิแนวทางที่ 3

0.75 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		78.0	-	78.0	-	74.0
ทำนาย	สมบูรณ์	77.79	77.43	76.69	75.59	72.34
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	77.86	77.49	76.89	75.60	72.32
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.21	-	-1.31	-	-1.66
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.14	-	-1.11	-	-1.68
11 kW						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.0	-	91.0	-	90.0
ทำนาย	สมบูรณ์	89.81	90.88	91.52	92.07	92.51
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	88.82	89.89	90.51	90.88	91.22
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-1.19	-	0.52	-	2.51
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.18	-	-0.49	-	1.22
22 kW						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		91.0	-	91.0	-	89.0
ทำนาย	สมบูรณ์	90.0	89.75	89.40	88.84	87.30
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	90.09	90.0	89.68	89.18	87.72
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-1.0	-	-1.60	-	-1.70
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.91	-	-1.32	-	-1.28

ตารางที่ ง.4.1 ผลเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายกระแสอินพุทของมอเตอร์พิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกเทคโนโลยี *จากการคำนวณ แนวทางที่ 3

0.75 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		2.13	-	1.74 *	-	1.53 *
ทำนาย	สมบูรณ์	2.13036	2.0	1.90	1.80	1.69
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	2.11	1.95	1.87	1.80	1.68
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	0.016	-	9.19	-	10.45
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.93	-	7.47	-	9.80
11 kW						
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		21.60	-	16.57 *	-	12.34 *
ทำนาย	สมบูรณ์	22.22	19.84	18.28	17.25	14.63
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	21.39	20.03	18.70	17.42	15.06
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	2.87	-	10.31	-	18.55
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.97	-	12.85	-	22.04
22 kW						
กระแสอินพุทที่ระบุ (A)		43.90	-	33.21 *	-	24.21 *
ทำนาย	สมบูรณ์	43.33	38.15	34.84	32.45	28.11
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	42.74	37.34	33.84	31.27	26.46
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-1.29	-	4.90	-	16.10
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.64	-	1.89	-	9.29

ตารางที่ ง.4.2 ผลเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์พิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกเทคโนโลยี *จากการคำนวณ แนวทางที่ 3

0.75 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		750	-	562.5	-	375
ทำนาย	สมบูรณ์	739.76	641.36	564.17	484.25	373.5
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	752.56	637.5	557	487.82	372.82
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-1.36	-	0.29	-	-0.40
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	0.341	-	-0.97	-	-0.58
11 kW						
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		11000	-	8250	-	5500
ทำนาย	สมบูรณ์	11295	9719.8	8644.6	7549.8	5871.6
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	11377	9452.1	8464.9	7460.9	5403.2
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	2.68	-	4.78	-	6.75
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	3.42	-	2.60	-	-1.76
22 kW						
กำลังเอาต์พุทที่ระบุ (W)		22000	-	16500	-	11000
ทำนาย	สมบูรณ์	22471	18995	16588	14734	10902
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	22467	18977	16569	14711	10886
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	2.14	-	0.53	-	-0.89
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	2.12	-	0.41	-	-1.03

ตารางที่ ง.4.3 ผลเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการทำนายประสิทธิภาพของมอเตอร์พิกัด 380 V, 4-pole, 50 Hz. ใช้ข้อมูลบริษัทแคทาลอกเทคโนโลยี *จากการคำนวณ แนวทางที่ 3

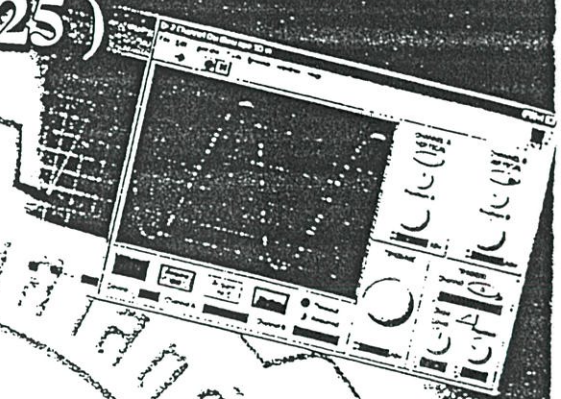
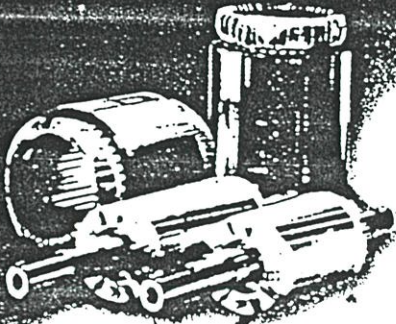
0.75 kW						
ภาระทางกล (%)		100	85	75	65	50
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		72.0	-	72.50	-	68.50
ทำนาย	สมบูรณ์	73.90	72.99	71.77	69.90	65.83
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	71.14	70.91	69.51	67.79	63.42
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	1.90	-	-0.73	-	-2.67
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-0.86	-	-2.99	-	-5.08
11 kW						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		89.50	-	90.0	-	89.0
ทำนาย	สมบูรณ์	87.31	86.84	86.28	85.44	83.30
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	86.09	85.75	85.22	84.43	81.50
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-2.19	-	-3.72	-	-6.70
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-3.41	-	-4.78	-	-8.50
22 kW						
ประสิทธิภาพที่ระบุ (%)		90.50	-	92.0	-	92.0
ทำนาย	สมบูรณ์	89.89	90.62	90.99	91.15	91.0
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	87.62	87.74	87.58	87.25	85.68
ผิดพลาด (%)	สมบูรณ์	-0.61	-	-1.01	-	-1.0
	สมบูรณ์ ($X_1 = X_2$)	-2.88	-	-4.42	-	-6.32

ภาคผนวก จ
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25

25th-Electrical Engineering Conference (EECON - 25)



21-22 พฤศจิกายน 2545

ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สาขาบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ระบบควบคุมและกำลังควบคุม (CT)

ดำเนินการจัดการประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การทำนายคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานจริงโดยใช้วิธีอัลกอริธึมพันธุ

Prediction of Induction Motor Field Operating Performances Using Genetic Algorithm

ค่อพงษ์ ภูมิภาค* ตุนัน หนองเหล็ก** ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย**

* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร 10530
** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยใช้วิธีอัลกอริธึมพันธุ จุดประสงค์เพื่อทำนายคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งานจริงได้อย่างสะดวก และสามารถลดขั้นตอนการทดสอบที่ยุ่งยากตามมาตรฐาน เนื่องจากไม่ต้องปลดการทางกลที่ต่อกับมอเตอร์ออกขณะทดสอบ ข้อมูลที่ใช้ประกอบค้ด้วยค่าทางไฟฟ้าและทางกลคือ แรงดัน กระแส ความเร็ว และค้ประกอบกำลังไฟฟ้าหรือแรงบิด เพียง 3 จุดที่วัดได้จากมอเตอร์ขณะใช้งานจริงซึ่งนำไปใช้ประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าทั้งแบบประมาณและแบบสมบูรณ์ บทความนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายคุณลักษณะของมอเตอร์ขณะใช้งานกับจากการทดสอบโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า

Abstract

This paper presents a technique for estimating the equivalent circuit parameters of three-phase induction motor using genetic algorithm. The objective is to simply predict the field operating performances of motor in the field which can reduce the process of the complex standard methods since the motor is already coupled to driven equipment in the process. Only three sets of electrical and mechanical data, i.e. voltage, current, speed and power factor or torque, from the field test are required in this technique. These data are then used in the evaluation process for estimating the parameters of both exact and approximate equivalent circuits. In this paper, the results of 3 HP and 5 HP induction motor field operating performances prediction compared with those obtained from the load test are illustrated and discussed.

Keywords: Genetic algorithm, operating performances, parameter of equivalent circuits, three-phase induction motors.

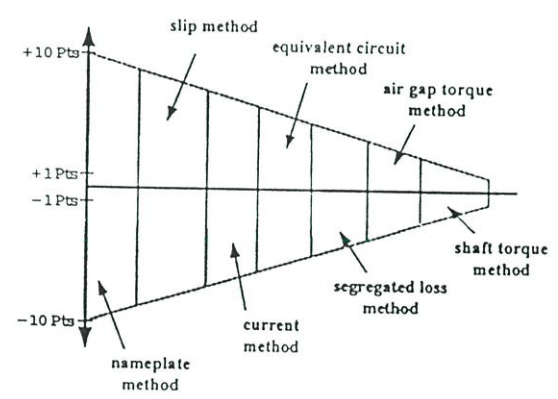
1. บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก การวิเคราะห์คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามเฟสในสภาวะคงตัวสามารถทำได้หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน [1] จากรูปที่ 1 แสดงค่าความผิดพลาดของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการต่างๆ [2] การวิเคราะห์คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำส่วนใหญ่จะใช้วงจรสมมูล

ทางไฟฟ้า (equivalent circuit) ทั้งนี้เพราะสะดวกในการคำนวณ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลสามารถหาได้จากกรทดสอบตามมาตรฐาน [3] โดยบทความนี้จะกล่าวถึงวงจรสมมูลทางไฟฟ้า 2 แบบคือ แบบประมาณ (approximate) และแบบสมบูรณ์ (exact) ตาม IEEE std 112 ซึ่งวงจรสมมูลทั้งสองแบบนี้จำเป็นต้องมีการทดสอบแบบไม่มีโหลด (no-load) และจับยึดโรเตอร์ (blocked rotor) เพียงแค่ค่าแบบสมบูรณ์ตาม IEEE std 112 การทดสอบจับยึดโรเตอร์จะค้มีการปรับความถี่ของแรงดัน และมีขั้นตอนการทดสอบหาค่าสูญเสียค้ (friction and windage losses) ซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยากมาก โดยเฉพาะกับมอเตอร์ในขณะที่ยึดค้ในระบ

ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบอัลกอริธึมพันธุ ซึ่งจะอ้างอิงทั้งวงจรสมมูลแบบประมาณ และแบบสมบูรณ์เป็น 2 แนวทาง คือ

1. ข้อมูล 3 จุดที่ประกอบค้ด้วยค่า แรงดัน กระแส แรงบิด และความเร็ว
2. ข้อมูล 3 จุดที่ประกอบค้ด้วยค่า แรงดัน กระแส ค้ประกอบกำลังไฟฟ้า และความเร็ว



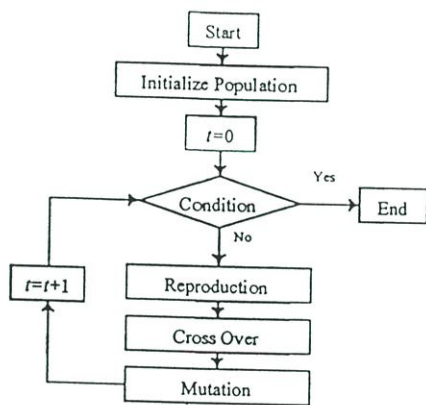
รูปที่ 1 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการต่างๆ

2. อัลกอริธึมพันธุ (Genetic Algorithm)

อัลกอริธึมพันธุเป็นวิธีการที่ใช้ในการค้นหาค่าที่ดีที่สุดของค่าคอนของฟังก์ชันที่เป็นไปได้โดยเป็นการจำลองการขยายพันธุ์ของยีน (gene) ซึ่งเป็นการคัดเลือกโครโมโซม (chromosome) ที่เหมาะสมที่สุดและถ่ายทอดคุณลักษณะไปยังโครโมโซมลูก โดยมีขั้นตอนประกอบค้ด้วย

1. การคัดเลือก (Reproduction or Selection)
2. การสร้างโครโมโซมลูก (Crossover)
3. การกลายพันธุ์ (Mutation)

โครโมโซมหรือแบบจำลองทางพันธุกรรมในอัลกอริธึมพันธุกรรมจะเป็นข้อมูลซึ่งประกอบด้วยยีนจำนวน n ยีน ค่ายีนที่นิยมใช้มี 2 แบบคือ ไบนารี (binary) และจำนวนจริงหรือจำนวนเต็ม (floating point) โดยบทความนี้จะเลือกใช้วิธีอัลกอริธึมพันธุกรรมแบบไบนารี การคัดเลือกเป็นกระบวนการที่ตัดสินใจว่าโครโมโซมใดจะคงอยู่เพื่อนำไปคัดเลือกในรุ่นต่อไป โดยตัดสินใจจากความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซม ถ้ายีนเป็นแบบไบนารีจะใช้วิธีการของวงล้อลูกเต๋าคู (roulette) การสร้างโครโมโซมจะถูกเป็นการสร้างโครโมโซมลูกจากโครโมโซมพ่อแม่ที่ผ่านการคัดเลือกโดยการสลับหรือกระโดดข้ามของข้อมูลโครโมโซม การกลายพันธุ์เป็นการเปลี่ยนข้อมูลในตำแหน่งยีนของโครโมโซมจากการสุ่มค่าแห่งการกลายพันธุ์จะช่วยป้องกันการที่พันธุกรรมไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการสร้างโครโมโซมลูกโดยกระบวนการทั้ง 3 ขั้นตอนนี้ จะทำซ้ำจนกว่าจะได้ค่าตอบหรือสิ้นสุดกระบวนการทำซ้ำ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการของอัลกอริธึมพันธุกรรม

ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมจะต้องมีฟังก์ชันหลักและเงื่อนไข โดยจะจัดอยู่รูปฟังก์ชันจำเลย จากนั้นจัดอยู่ในรูปของ Fitness ดังนี้

ฟังก์ชันหลัก $F(x_i); i = 1, 2, \dots, n$ (1)

เงื่อนไข $g_k(x_i); i = 1, 2, \dots, n$ (2)

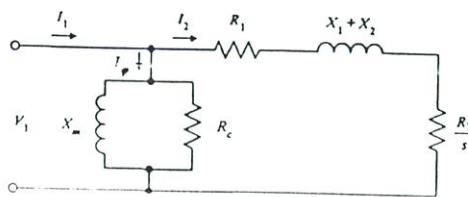
ฟังก์ชันจำเลย $\phi(F, g) = F(x_i) + \sum_{k=1}^m g_k(x_i)$ (3)

$Fitness = \frac{1}{1 + \phi(F, g)}$ (4)

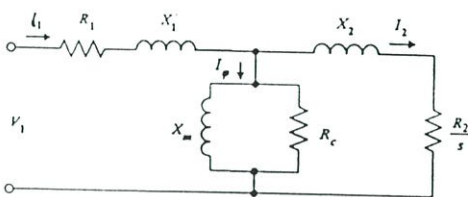
3. วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าโดยเฉพาะกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อยู่ในส่วนที่คิดคั้งหน้างานหรือในขณะที่ใช้งาน วิธีการที่นำเสนอจะมีขั้นตอนที่สะดวกและไม่ยุ่งยาก ไม่จำเป็นต้องปลดภาระทางกลที่ติดคั้งอยู่เพื่อทำการทดสอบ เนื่องจากวิธีการนี้จะนำข้อมูลที่วัดได้จากการใช้งานจริงได้แก่ ค่าแรงคั้น กระแส ความเร็ว และแรงบิดหรือตัวประกอบกำลังไฟฟ้า จำนวน 3 จุด เพื่อนำไปประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ X_{eq}, X_m, R_2, R_c ของวงจรสมมูลแบบประมาณ และ $X_1,$

X_2, X_m, R_2, R_c ของวงจรสมมูลแบบสมบูรณ์ ส่วนค่า R_1 จะได้จาก V-I Method การหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอัลกอริธึมพันธุกรรม [4,5] จะอ้างอิงกับวงจรสมมูลทั้งสองแบบคือ แบบประมาณ และแบบสมบูรณ์ ดังรูปที่ 3 และมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4 สมการฟังก์ชันหลักแสดงได้ดังสมการที่ (5) และ (6)

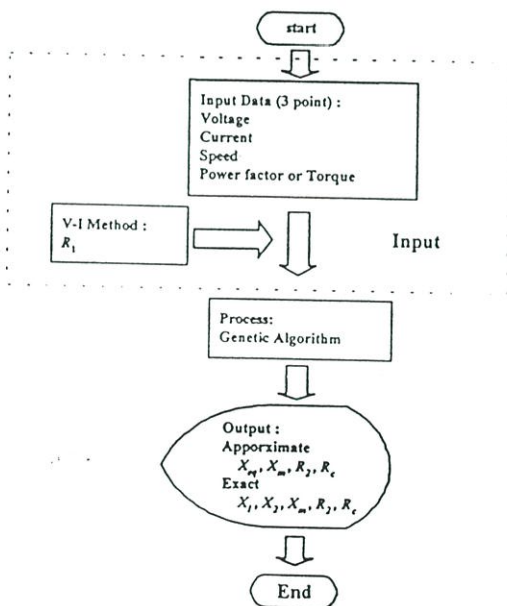


ก) แบบประมาณ



ข) แบบสมบูรณ์

รูปที่ 3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (ค่อเฟส)



รูปที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าพารามิเตอร์

ฟังก์ชันหลัก

$\sum_{i=1}^3 |T_{i,cal} - T_{i,ref}|^2 + \sum_{i=1}^3 |I_{i,cal} - I_{i,ref}|^2$ (5)

$\sum_{i=1}^3 |P \cdot f \cdot i_{i,cal} - P \cdot f \cdot i_{i,ref}|^2 + \sum_{i=1}^3 |I_{i,cal} - I_{i,ref}|^2$ (6)

เงื่อนไข

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า

แบบประมาณ	แบบ สมบูรณ์
$1 \leq X_{eq} \leq 10$	$1 \leq X_1 \leq 10$
$1 \leq X_m \leq 1000$	$1 \leq X_2 \leq 10$
$1 \leq R_2 \leq 10$	$1 \leq X_m \leq 1000$
$1 \leq R_c \leq 800$	$1 \leq R_2 \leq 10$
	$1 \leq R_c \leq 800$

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า

แบบประมาณ	แบบ สมบูรณ์
$1 \leq X_{eq} \leq 20$	$1 \leq X_1 \leq 10$
$1 \leq X_m \leq 1000$	$1 \leq X_2 \leq 10$
$1 \leq R_2 \leq 10$	$1 \leq X_m \leq 1000$
$1 \leq R_c \leq 600$	$1 \leq R_2 \leq 10$
	$1 \leq R_c \leq 600$

4. ผลการทดสอบ

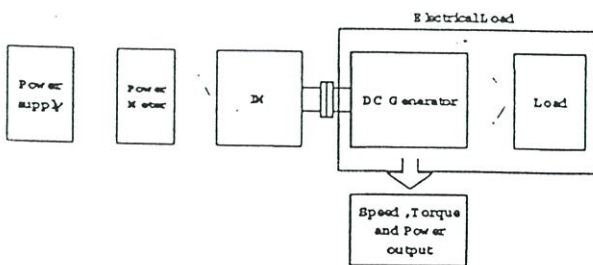
มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีพิกัดดังนี้

- มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz

แรงดัน (V)	220	380	415
กระแส (A)	8.7	5.0	4.9
ความเร็ว (rpm)	1420	1420	1420
- มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 Hz

แรงดัน (V)	380	415
กระแส (A)	8.7	5.0
ความเร็ว (rpm)	1420	1420

โดยทำการทดสอบแบบมีภาระทางกล (on-load test) โดยมีการปรับภาระทางกล ตั้งแต่ 0% - 100 % โดยมีวงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 วัดค่าแรงดัน กระแส ตัวประกอบกำลัง แรงบิด และความเร็วรอบ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกจากการทดสอบจำนวน 3 จุด คือที่ภาระทางกล ประมาณ 0% - 30%, 40% - 60% และ 70% - 90% (ทั้งสองแนวทาง) เป็นข้อมูลสำหรับหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้อัลกอริทึมพันธุ โดยค่า R_1 จะได้จาก V-I Method



รูปที่ 5 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบมีภาระทางกล

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE std-112 และการทดสอบทั่วไป

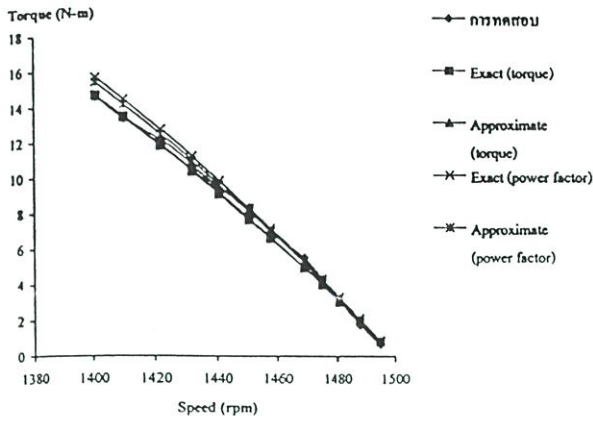
	3 แรงม้า		5 แรงม้า	
	แบบสมบูรณ์ IEEE Std 112	วงจรสมบูรณ์แบบประมาณ	แบบสมบูรณ์ IEEE Std 112	วงจรสมบูรณ์แบบประมาณ
R_1	3.5	3.5	2.5	2.5
X_{eq}	-	7.512	-	5.86
X_1	2.519	-	2.52	-
X_2	2.519	-	2.52	-
X_m	89.48	86.7	61	63.3
R_2	3.12	3.1	1.543	1.649
R_c	645.33	484	398.5	316.6

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์วิธีอัลกอริทึมพันธุที่ใช้ข้อมูลเป็นแรงบิดกับเป็นตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 แรงม้า

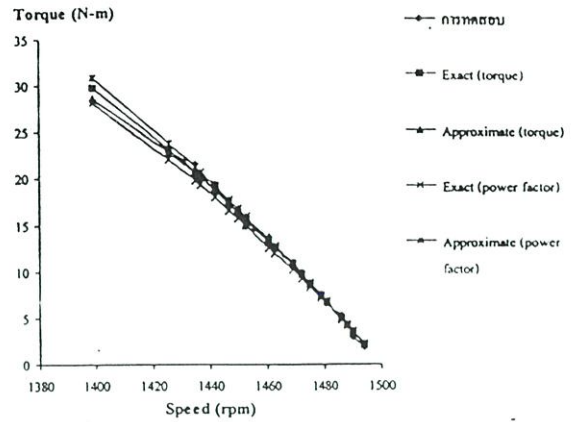
	ข้อมูลแรงบิด		ข้อมูลตัวประกอบกำลัง	
	แบบสมบูรณ์	แบบประมาณ	แบบสมบูรณ์	แบบประมาณ
R_1	3.5	3.5	3.5	3.5
X_{eq}	-	2.356	-	1.501
X_1	2.17	-	2.575	-
X_2	2.135	-	1.423	-
X_m	83.827	91.505	80.846	83.398
R_2	3.164	3.462	3.3865	3.682
R_c	701.244	593.423	760.036	792.760
R_c	339.283	376.507	488.808	483.650

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์วิธีอัลกอริทึมพันธุที่ใช้ข้อมูลเป็นแรงบิดกับเป็นตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 แรงม้า

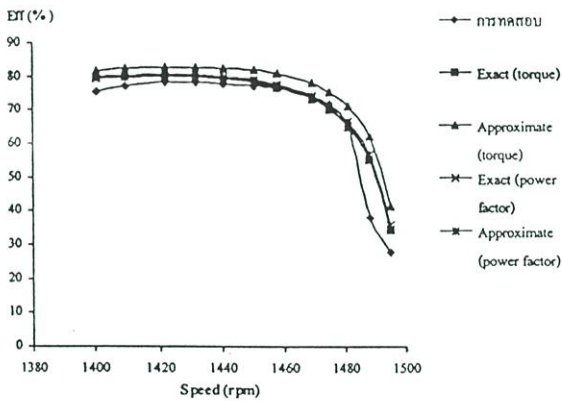
	ข้อมูลแรงบิด		ข้อมูลตัวประกอบกำลัง	
	แบบสมบูรณ์	แบบประมาณ	แบบสมบูรณ์	แบบประมาณ
R_1	2.5	2.5	2.5	2.5
X_{eq}	-	7.679	-	2.31
X_1	1.302	-	3.216	-
X_2	2.942	-	2.3518	-
X_m	68.905	71.422	62.3783	70.287
R_2	1.591	1.657	1.569	1.6477
R_c	339.283	376.507	488.808	483.650



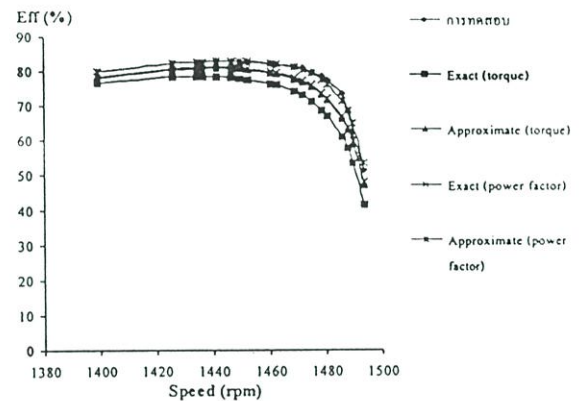
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็ว(มอเตอร์ 3 แรงม้า)



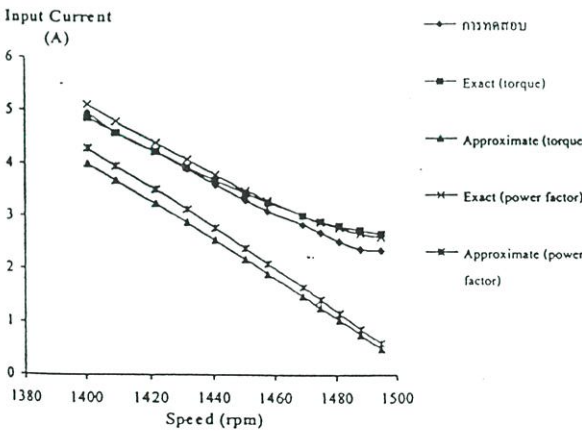
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็ว(มอเตอร์ 5 แรงม้า)



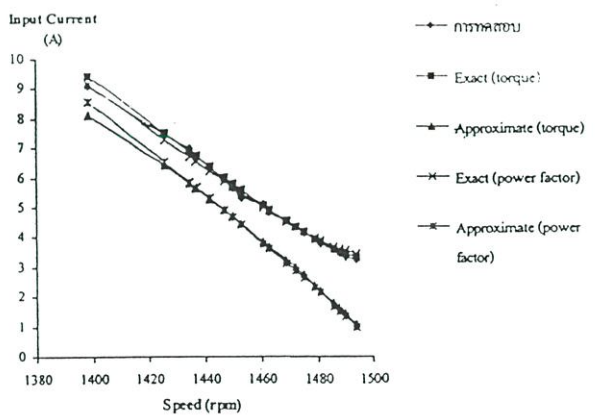
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพและความเร็ว(มอเตอร์ 3 แรงม้า)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพและความเร็ว(มอเตอร์ 5 แรงม้า)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของกระแสและความเร็ว(มอเตอร์ 3 แรงม้า)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของกระแสและความเร็ว(มอเตอร์ 5 แรงม้า)

ตารางที่ 4 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า

	ข้อมูลแรงบิด		ข้อมูลตัวประกอบกำลัง	
	สมบูรณ์	ประมาณ	สมบูรณ์	ประมาณ
แรงบิด (%)	4.24	4.708	3.443	3.359
กระแสไฟฟ้า (%)	3.191	32.367	5.287	26.126
ประสิทธิภาพ (%)	1.735	6.15	2.155	2.824

ตารางที่ 5 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 5 แรงม้า

	ข้อมูลแรงบิด		ข้อมูลตัวประกอบกำลัง	
	สมบูรณ์	ประมาณ	สมบูรณ์	ประมาณ
แรงบิด (%)	2.45	2.23	5.00	2.785
กระแสไฟฟ้า (%)	1.38	23.11	1.768	23.672
ประสิทธิภาพ (%)	6.535	2.91	2.542	1.239

จากตารางที่ 1-3 จะเห็นได้ว่าเป็นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบทั่วไป, ตามมาตรฐาน IEEE std-112 และวิธีอัลกอริทึมพันธุจะมีค่าที่อยู่ในช่วงเดียวกัน และเมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงภาระทางกลที่ใช้งานคือ ประมาณ 50-100 % กราฟแสดงคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีอัลกอริทึมพันธุ และจากการทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 11 ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายคุณลักษณะของมอเตอร์กับการทดสอบจริงแสดงได้ดังตารางที่ 4 และ 5 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของกระแส, แรงบิด และประสิทธิภาพจะมีค่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นกรณีวงจรสมมูลแบบประมาณที่ค่าความผิดพลาดของกระแสสูงมากกว่า 20 % เนื่องจากการใช้ค่าประมาณของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าในการคำนวณในส่วนของค่ากระแส

5. บทสรุป

บทความนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการทำนายคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งาน โดยใช้หลักการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยวิธีอัลกอริทึมพันธุซึ่งอาศัยข้อมูลทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ในขณะใช้งาน ในบทความนี้ได้นำเสนอ 2 แบบ คือ กรณีที่ 1 ข้อมูลประกอบด้วย แรงดัน กระแส แรงบิด และความเร็ว กรณีที่ 2 ข้อมูลประกอบด้วย แรงดัน กระแส ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และความเร็ว เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายกับการทดสอบจริงพบว่าการใช้วงจรสมมูลแบบสมบูรณ์ ค่าความผิดพลาดของกระแสแรงบิด และประสิทธิภาพ จะมีค่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ายอมรับได้ สำหรับการใช่วงจรสมมูลแบบประมาณ ค่าความผิดพลาดของกระแส

จะสูงมากกว่า 20 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช่วงจรสมมูลแบบประมาณไม่เหมาะสมกับวิธีการนี้ อย่างไรก็ตามจากการทดสอบพบว่าวิธีการทั้งสองกรณีสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการช่วยตรวจสอบพฤติกรรมของมอเตอร์ในขณะที่ใช้งานได้อย่างสะดวกเพื่อการวางแผนการประหยัดพลังงานของโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ข้อมูลของค่าประสิทธิภาพที่ทำนายแค่ทางปฏิบัติในการใช้งานจริงจะพบว่าข้อมูลที่เป็แรงบิดมีความเป็นไปได้น้อยมากที่จะสามารถวัดได้หรือหาข้อมูลได้ในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่ในระบบ ดังนั้นข้อมูลที่เป็ค่าตัวประกอบกำลังจะสะดวกกว่า

เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Alonge, F D'ippolito, G. Ferrante and F.M. Raimondi, "Parameter identification of induction motor model using genetic algorithms", *IEE Proc., Control Theory Appl.*, vol. 145, no. 6, pp. 587-593, Nov. 1998.
- [2] J. S. Hsu, J. D. Kueck, M. Olszewski, D. A. Casada, P. J. Otaduy, and L. M. Tolbert, "Comparison of induction motor field efficiency evaluation methods," *IEEE Transactions on Industry Appli.*, vol. 34, issue:1, pp. 117-125, Jan./Feb. 1998.
- [3] *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motor and Generators*, IEEE Standard 112-1996, New York, May 1997.
- [4] D.E.Goldberg, *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [5] Z. Michaléwicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, New York: Springer-Verlag, 1996.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายสุนัน หนองเหล็ก
วัน เดือน ปี 13 กรกฎาคม 2517 ที่ ศรีสะเกษ
ที่อยู่ 166/6 ถ.หน้าสถานีรถไฟ ต. ในเมือง อ. เมือง จ. บุรีรัมย์
ประวัติการศึกษา 2540 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประสบการณ์การทำงาน
พ.ศ 2545-2547 ตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง