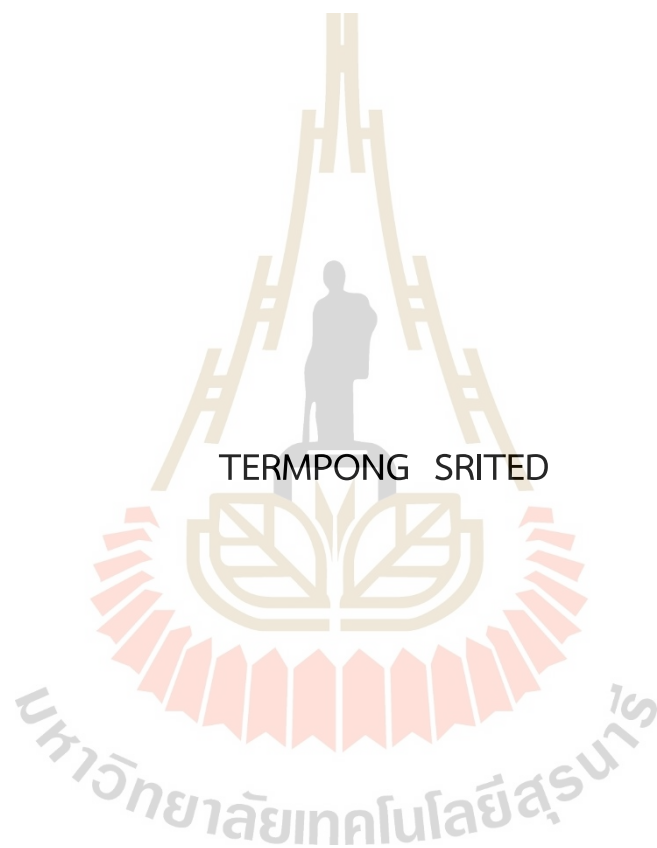


การประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
โดยไม่ปลดโหลดด้วยปัญญาประดิษฐ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

ON-LOAD THREE-PHASE INDUCTION MOTOR EQUIVALENT
CIRCUIT PARAMETERS ESTIMATION BY ARTIFICIAL INTELLIGENCES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
โดยไม่ปลดโหลดด้วยปัญญาประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....
(ผศ. ดร.วรวงษ์ ไพรินทร์)

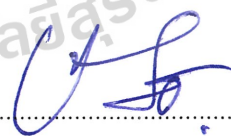
ประธานกรรมการ


.....
(รศ. ดร.กীরติ ชยะกุลคีรี)

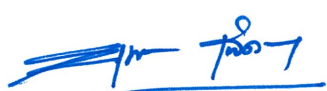
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


.....
(ศ. ดร.ธนัตชัย กุลสุวรรณพงษ์)


กรรมการ


.....
(ผศ. ดร.อุเทน ลีตัน)

กรรมการ


.....
(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ


.....
(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เต็มพงษ์ ศรีเทศ : การประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยไม่ปลดโหลดด้วยปัญญาประดิษฐ์ (ON-LOAD THREE-PHASE INDUCTION MOTOR EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS ESTIMATION BY ARTIFICIAL INTELLIGENCES)
อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ. ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ , 95 หน้า.

คำสำคัญ : มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส/วงจรสมมูล/ปัญญาประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ปลดโหลดด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยจะมีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกระบวนการแมงมุมแม่ม่ายดำ (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA) โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงาน การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงานโดยใช้ข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ และการประยุกต์ใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไม่ปลดโหลดจากวิธีการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงาน

จากผลการศึกษาวิจัยพบว่าจากกระบวนการที่พัฒนาทำให้สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลดด้วยปัญญาประดิษฐ์ และได้วิธีการในการการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยไม่ปลดโหลดจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลด้วยปัญญาประดิษฐ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

TERMPONG SRITED : ON-LOAD THREE-PHASE INDUCTION MOTOR EQUIVALENT
CIRCUIT PARAMETERS ESTIMATION BY ARTIFICIAL INTELLIGENCES

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KEERATI CHAYAKULKHEEREE, D.Eng., 95 PP.

Keyword : Three-phase induction motor/Equivalent circuit/Artificial Intelligences

This thesis explores the use of stochastic optimization techniques to estimate the equivalent circuit parameters of induction motors with the goal of accurately representing motor characteristics, most notably efficiency, under real-world operating situations without interfering with motor performance. The study focuses on three stochastic optimization methods: particle swarm optimization (PSO), black widow optimization algorithm (BWOA), and genetic algorithm (GA).

In the scope of research studies, both data from laboratory tests and those taken from relevant literature were used in the study. It uses data collected from various operating situations of the motor, including voltage, current, and actual power, and power factor at various operating points. The study found that the PSO method was more effective in estimating ECP values than other methods. By utilizing PSO to determine ECPs and standardizing stator, friction, and windage losses, the technique allows for the estimation of shaft torque output power, which in turn allows for the direct evaluation of motor efficiency without requiring a lot of laboratory testing. The feasibility of the suggested method is confirmed through comparative analysis with laboratory test results at various operating points.

To sum up, this research provides useful insights into improving motor performance assessment and optimization tactics by demonstrating the practical applicability of PSO-based methodologies for accurate estimation of induction motor characteristics and efficiency.

School of Electrical Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature
Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้มอบทุนการศึกษา OROG ในการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตของผู้วิจัย และขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร.กীরติ ชยะกุลคีรี รวมทั้งกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย ผศ. ดร.วรพงษ์ ไพรินทร์ ศ. ดร.ธนัดชัย กุลรวานิช พงษ์ และ ผศ. ดร.อุเทน ลีตนา ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างสูงในการดำเนินการศึกษาวิจัยนี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.เพชร นันทิวิจิตรชัย รศ. ดร.ปรีชา กอเจริญ และ ผศ. ดร. วิชชากร เสงศรีธวัช ในความช่วยเหลือด้านข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และขอขอบคุณน้อง ๆ นักศึกษาใน ห้องปฏิบัติการ Electric Power and Energy Research Group สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนัก วิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ช่วยเหลือในการเก็บผลการทดสอบมอเตอร์ ในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งคุณอนุสรณ์ ประกอบแก้ว ที่ช่วยประสานงานในส่วนองกับเอกสารที่ เกี่ยวข้องกับการเรียนในทุกภาคการศึกษาที่ผ่านมา



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เต็มพงษ์ ศรีเทศ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.5 ประโยชน์ของงานวิจัย	3
1.6 องค์ประกอบของรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.1 วิธีประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์	5
2.1.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO)	16
2.1.3 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกระบวนการแมงมุมแม่ม่ายดำ (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA).....	19
2.1.4 วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA)	22
2.2 งานวิจัยที่มีผู้ศึกษาไว้.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงานด้วย ปัญญาประดิษฐ์.....	34
3.1	การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงาน.....	34
3.2	การกำหนดปัญหาการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไข การทำงานโดยใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO)	36
3.3	การกำหนดปัญหาการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไข การทำงานด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกระบวนการแมงมุมแม่ม่ายดำ (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA)	38
4	ผลลัพธ์การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยปัญญาประดิษฐ์.....	40
4.1	ผลการทดลองด้วยวิธี PSO	40
4.2	ผลการเปรียบเทียบการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลาย เงื่อนไขการทำงาน	44
4.3	การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไม่ปลดโหลดจากวิธีการหา พารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงาน	47
4.4	ผลการทดสอบการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไข การทำงานโดยใช้ข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ.....	51
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	72
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	72
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	72
ภาคผนวก ก	บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา.....	78
ภาคผนวก ข	ผลการทดสอบวิธีการในวิทยานิพนธ์กับมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ	88
	ประวัติผู้เขียน.....	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปการตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละวิธี..... 15
2.2	สรุปตัวอย่างของงานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการประมาณค่าตัวแปรในวงจร สมมูลของมอเตอร์ 31
4.1	ECPs ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 0.75 kW ที่ใช้ทดสอบ..... 41
4.2	สภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 0.75 kW ที่ใช้ทดสอบ 41
4.3	ผลการวิเคราะห์ค่า ECPs โดยใช้เงื่อนไขการทำงานเดียว 42
4.4	ผลการวิเคราะห์ค่า ECPs โดยใช้ 2 เงื่อนไขการทำงาน 43
4.5	ผลการวิเคราะห์ค่า ECPs โดยใช้ 3 เงื่อนไขการทำงานเดียว 43
4.6	การทดสอบคำนวณด้วยจำนวนประชากรและจำนวนรอบที่แตกต่างกัน 44
4.7	ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากการทดสอบคำนวณ 44
4.8	ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากการทดสอบคำนวณ 45
4.9	ค่าทางไฟฟ้าของผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW ที่นำมาใช้เป็นกรณี ศึกษา..... 48
4.10	ค่าทางกลและประสิทธิภาพของผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW ที่นำมา ใช้เป็นกรณีศึกษา 49
4.11	ค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลที่ประเมินได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW ที่นำมา ใช้เป็นกรณีศึกษา 49
4.12	ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย PSO เปรียบเทียบกับผลการทดสอบใน ห้องปฏิบัติการของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW ที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา 50
4.13	การทดสอบสภาวะไร้อโหลด (No Load test)..... 54
4.14	การทดสอบยึดโรเตอร์ (Locked-rotor test) 54
4.15	ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ได้แทนค่าจากการ ทดสอบมอเตอร์ในการหาค่าพารามิเตอร์ 55
4.16	มอเตอร์ทำงาน ณ จุดการทำงาน 55
4.17	ผลการประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 25% ของพิกัด 56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.18	ผลการประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 50% ของพิกัด	58
4.19	ผลการประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 75% ของพิกัด	61
4.20	ผลการประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 100% ของพิกัด	64
4.21	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส จากการคำนวณด้วย 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%)	67
4.22	ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจร สมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส กับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการแทนค่าจากการ ทดลอง.....	70
4.23	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากโปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจร สมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส กับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการแทนค่าจาก การทดลอง	70
ข.1	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 25%	89
ข.2	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 50%	90
ข.3	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 75%	91
ข.4	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 100%	92
ข.5	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%)	93

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การทดสอบเพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์.....	6
2.2	การตรวจวัดค่ากำลังงานของมอเตอร์โดยใช้เครื่องวัดกำลังงานแบบคล่องวัด.....	8
2.3	การตรวจวัดความเร็วรอบเพื่อใช้หาค่าไกลของมอเตอร์.....	9
2.4	วงจรมุมลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	11
2.5	วงจรมุมลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามวิธี ORMEL96.....	11
2.6	การเปรียบเทียบความแม่นยำของการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์แต่ละวิธี.....	16
2.7	แผนผังการทำงานการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค.....	18
2.8	กระบวนการคำนวณ BWOA.....	20
2.9	กระบวนการกลายพันธุ์.....	21
2.10	Pseudo Code ในกระบวนการคำนวณ BWOA.....	22
2.11	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบง่าย.....	24
3.1	วงจรมุมลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	35
3.2	กระบวนการประมาณค่าในวงจรมุมลของมอเตอร์ด้วยวิธี PSO.....	37
3.3	กระบวนการประมาณค่าในวงจรมุมลของมอเตอร์ด้วยวิธี BWOA.....	39
4.1	การลู่เข้าของกระบวนการคำนวณ PSO.....	41
4.2	ค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบในการคำนวณ 50 ครั้งด้วยวิธี PSO.....	45
4.3	ค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบในการคำนวณ 50 ครั้งด้วยวิธี BWOA.....	46
4.4	ค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบในการคำนวณ 50 ครั้งด้วยวิธี GA.....	46
4.5	การลู่เข้าของคำตอบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	50
4.6	วงจรถดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์.....	51
4.7	การทดสอบสภาวะไร้อโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	52
4.8	อุปกรณ์ในการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	ผลลัพธ์ของ R_1 ณ จุดการทำงานที่ 25% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 56
4.10	ผลลัพธ์ของ X_1 ณ จุดการทำงานที่ 25% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 56
4.11	กราฟ R_2 ณ จุดการทำงานที่ 25% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 57
4.12	ผลลัพธ์ของ X_2 ณ จุดการทำงานที่ 25% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 57
4.13	ผลลัพธ์ของ X_m ณ จุดการทำงานที่ 25% จากการคำนวณ 30 ครั้ง 58
4.14	ผลลัพธ์ R_1 ณ จุดการทำงานที่ 50% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 59
4.15	ผลลัพธ์ของ X_1 ณ จุดการทำงานที่ 50% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 59
4.16	ผลลัพธ์ของ R_2 ณ จุดการทำงานที่ 50% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 60
4.17	ผลลัพธ์ของ X_2 ณ จุดการทำงานที่ 50% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 60
4.18	ผลลัพธ์ของ X_m ณ จุดการทำงานที่ 50% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 61
4.19	ผลลัพธ์ของ R_1 ณ จุดการทำงานที่ 75% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 62
4.20	ผลลัพธ์ของ X_1 ณ จุดการทำงานที่ 75% จากการคำนวณ 30 ครั้ง 62
4.21	ผลลัพธ์ของ R_2 ณ จุดการทำงานที่ 75% จากการคำนวณ 30 ครั้ง 63
4.22	ผลลัพธ์ของ X_2 ณ จุดการทำงานที่ 75% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 63
4.23	ผลลัพธ์ของ X_m ณ จุดการทำงานที่ 75% จากการคำนวณ 30 ครั้ง 64
4.24	ผลลัพธ์ของ R_1 ณ จุดการทำงานที่ 100% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 65
4.25	ผลลัพธ์ของ X_1 ณ จุดการทำงานที่ 100% จากการคำนวณ 30 ครั้ง 65
4.26	ผลลัพธ์ของ R_2 ณ จุดการทำงานที่ 100% จากการคำนวณ 30 ครั้ง 66
4.27	ผลลัพธ์ของ X_2 ณ จุดการทำงานที่ 100% จากการคำนวณ 30 ครั้ง 66
4.28	ผลลัพธ์ของค่า X_m ณ จุดการทำงานที่ 100% จากการคำนวณ 30 ครั้ง..... 67
4.29	ผลลัพธ์ของค่า R_1 ณ 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%) จากการ คำนวณ 30 ครั้ง..... 68
4.30	ผลลัพธ์ของค่า X_1 ณ 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%) จากการ คำนวณ 30 ครั้ง..... 68
4.31	ผลลัพธ์ของค่า R_2 ณ 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%) จากการ คำนวณ 30 ครั้ง..... 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ผลลัพธ์ของค่า X_2 ณ 4 จุดการทำงาน(25%, 50%, 75% และ 100%) จากการ คำนวณ 30 ครั้ง.....	69
4.33 ผลลัพธ์ของค่า X_m ณ 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%) จากการ คำนวณ 30 ครั้ง.....	70



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

c_1	=	ค่าตัวเร่งคงที่ของอนุภาค
c_2	=	ค่าตัวเร่งคงที่ของอนุภาคทั้งหมด
d	=	มิติ (Dimension) ของขอบเขตที่ต้องการค้นหา
$gbest_d$	=	อนุภาคที่ค้นหาคำตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด
HP_{rated}	=	พิกัดแรงม้าของมอเตอร์ (hp)
$iter$	=	รอบของการคำนวณ
$iter_{max}$	=	รอบสูงสุดของการคำนวณ
I	=	กระแสไฟฟ้า (A)
I_A	=	กระแสที่สายเฟส A
I_B	=	กระแสที่สายเฟส B
I_C	=	กระแสที่สายเฟส C
I_L	=	กระแสสายของมอเตอร์ (A)
$I_{Li,cal}$	=	กระแสด้านเข้าของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ
$I_{Li,mea}$	=	กระแสด้านเข้าของมอเตอร์ที่ได้จากการวัด
I_{rate}	=	กระแสพิกัดของมอเตอร์ (A)
I_r^{rated}	=	กระแสพิกัดของโรเตอร์ (A)
I^{cal}	=	กระแสของมอเตอร์จากการคำนวณ
I_k^{cal}	=	กระแสของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณในครั้งที่ k (A)
I_k^{meas}	=	กระแสของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดค่าในครั้งที่ k (A)
LF	=	ตัวประกอบโหลด (Load Factor)
h	=	ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)
n_s	=	ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์เป็นรอบต่อนาที (rpm)
n_r	=	ความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะทำงานเป็นรอบต่อนาที (rpm)
n_r^{rated}	=	ความเร็วรอบพิกัดของมอเตอร์เป็นรอบต่อนาที (rpm)
NC	=	จำนวนครั้งการทำงาน
N_p	=	จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์
$pbest_i$	=	ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหามาแล้วของอนุภาคแต่ละตัว

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

P	=	กำลังไฟฟ้าจริง (W)
P_{in}	=	กำลังงานด้านเข้าของมอเตอร์
P_{out}	=	กำลังงานด้านออกที่แกนเพลลาของมอเตอร์
P_{rated}	=	กำลังงานไฟฟ้าพิกัดของมอเตอร์ (W, kW)
P_{losses}	=	กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์
P_{fw}	=	ความสูญเสียจากความเสียดทานและลม (W)
P_{stray}	=	ความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลดของมอเตอร์ (W)
P_{cal}	=	กำลังไฟฟ้าจริงของมอเตอร์จากการคำนวณ
P_k^{cal}	=	กำลังไฟฟ้าจริงของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณในครั้งที่ k (W)
P_k^{meas}	=	กำลังไฟฟ้าจริงของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดค่าในครั้งที่ k (W)
PF	=	ตัวประกอบกำลังของมอเตอร์
PF^{cal}	=	ตัวประกอบกำลังของมอเตอร์จากการคำนวณ
$PF_{i,cal}$	=	ตัวประกอบกำลังที่ได้จากการคำนวณ
$PF_{i,mea}$	=	ตัวประกอบกำลังที่ได้จากการวัด
PF_k^{cal}	=	ตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณในครั้งที่ k
PF_k^{meas}	=	ตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดค่าในครั้งที่ k
R_1	=	ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ (Ω)
R_2	=	ความต้านทานโรเตอร์อ้างอิงด้านสเตเตอร์ (Ω)
R_{SLL}	=	ความต้านทานสูญเสียแบบสเตรย์อ้างอิงด้านสเตเตอร์ (Ω)
s	=	ค่าไถล
s_{rated}	=	ค่าไถลที่พิกัดของมอเตอร์
s^{cal}	=	ค่าไถลของมอเตอร์จากการคำนวณ
t	=	ครั้งที่ทำการค้นหา (Iteration)
T_{ag}	=	แรงบิดช่องว่างอากาศ (Nm)
T_{shaft}	=	แรงบิดที่แกนมอเตอร์ (Nm)
v_i	=	$(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ เหนืออัตราความเร็วของอนุภาคที่ i
V	=	แรงดันไฟฟ้า (V)
V_L	=	แรงดันสายของมอเตอร์ (V)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

V_{rated}	=	แรงดันสายพิกัดของมอเตอร์ (V)
V_{AB}	=	แรงดันระหว่างเฟส A กับเฟส B (V)
V_{CA}	=	แรงดันระหว่างเฟส C กับเฟส A (V)
ω_m	=	ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของมอเตอร์ (rad/s)
w	=	ตัวประกอบน้ำหนักความเฉื่อย (Inertial Weight Factor)
w_{max}	=	ค่าสูงสุดของตัวประกอบน้ำหนักความเฉื่อย
w_{min}	=	ค่าต่ำสุดของตัวประกอบน้ำหนักความเฉื่อย
x_i	=	$(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ แทนตำแหน่งของอนุภาคที่ i
X_1	=	รีแอกแตนซ์การรั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ (Ω)
X_2	=	รีแอกแตนซ์การรั่วไหลของขดลวดโรเตอร์ของมอเตอร์อ้างอิงด้านสเตเตอร์ (Ω)
X_m	=	รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ (Ω)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในการวิเคราะห์สมรรถนะและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีที่แม่นยำที่สุดคือการทดสอบในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามเมื่อมอเตอร์มีการติดตั้งใช้งานไปแล้วเป็นระยะเวลาอันยาวนานคุณลักษณะของมอเตอร์อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งการที่จะทราบสมรรถนะและประสิทธิภาพของมอเตอร์นั้นจะทำได้ยากเนื่องจากผู้ใช้งานไม่สะดวกในการหยุดเดินเครื่องมอเตอร์เพื่อขนย้ายไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทำให้มีการศึกษาวิธีการวิเคราะห์สมรรถนะและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่สามารถทำได้ในขณะที่มอเตอร์ยังเดินเครื่องอยู่ อาทิ การประเมินประสิทธิภาพจากค่ากระแส (Current Method) การประเมินประสิทธิภาพจากค่าไถล (Slip Method) โดยวิธีที่สามารถช่วยให้วิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ได้ค่อนข้างแม่นยำคือการวิเคราะห์จากวงจรสมมูลของมอเตอร์

ทั้งนี้การที่จะทราบวงจรสมมูลของมอเตอร์ที่แม่นยำนั้นจะต้องทำให้ห้องปฏิบัติการตามขั้นตอนการทดสอบ ซึ่งโดยส่วนมากมอเตอร์ที่มีขนาดไม่ใหญ่ทางผู้ผลิตมักจะไม่ได้ออกข้อมูลดังกล่าวมากในเอกสารระบุคุณลักษณะ ทำให้การวิเคราะห์สมรรถนะและประสิทธิภาพของมอเตอร์ทำได้ยากยิ่งไปกว่านั้นเมื่อมีการใช้งานมอเตอร์เป็นเวลานานหลายปี คุณลักษณะและค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าในขณะที่ยังเป็นมอเตอร์ใหม่ การที่จะสามารถทราบได้ว่ามอเตอร์มีวงจรสมมูลเป็นอย่างไรในขณะทำงานจึงเป็นกระบวนการที่เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์สมรรถนะและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีการใช้งานมากที่สุดในอุตสาหกรรม

วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอการศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ปลดโหลดด้วยปัญญาประดิษฐ์ โดยจะมีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกระบวนการแมงมุมแม่ม่ายดำ (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA)

1.2.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.2 เพื่อพัฒนากระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด

1.2.3 เพื่อประยุกต์ใช้วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด

1.2.4 เพื่อประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด

1.2.5 เพื่อประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกระบวนการแมงมุมแม่ม่ายดำ (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA) ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด

1.2.6 เพื่อศึกษาความแตกต่างของผลลัพธ์ในข้อที่ 1.2.2-1.2.4 และแนวทางในการประยุกต์ใช้งาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลดด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA)

1.3.2 พัฒนาการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลดด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO)

1.3.3 พัฒนาการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลดด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกระบวนการแมงมุมแม่ม่ายดำ (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA)

1.3.4 ทดสอบวิธีการที่พัฒนาขึ้นกับเปรียบเทียบกับวิธีการที่มีผู้นำเสนอไว้

1.3.5 ทดสอบวิธีการที่พัฒนาด้วยค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์จากค่าที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.3.6 ทดสอบวิธีการที่พัฒนาในการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลที่ใช้ในการทดสอบวิธีการจะใช้ค่าจากเอกสารอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำกับวิธีที่มีผู้เสนอไว้แล้ว

1.4.2 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบวิธีการจะใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์จริงในห้องปฏิบัติการ

1.5 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.5.1 สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลดด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

1.5.2 ได้วิธีการในการการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลดจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

1.6 องค์ประกอบของรูปเล่มวิทยานิพนธ์

องค์ประกอบของรูปเล่มวิทยานิพนธ์นี้มีดังนี้

บทที่ 2 แสดงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ โดยแบ่งเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรสมมูลของมอเตอร์ และงานวิจัยที่มีผู้ศึกษาไว้

บทที่ 3 เป็นการอธิบายกระบวนการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงานด้วยปัญญาประดิษฐ์ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษากระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงานโดยได้ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ประกอบด้วย กระบวนการคัดสรรทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) การหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) และกระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีแมงมุมแม่ม่ายดำ (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA) โดยมีการสร้างแบบจำลองของปัญหาจากวงจรสมมูล และได้ทดสอบแต่ละวิธีที่ค่าจำนวนประชากรและจำนวนรอบการคำนวณที่แตกต่างกัน

บทที่ 4 แสดงผลลัพธ์การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยปัญญาประดิษฐ์ โดยในบทนี้จะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยปัญญาประดิษฐ์ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด เพื่อศึกษาความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละวิธี รวมทั้งการทดสอบกระบวนการคำนวณกับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ที่ได้จากการทดสอบใน

ห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลลัพธ์แนวทางในการประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไม่ปลดโหลด

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลและข้อเสนอแนะจากศึกษาวิจัย



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 วิธีประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์

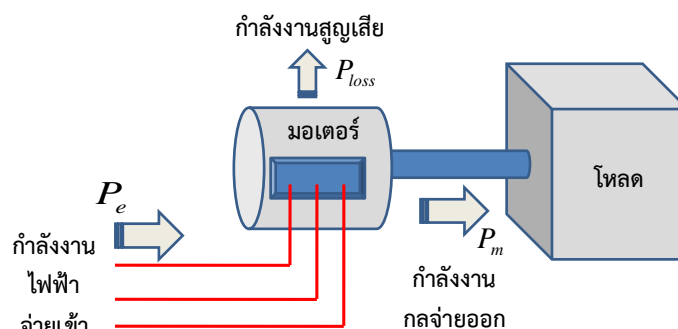
วิธีทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ตามมาตรฐานที่ยอมรับกันแพร่หลายคือมาตรฐาน IEEE-112 (IEEE Standard 112-2004) และ IEC60034 (IEC60034, 1999) โดยตามทฤษฎีแล้วการตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ถือว่าตรงกับความเป็นจริงที่สุดคือ การตรวจวัดกำลังงานที่เพลา (Shaft Power Output) ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE-112 จะใช้วิธีการตรวจวัดและคำนวณจากสมการที่ (2.1)

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100\% \quad (2.1)$$

ทั้งนี้กำลังงานด้านออกที่แกนเพลลาของมอเตอร์ P_{out} จะถูกคำนวณจากค่าแรงบิดที่แกนและความเร็วรอบขณะมอเตอร์ขับโหลดขนาดใดๆ ตามสมการที่ (2.2)

$$P_{out} = T_{shaft} \times \omega_m \quad (2.2)$$

การทดสอบเพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ทั้งนี้การวัดความเร็วสามารถทำได้โดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบซึ่งมีแบบที่ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับเพลลามอเตอร์ได้ ในขณะที่การวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์สามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่องวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด โดยปกติแล้วการวัดแรงบิดของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ได้ถูกติดตั้งไปแล้วจะกระทำได้ค่อนข้างลำบาก



รูปที่ 2.1 การทดสอบเพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์

สำหรับวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEC60034 ได้มีการปรับปรุงเพิ่มเติมโดยแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือการทดสอบทางตรง (Direct method) และการทดสอบทางอ้อม (Indirect method) ซึ่งการทดสอบทางตรงจะมีขั้นตอนและรายละเอียดแบบเดียวกับวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE-112 สำหรับการทดสอบทางอ้อมจะใช้วิธีการคำนวณจากค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์ P_{losses} แทนการคำนวณกำลังงานด้านออกจากการวัดค่าแรงบิดตามสมการที่ (2.3)

$$\eta = \frac{(P_{in} - P_{losses})}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.3)$$

จะเห็นได้ว่าการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีทางอ้อมตามมาตรฐาน IEC60034 จะต้องมีการวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียรวมในมอเตอร์ซึ่งประกอบด้วยหลายส่วนตามที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยกำลังงานสูญเสียบางส่วนต้องใช้วิธีการทดสอบขณะไม่มีโหลดและหรือขณะยึดโรเตอร์ ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพแบบนี้มักจะทำในห้องทดลองและเป็นไปได้ยากในการประเมินหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่หน้างานจริง

นอกจากการทดสอบมอเตอร์ที่มาตรฐานแนะนำไว้จะกระทำได้ยากในกรณีที่มอเตอร์ได้ติดตั้งไปแล้ว ยังมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานในการตรวจวัดไว้ด้วย เป็นต้นว่า แรงดันต้องมีความสมดุลและอยู่ในช่วงที่กำหนด อีกทั้งมาตรฐานแต่ละมาตรฐานยังให้ผลลัพธ์ค่าประสิทธิภาพที่แตกต่างกันอีกด้วย ดังนั้นวิธีการประเมินเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่หน้างานหรือขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่นั้นจึงมีความสำคัญ โดยวิธีการส่วนใหญ่ที่ถูกนำเสนอจะคำนึงถึงระดับการรบกวนต่อระบบหรือผู้ใช้งานและความถูกต้องของค่าที่ประเมินได้เป็นหลัก ปกติแล้วระดับการรบกวนมักถูกกำหนดจากประเภทของข้อมูลที่ต้องการวัดค่าในแต่ละวิธี รวมถึงค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งในกระบวนการและแผนดำเนินการทำงานของมอเตอร์ ทั้งนี้ผลตอบความแม่นยำของค่าประ

สิทธิรูปที่ประเมินได้จะถูกเปรียบเทียบกับวิธีการหาประสิทธิภาพโดยตรงตามมาตรฐานหรือวิธีการประเมินจากค่าแรงบิดที่แกนนั่นเอง

การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ติดตั้งไปแล้วที่โรงงานได้มีผู้เสนอไว้หลายวิธี [3-14] ซึ่งแต่ละวิธีมีความคลาดเคลื่อนและความสะดวกในการตรวจวัดรวมถึงการวิเคราะห์แตกต่างกัน อาทิ วิธีประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า วิธีประเมินจากค่าไถล และวิธีประเมินจากค่ากระแส ทั้งนี้หลักการของแต่ละวิธีโดยพื้นฐานสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.1.1.1 วิธีประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า (Input Power Method)

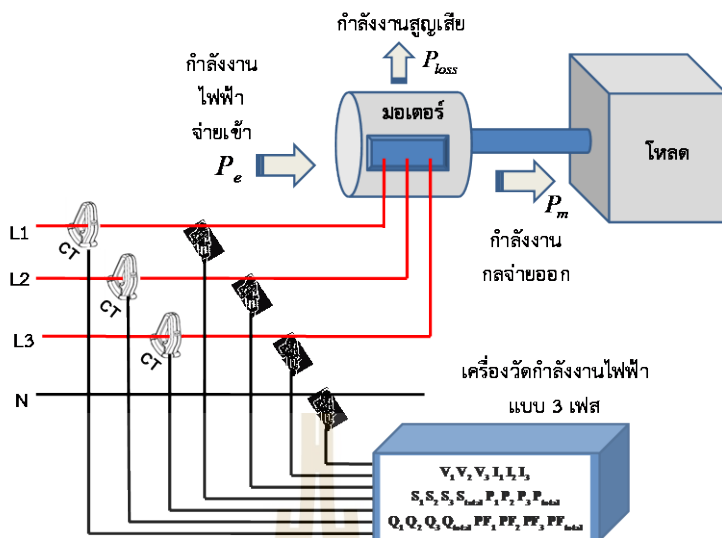
วิธีการประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้าเป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวกและจะได้ผลลัพธ์ที่ดีในกรณีที่มอเตอร์มีกราฟประสิทธิภาพเทียบกับโหลดที่ค่อนข้างคงที่ แต่โดยทั่วไปมอเตอร์จะถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่โหลดประมาณ 75% ซึ่งหากมอเตอร์ทำงานที่จุดต่างออกไปก็จะมีสิทธิรูปที่ต่างออกไปทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ได้ นอกจากนี้หากมอเตอร์มีการซ่อมบำรุงโดยการพันขดลวดใหม่ วิธีการนี้ก็จะมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้สูงเช่นกัน ทั้งนี้วิธีประเมินหาประสิทธิภาพของมอเตอร์อย่างง่ายโดยทั่วไปที่โรงงาน จะใช้การอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายเนื่องจากอาจมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์และการเข้าถึงในการตรวจวัดค่าที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ โดยจะประเมินค่าประสิทธิภาพจากสมการที่ (2.4)

$$\eta = \frac{(P_{rated} - LF)}{P_{in}} \quad (2.4)$$

โดยที่ LF คือค่าตัวประกอบโหลด (Load Factor) ที่แสดงร้อยละในการทำงานจริงของมอเตอร์ต่อพิกัด ซึ่งในทางปฏิบัติมักจะได้จากการประเมินและมีโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้สูง โดยค่าตัวประกอบโหลดสามารถหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$LF = \left(\frac{P_{in}}{P_{rated}} \right) \times 100 \quad (2.5)$$

แผนภาพการตรวจวัดค่าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 คือการใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power Meter) ทำการตรวจวัดค่ากำลังงานโดยตรง หรือสำหรับการตรวจวัดด้วยวิธีนี้หากผู้ควบคุมมอเตอร์มีการติดตั้งเครื่องมือวัดไว้แล้วก็สามารถอ่านค่าจากตัวควบคุมได้โดยตรง ทั้งนี้ระดับการรบกวนการทำงานของมอเตอร์ถือว่าไม่มากนัก เนื่องจากสามารถต่อวงจรเพื่อวัดแรงดันและกระแสแบบคล่องวัดได้ ในขณะที่มอเตอร์ยังคงเดินเครื่องอยู่ได้



รูปที่ 2.2 การตรวจวัดค่ากำลังงานของมอเตอร์โดยใช้เครื่องวัดกำลังงานแบบคล่องวัด

2.1.1.2 วิธีประเมินจากค่าไถล (Slip Method)

วิธีประเมินจากค่าไถลเป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวกอีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์จากการวัดความเร็วรอบได้ และตามทฤษฎีแล้วจะสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้แม่นยำกว่าวิธีการแผ่นป้าย อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้มากจากความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและค่าไถลที่ไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงความจำเป็นในการใช้เครื่องวัดความเร็วรอบที่มีความแม่นยำสูงด้วย การหาประสิทธิภาพด้วยวิธีการนี้จะทำการประเมินค่ากำลังงานด้านออกที่เพลจากสมการที่ (2.6)

$$P_{out} = \left(\frac{s}{s_{rated}} \right) \times P_{rated} \quad (2.6)$$

โดยที่

$$s = \frac{(n_s - n_r)}{n_s} \quad (2.7)$$

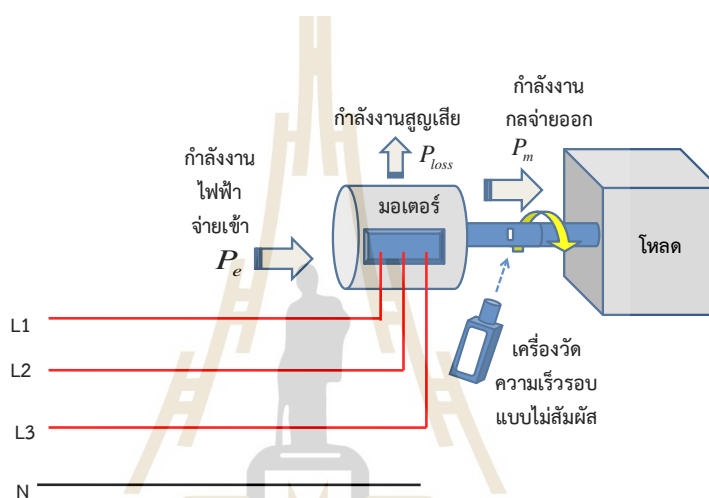
และ

$$s_{rated} = \frac{n_s - n_r^{rated}}{n_s} \quad (2.8)$$

อย่างไรก็ตาม การคำนวณค่ากำลังงานด้านออกด้วยวิธีประเมินจากค่าไถล อาจถูกปรับปรุงให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นได้จากกรณีที่มอเตอร์ได้รับแรงดันแปรเปลี่ยนไปจากค่าพิกัดตามสมการที่ (2.9) และสามารถหาค่าประสิทธิภาพได้จากสมการที่ (2.3)

$$P_{out} = \left(\frac{s}{s_{rated}}\right) \times P_{rated} \times \left(\frac{V_L}{V_{rated}}\right)^2 \quad (2.9)$$

วิธีการตรวจวัดค่าไถล (s) จะกระทำได้โดยการวัดความเร็วรอบด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส (Non-Contact Tachometer) ที่สามารถวัดได้ในขณะที่มอเตอร์ยังคงทำงานตามปกติดังแสดงในรูปที่ 2.3 อย่างไรก็ตาม การวัดด้วยวิธีนี้จะมีระดับการรบกวนการทำงานของมอเตอร์เฉพาะในกรณีที่มอเตอร์ไม่ได้ทำการติดแถบหรือป้ายสีสะท้อนแสงไว้ จึงจำเป็นต้องหยุดเดินเครื่องหรือหาช่วงเวลาที่ยอดเดินเครื่องเพื่อติดแถบหรือป้ายสีสะท้อนแสง



รูปที่ 2.3 การตรวจวัดความเร็วรอบเพื่อใช้หาค่าไถลของมอเตอร์

2.1.1.3 วิธีประเมินจากค่ากระแส (Current Method)

ในทำนองเดียวกับการประเมินด้วยวิธีไถล การประเมินจากค่ากระแสนี้ยังคงเป็นการใช้ข้อมูลไม่มากนักจากการวัดเพื่อประมาณค่ากำลังงานด้านออกของมอเตอร์ ซึ่งข้อมูลที่ต้องการวัดได้แก่ ค่ากระแสและกำลังงานด้านเข้าของมอเตอร์ โดยสามารถประเมินค่ากำลังงานด้านออกได้จากสมการที่ (2.10)

$$P_{out} = \left(\frac{I_L}{I_{rated}}\right) \times P_{rated} \quad (2.10)$$

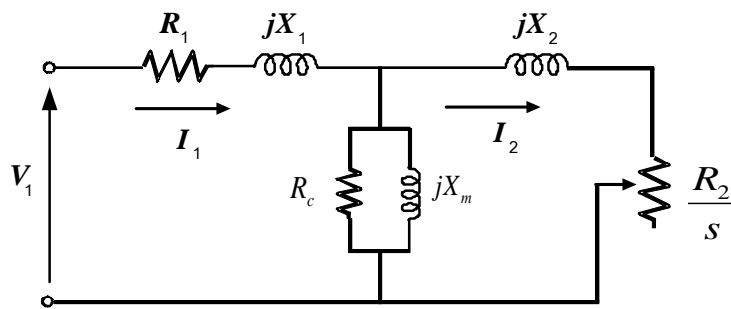
ทั้งนี้การวัดค่ากระแสสามารถทำได้โดยใช้เครื่องวัดกระแสแบบคล็องวัดตามรูปที่ 2.2 ซึ่งมีระดับของการรบกวนการทำงานของมอเตอร์ที่ต่ำ และสามารถทำได้ในขณะที่มอเตอร์ยังทำงานอยู่ตามปกติ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังคงมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้มากจากความสัมพันธ์ระหว่างโหลดกับค่ากระแสที่ไม่เป็นเชิงเส้น

วิธีการประเมินค่าประสิทธิภาพทั้ง 3 วิธีตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ค่อนข้างมีความเหมาะสมและสะดวกในการเลือกใช้สำหรับการประเมินในสภาวะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่ เนื่องจากมีระดับการรบกวนต่อระบบและผู้ทำงานค่อนข้างต่ำ อีกทั้งข้อมูลที่ต้องการวัดค่าเพื่อประกอบการคำนวณก็มีไม่มาก ซึ่งสามารถใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าแบบทั่วไปได้ อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญที่ต้องยอมรับคือความถูกต้องของค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้จากทั้ง 3 วิธีการนี้ จะค่อนข้างมีความคลาดเคลื่อนสูงจากค่าจริงที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการวัดค่าแรงบิดที่แกนมอเตอร์ นอกจากนี้วิธีการประเมินดังกล่าวแล้วยังมีวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบอื่นอีกที่มีความแม่นยำมากขึ้น แต่อาจไม่เหมาะสมกับการประเมินที่สภาวะการทำงานจริงเนื่องจากข้อมูลบางอย่างจะได้จากการทดสอบมอเตอร์ซึ่งส่งผลกระทบต่อตรงกับผู้ปฏิบัติงานค่อนข้างมาก อาทิ วิธีประเมินจากวงจรสมมูล วิธีประเมินจากค่ากำลังงานสูญเสีย และวิธีประเมินจากแรงบิดช่องว่างอากาศ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากนำวิธีการเหล่านี้มาประยุกต์ก็อาจสามารถนำมาใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ที่สภาวะการทำงานจริงได้เช่นกัน

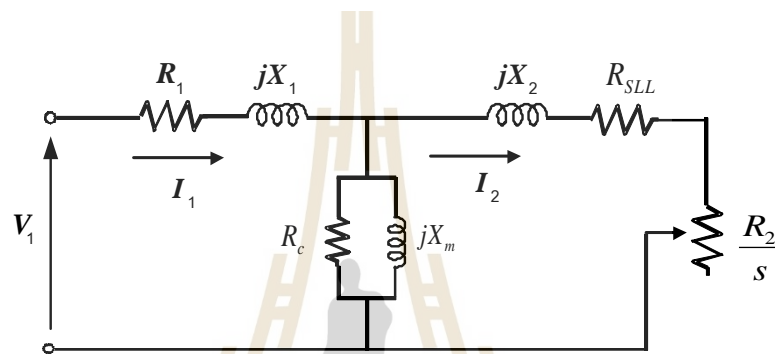
2.1.1.4 วิธีประเมินจากวงจรสมมูล (Equivalent Circuit Method)

มาตรฐาน IEEE-112 กล่าวถึงวิธีประเมินประสิทธิภาพจากวงจรสมมูลว่ามีการรบกวนต่อระบบและผู้ปฏิบัติงานมากและไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในสภาวะการทำงานจริง ถึงแม้ค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้จะมีความแม่นยำค่อนข้างสูง เนื่องจากวิธีนี้ต้องทำการทดสอบขณะที่มอเตอร์ถูกยึดเพลาและขณะที่เดินตัวเปล่า เพื่อนำมาคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ตามวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.4 เพื่อนำมาใช้เป็นแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าประสิทธิภาพตามทฤษฎีการทำงานต่อไป

นอกจากนี้ยังมีผู้เสนอวิธีประยุกต์จากการประเมินด้วยวงจรสมมูล โดยการหาค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์จากข้อมูลที่แผ่นป้าย (Nameplate Data) ซึ่งจะมีเฉพาะความเร็วรอบโรเตอร์เท่านั้นที่ต้องทำการวัดค่า วิธีการนี้มีชื่อเรียกว่าการประเมินด้วยวงจรสมมูลจากข้อมูลแผ่นป้าย (Nameplate Equivalent-Circuit) หรือ ORMEL96 [14] สิ่งสำคัญที่ผู้แนะนำให้เสนอในวิธีการนี้คือการเพิ่มความต้านทานเพื่อใช้เป็นแบบจำลองของค่ากำลังงานสูญเสียแบบสเตรย์ (Stray Load Loss Resistance) โดยต่ออนุกรมอยู่ในส่วนของวงจรโรเตอร์ตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามวิธี ORMEL96

ด้วยวิธีการนี้ค่าความต้านทานของสเตเตอร์ (R_1) อาจหาได้จากการวัดโดยตรง ณ อุณหภูมิขณะขับโหลดเต็มพิกัด หรืออาจประเมินได้จากความสัมพันธ์ของข้อมูลพิกัดต่างๆ จากแผ่นป้ายข้อมูลตามมาตรฐาน NEMA (NEMA MG1-2003 Standard) ดังแสดงในสมการที่ (2.11)

$$R_1 = (1.1 \times 10^{-4}) \times N_p^{0.52} \times HP_{rated}^{-1.26} \times V_L^2 \quad (2.11)$$

สังเกตเห็นชัดว่าการประเมินค่าความต้านทานสเตเตอร์จากการพิกัดต่างๆ ตามข้อมูลแผ่นป้ายนี้ อาจเหมาะสมกับการนำไปใช้ประเมินกับมอเตอร์ใหม่ซึ่งยังคงมีสภาพการทำงานเป็นไปตามค่าพิกัดที่ระบุไว้ แต่หากเป็นมอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานแล้วหลายปีหรือมอเตอร์ที่ได้รับการพันขดลวดใหม่จากการชำรุด การประเมินค่าความต้านแบบนี้อาจไม่เหมาะสมเนื่องจากไม่อาจมั่นใจได้ว่ามอเตอร์จะยังคงทำงานตามค่าพิกัดข้อมูลได้อยู่

ตามมาตรฐาน IEEE-112 ค่าความต้านทานสูญเสียแบบสเตอริย์ (R_{SLL}) สามารถพิจารณาจากค่าร้อยละของค่ากำลังงานสูญเสียแบบสเตอริย์ ($\%SL$) เทียบค่าพิกัดกำลังงานด้านออกของมอเตอร์โดยจะถูกปรับสัดส่วนตามอัตราส่วนของกระแสโรเตอร์ที่พิกัดตามสมการที่ (2.12)

$$R_{SLL} = \%SL \times \frac{(P_{rated}/3)}{(I_{rated})^2} \quad (2.12)$$

สำหรับมอเตอร์ที่มีขนาดพิกัดต่ำกว่า 125 แอมแปร์ หรือ 93.25 kW สามารถกำหนดค่า $\%SL = 1.8\%$ ได้ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง $0.2 < \%SL < 1.8\%$ (IEEE Standard 112-2004) โดยค่าพิกัดกระแสโรเตอร์สามารถกำหนดค่าเริ่มต้นเป็น 80% ของค่าพิกัดกระแสสเตเตอร์จากแผ่นป้ายข้อมูลได้ อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานสูญเสียแบบสเตรย์ในสมการที่ (2.12) สามารถเขียนได้ใหม่โดยอาศัยหลักทฤษฎีในการทำงานดังสมการที่ (2.13)

$$R_{SLL} = \frac{\%SL(1-s_{rated})R_2}{100 \times s_{rated}} \quad (2.13)$$

แม้ว่าการประเมินหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีการ ORMEL96 นี้จะมีระดับการรบกวนต่อระบบและผู้ปฏิบัติงานค่อนข้างต่ำ แต่ด้วยวิธีการหาค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูลจากข้อมูลแผ่นป้ายจึงทำให้มีความคลาดเคลื่อนของค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้ในช่วง $\pm 4\%$ (J. S. Hsu, et.al., 1998) อย่างไรก็ตาม ยังถือว่ามีคลาดเคลื่อนต่ำกว่าวิธีอื่นที่กล่าวมาในตอนต้น ในปัจจุบันยังได้มีแนวทางในการศึกษาใหม่ที่จะหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลขณะที่มอเตอร์ทำงานอยู่โดยไม่ต้องปลดโหลดด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (Mayank Pratap Singh, 2013)

ตัวอย่างเกณฑ์ที่ใช้สำหรับการเลือกค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของค่าตัวแปรต่างๆ จะพิจารณาจากฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) สามารถแสดงได้ตามสมการที่ (2.14) ซึ่งเป็นการดูจากค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของตัวประกอบกำลังและกระแสด้านเข้าของมอเตอร์ขณะทำงานที่สภาวะใดๆ โดยจะต้องมีค่าต่ำที่สุด

$$F_{objective} = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{PF_{i,cal}}{PF_{i,mea}} - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{I_{1i,cal}}{I_{1i,mea}} - 1 \right)^2 \quad (2.14)$$

อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของผลตอบจากการใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์นั้น จะขึ้นอยู่กับจำนวนจุดทำงานของมอเตอร์ที่ขนาดโหลดต่างๆ กล่าวคือ การหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลจะมีความแม่นยำมากขึ้นโดยอาจมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 3% ได้ หากทำการจำลองจากจุดทำงานของมอเตอร์หลายจุด [17] หรือในกรณีที่สามารถวัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ได้ (R_1) ก็จะทำให้กระบวนการหาผลตอบมีความเร็วและแม่นยำมากขึ้นด้วย

2.1.1.5 วิธีประเมินจากค่ากำลังงานสูญเสีย (Segregated Loss Method)

รูปแบบการประเมินของวิธีการนี้คล้ายกับการประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ทางอ้อมตามมาตรฐาน IEC60034 และมาตรฐาน IEEE-112 กล่าวคือจะต้องประเมินหาค่ากำลังงานสูญเสียต่างๆ ของมอเตอร์ทั้งหมด โดยถ้าไม่คำนึงถึงการรบกวนต่อระบบและผู้ปฏิบัติงาน กำลังงานสูญเสียบางส่วนจะถูกประเมินจากการทดสอบมอเตอร์แบบไม่มีโหลดและ/หรือการทดสอบแบบยึดโรเตอร์ รวมถึงการทดสอบแบบแปรเปลี่ยนค่าแรงดันและการทดสอบแบบกลับทางหมุน เป็นต้น วิธีการประเมินประสิทธิภาพแบบนี้ค่อนข้างแม่นยำมีความคลาดเคลื่อนในช่วง $\pm 2\%$ (J. S. Hsu, et.al., 1998) อย่างไรก็ตาม หากคำนึงถึงระดับการรบกวนต่อระบบและผู้ปฏิบัติงาน ค่ากำลังงานสูญเสียบางส่วนอาจใช้วิธีประเมินจากค่าที่มาตรฐานแนะนำ เช่น มาตรฐาน IEEE-112 (วิธี E1) ได้ ประมาณค่ากำลังงานสูญเสียแบบสตรีย์ของมอเตอร์ขนาดต่างๆ โดยคิดเป็นร้อยละของค่าพิกัดกำลังงานของมอเตอร์

นอกจากนี้ผู้แนะนำเสนอวิธีการ OHME (Ontario Hydro Modified Method E) ได้ประเมินให้ค่ากำลังงานสูญเสียจากแกนรวมถึงความฝืดและแรงต้านลมรวมกันมีค่าประมาณ 3.5% ถึง 4.2% ของค่าพิกัดกำลังงานด้านเข้าของมอเตอร์ซึ่งได้มาจากการทดสอบกลุ่มตัวอย่างของมอเตอร์หลายขนาด โดยค่ากำลังงานสูญเสียแบบสตรีย์ยังคงใช้จากตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานสเตเตอร์ของวิธีการนี้ถูกประเมินจากค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามค่ากระแสของมอเตอร์ ผลตอบค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้ด้วยวิธีการนี้ค่อนข้างดีโดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 2\%$ ถึง $\pm 3\%$ (J. S. Hsu, et.al., 1998)

2.1.1.6 วิธีประเมินจากค่าแรงบิดช่องว่างอากาศ (Air-Gap Torque Method)

วิธีการนี้อาศัยการตรวจวัดค่าแรงดันและกระแสเป็นช่วงเวลา รวมถึงจำเป็นต้องทราบค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ แล้วจึงนำมาคำนวณหาค่าแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ (T_{ag}) ตามสมการที่ (2.15) (J. S. Hsu, and B. P. Scoggins, 1995)

$$T_{ag} = \frac{N_P}{2\sqrt{3}} \left\{ \begin{aligned} &(i_A - i_B) \int [v_{CA} - R_1(i_C - i_A)] dt - \\ &(i_C - i_A) \int [v_{AB} - R_1(i_A - i_B)] dt \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

ค่าประสิทธิภาพจะถูกประเมินจากค่ากำลังงานด้านออกของมอเตอร์ตามที่ได้ออกไว้ข้างต้น โดยค่าแรงบิดที่แกนเพลาสถาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.16)

$$T_{shaft} = T_{ag} - \left(\frac{P_{fw}}{\omega_m} \right) - \left(\frac{P_{stray}}{\omega_m} \right) \quad (2.16)$$

ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ในสภาวะที่ได้รับแรงดันหรือกระแสที่ไม่สมดุลได้ ซึ่งจะสะท้อนกับสภาพความเป็นจริงของโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ยังมีความลำบากในการทดสอบมอเตอร์แบบไม่มีโหลดเพื่อหาค่ากำลังงานสูญเสียทางกล (ความฝืดและแรงต้านลม) และกำลังงานสูญเสียแบบสเตรย์ ผลตอบค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้ด้วยวิธีการนี้ค่อนข้างดีกว่าทุกวิธีที่กล่าวมา โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 0.5\%$ (J. S. Hsu, et.al., 1998)

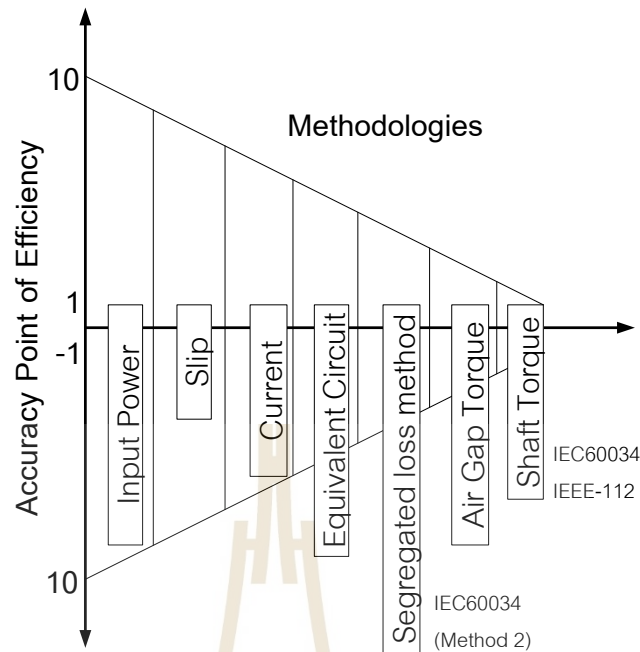
จากการศึกษาแนวทางในการตรวจวัดและประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงานจริงหน้างานในรูปแบบต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวไป รวมถึงการศึกษาข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี และการค้นคว้าหาแนวทางการปรับปรุงวิธีการตรวจประเมินให้เหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อสรุปเป็นข้อเสนอแนะแนวทางในการตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่หน้างานจริง จึงเป็นการศึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการวิเคราะห์หามาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจนและเป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณ

2.1.1.7 เปรียบเทียบความแม่นยำและระดับในการรบกวนการทำงานของมอเตอร์ของแต่ละวิธีการ

ผลเปรียบเทียบความแม่นยำในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละวิธีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 (J. S. Hsu, et.al., 1998) สำหรับระดับในการรบกวนการทำงานขณะที่ตรวจวัดของแต่ละวิธีการสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปการตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละวิธี

วิธีการ	ตัวแปรที่ต้องวัด	เครื่องมือที่ต้องใช้	สรุปการตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละวิธีแนวทาง
วิธีประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า (Input Power Method)	กำลังงานที่มอเตอร์ใช้	เครื่องวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด	การวิเคราะห์ถือว่าค่าประสิทธิภาพคงที่ตามค่าบนแผ่นป้าย
วิธีประเมินจากค่าไถล (Slip Method)	-กำลังงานที่มอเตอร์ใช้ -ค่าไถล (Slip)	-เครื่องวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด -เครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส	-ตรวจวัดความเร็วรอบเพื่อนำมาคำนวณค่าไถลเพื่อนำมาประมาณค่ากำลังงานที่มอเตอร์จ่าย โดยประมาณว่ากำลังงานที่มอเตอร์จ่ายแปรผันโดยตรงกับค่าไถล -ตรวจวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้
วิธีประเมินจากค่ากระแส (Current Method)	-กำลังงานที่มอเตอร์ใช้ -กระแสที่มอเตอร์ใช้	เครื่องวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด (ปกติจะวัดค่ากระแสได้ด้วย)	ตรวจวัดค่ากระแสของมอเตอร์เพื่อนำมาประมาณค่ากำลังงานที่มอเตอร์จ่ายโดยประมาณว่ากำลังงานที่มอเตอร์จ่ายแปรผันโดยตรงกับกระแสที่ใช้ ตรวจวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้
วิธีประเมินจากวงจรสมมูล (Equivalent Circuit Method)	-กำลังงานที่มอเตอร์ใช้ -กระแสที่มอเตอร์ใช้ -ค่าไถล (Slip)	-เครื่องวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด -เครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส	ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางปัญญาดิษฐ์ หากต้องการความแม่นยำที่สูงขึ้น ต้องวัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งต้องทำขณะที่มอเตอร์หยุดเดินเครื่อง
วิธีประเมินจากแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ (Air gap torque Method)	-กำลังงานที่มอเตอร์ใช้ -แรงดันและกระแสที่มอเตอร์ใช้แบบต่อเนื่อง -ค่าไถล (Slip)	เครื่องบันทึกค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด	ต้องมีการบันทึกค่าแรงดันและกระแสต่อเนื่องในระยะเวลาหนึ่ง ต้องวัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งต้องทำขณะที่มอเตอร์หยุดเดินเครื่อง



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบความแม่นยำของการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์แต่ละวิธี

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า วิธีประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า วิธีประเมินจากค่ากระแส และวิธีประเมินจากค่าสลิป ถึงแม้จะสามารถทำได้ค่อนข้างสะดวกแต่จะต้องยอมรับค่าความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพที่ประเมินได้ในระดับที่ค่อนข้างสูง ส่วนวิธีที่มีความแม่นยำมากจะเป็นการตรวจวิเคราะห์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ในลักษณะเดียวกัน จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าวิธีประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า วิธีประเมินจากค่ากระแส และวิธีประเมินจากค่าสลิป จะเป็นวิธีที่ทำได้จริงค่อนข้างสะดวกกว่าวิธีอื่นๆ ดังนั้นหากมีความจำเป็นต้องประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่หน้างานด้วยเครื่องมือวัดที่มีเงื่อนไขจำกัดอาจพิจารณาประเมินด้วยวิธีดังกล่าวโดยต้องยอมรับความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง และหากต้องการความแม่นยำที่สูงขึ้น ก็จะต้องใช้วิธีการอื่น เช่น วิธีการประเมินค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลหรือวิธีการประเมินจากแรงบิดที่ช่องว่างอากาศซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ตรวจวัดและวิธีวิเคราะห์ที่ซับซ้อนขึ้น

2.1.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO)

Kennedy และ Eberhart ได้นำเสนอแนวคิดของวิธีอนุภาคเป็นครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1995 ได้แรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมกรอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของสัตว์ เช่น ปลา หรือฝูงนก ซึ่งวิธีกลุ่มอนุภาคนี้เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมอาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร (Population based) แต่ละตัวดำเนินการ เรียกว่า “อนุภาค (Particle)” ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้อนุภาค

นี้จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มอยู่ในขอบเขตที่ต้องการค้นหาระหว่างแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนย้ายตำแหน่ง โดยอาศัยการอ้างอิงถึงตำแหน่งของตัวเอง และตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่เคลื่อนที่ผ่านมาแล้ว เพื่อใช้หาทิศทางเคลื่อนที่ต่อไปจนกว่าจะค้นพบค่าตอบที่ดีที่สุด ซึ่งอาจจะค้นพบด้วยตัวเองหรืออนุภาคใกล้เคียงระเบียบวิธีการดำเนินการของวิธีกลุ่มอนุภาค ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 2.7 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดขอบเขต ต่ำสุด สูงสุด x_{Lower} , x_{Upper} ของตัวแปรทุกตัวและให้ทำการสุ่มหาค่าเริ่มต้นของอนุภาคแต่ละตัว (x^t), สุ่มหาแต่ละมิติ, สุ่มหาความเร็วเริ่มต้น (v^t), จากนั้นกำหนดให้เป็นค่าเริ่มต้นของตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหาแล้วของอนุภาคแต่ละตัว ($pbest$) และกำหนดอนุภาคที่ค้นหาค่าตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด ($gbest$) ซึ่งค่าตอบเหล่านั้น นี้ต้องเป็นค่าตอบที่เป็นไปได้ นั่นคืออยู่ในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2 หาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละอนุภาค

ขั้นตอนที่ 3 ทำการประเมินเปรียบเทียบค่าของอนุภาคแต่ละตัวแล้วกำหนดให้เป็น $pbest$ จากนั้นเลือกค่าที่ดีจากค่า $pbest$ โดยกำหนดให้เป็น $gbest$

ขั้นตอนที่ 4 ปรับเปลี่ยนความเร็วใหม่ของอนุภาคของแต่ละตัว

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อได้ความเร็วใหม่จากขั้นตอนที่ 4 ให้ตรวจสอบคือ ถ้า

$$\begin{aligned} v_{id}^{t+1} &> v_d^{max} \\ v_{id}^{t+1} &= v_d^{max} \\ v_{id}^{t+1} &< v_d^{min} \\ v_{id}^{t+1} &= v_d^{min} \end{aligned} \quad (2.17)$$

ขั้นตอนที่ 6 ปรับเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ของอนุภาคของแต่ละตัว จากนั้นให้ตรวจสอบคือ ถ้า $x_{id}^{t+1} > P_d^{max}$, ให้ $x_{id}^{t+1} = P_d^{max}$ และถ้า $x_{id}^{t+1} < P_d^{min}$, ให้ $x_{id}^{t+1} = P_d^{min}$

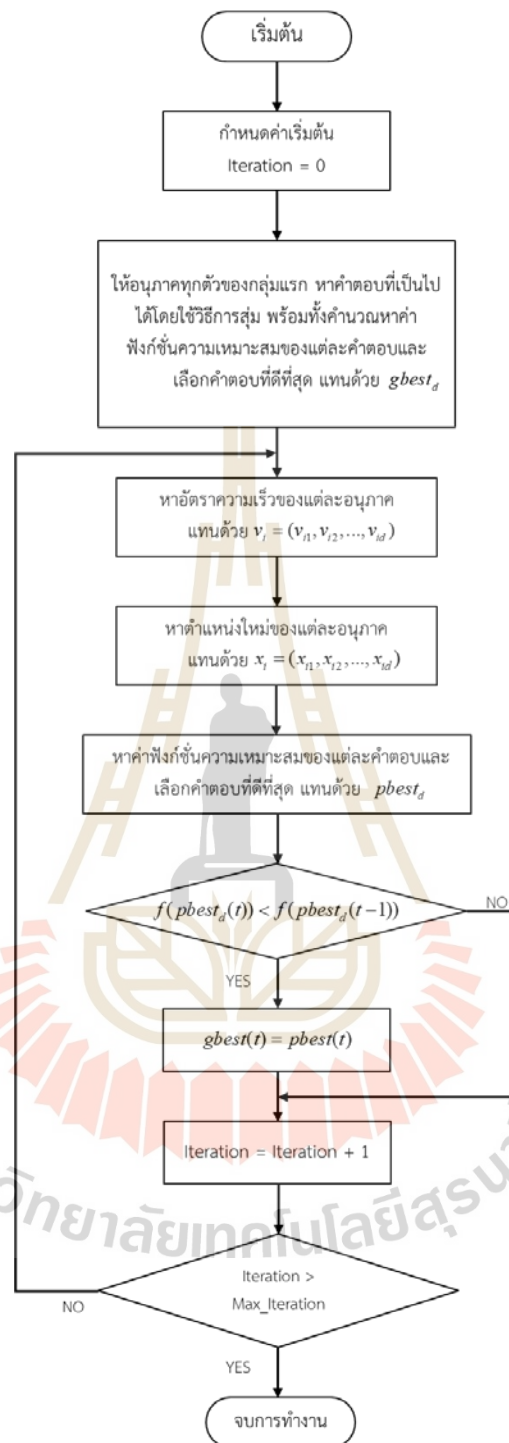
ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบตำแหน่งใหม่ของอนุภาคจะต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ แต่ถ้าไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับก็ให้อนุภาคนั้นอยู่ตำแหน่งเดิม

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าถึงค่าสูงสุดแล้วให้หยุดทำงาน ถ้ายังไม่ถึงค่าสูงสุดให้ย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 2

การเปลี่ยนความเร็ว และตำแหน่งของแต่ละอนุภาคสามารถคำนวณได้โดยใช้ความเร็วปัจจุบันและระยะทางระหว่าง $pbest_{id}$ ถึง $gbest_d$ ดังสมการ

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1rand() \cdot (pbest_{id} - x_{id}^t) + c_2rand() \cdot (gbest_d - x_{id}^t) \quad (2.18)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.7 แผนผังการทำงานการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

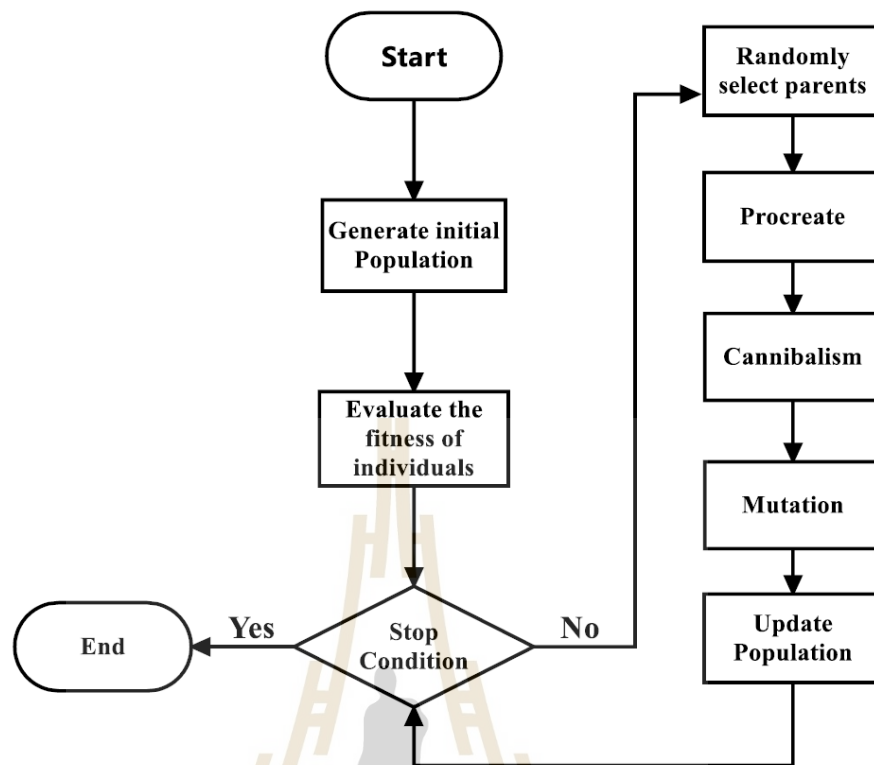
ความเร็วของอนุภาคที่ i ในรอบที่ t โดยที่ $v_d^{min} \leq v_{id}^t \leq v_d^{max}$ ค่า v^{max} ใช้ในการหาค่าความละเอียดของคำตอบ ถ้ามีค่ามากเกินไปจะทำให้อนุภาคบินผ่านคำตอบที่ดีที่สุดไป แต่ถ้ามีค่าน้อยเกินไปก็อาจจะค้นหาไม่ครอบคลุมทำให้ได้คำตอบที่ไม่ดี ดังนั้นจากการทดสอบมาแล้วควร จะกำหนดค่า v^{max} ประมาณ 10% 20% ของช่วงการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรแต่ละตัว

ค่าคงที่ c_1 และ c_2 แทนน้ำหนักของความเร็วแบบสุ่มของแต่ละอนุภาคผ่านตำแหน่ง $pbest$ และ $gbest$ ถ้ามีค่าน้อยเกินไป ในกรณีที่อนุภาคอยู่ห่างจากตำแหน่งเป้าหมายก็อาจจะหมดแรงก่อนถึงเป้าหมาย แต่ถ้ามีค่ามากเกินไปก็อาจจะบินข้ามเป้าหมายไป ดังนั้นค่า c_1 และ c_2 จากการทดสอบมาแล้ว ควรอยู่ระหว่าง 1.4 – 2.0 การเลือกค่า w ที่เหมาะสมดังสมการ

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \quad (2.20)$$

2.1.3 วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกระบวนการแมงมุมแม่ม่ายดำ (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA)

กระบวนการ BWOA สามารถแสดงได้ดังขั้นตอนในรูปที่ 2.8 เช่นเดียวกันกระบวนการหาค่าตอบแบบวิวัฒนาการวิธีอื่น กระบวนการหาค่าตอบด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดแบบแมงมุมแม่ม่ายดำ (BWOA) จะเริ่มจากกลุ่มประชากรของแมงมุมที่เป็นตัวแทนของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (แมงมุมที่แข็งแรงคือค่าตัวแปรที่ให้คำตอบที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุด) โดยในกระบวนการขยายพันธุ์ของแมงมุมแม่ม่ายดำนั้น ตัวเมียจะกินตัวผู้ขณะผสมพันธุ์หรือหลังจากนั้น และทำการวางไข่ที่ได้รับการผสมแล้ว เมื่อลูกแมงมุมออกจากไข่ก็จะมีการกินกันเองและอาจจะมีการกินตัวแม่ด้วย ลูกแมงมุมตัวที่แข็งแรงจะอยู่รอดต่อไปโดยปลิวไปกับลมและขยายพันธุ์รุ่นต่อไปในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 2.8 กระบวนการคำนวณ BWOA

กลุ่มประชากรเริ่มต้น (Initial population)

การกำหนดกลุ่มประชากรเริ่มต้นของ BWOA จะประกอบด้วยชุดตัวแปรที่จะหาคำตอบค่าเหมาะที่สุด ตามจำนวนตัวแปร (NV) คือ

$$Widow = [x_1, x_2, \dots, x_{NV}] \quad (2.21)$$

โดยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$Fitness = f(Widow) = f(x_1, x_2, \dots, x_{NV}) \quad (2.22)$$

ทั้งนี้ จะทำการเริ่มต้นด้วยจำนวนประชากร NP ซึ่งทำให้มีจำนวนตัวแปรเริ่มต้นรวมเป็นเมตริกซ์ขนาด $NP \times NV$

การขยายพันธุ์ (Procreate)

ในการขยายพันธุ์ จะทำการสุ่มคู่ของพ่อและแม่ที่จะขยายพันธุ์เป็นลูกคู่ละ 2 ตัว (x_1, x_2) และทำการจับจนครบทุกคู่ของตัวแปร ($NV/2$ ครั้ง) โดยลูกที่ได้จากพ่อและแม่แมงมุม (y_1, y_2) จะหาจากตัวแปรสุ่ม α ดังสมการ

$$\begin{aligned} y_1 &= \alpha x_1 + (1 - \alpha)x_2 \\ y_2 &= \alpha x_2 + (1 - \alpha)x_1 \end{aligned} \quad (2.23)$$

เมื่อได้ลูกหลานของแมงมุมแล้วจะทำการเรียงลำดับตัวแม่และลูกตามค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเลือกตัวที่อยู่รอดตามค่าอัตราการกินกันเอง (cannibalism rate)

การกินกันเอง (Cannibalism)

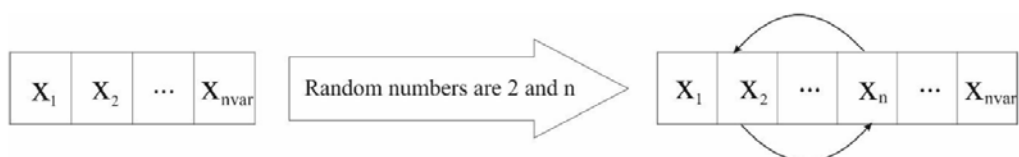
การกินกันเองของ BWOA จะมีอยู่ 3 แนวทางคือ

- 1) ตัวเมียกินตัวผู้ (ขณะผสมพันธุ์หรือหลังจากนั้น)
- 2) ตัวลูกกินกันเอง
- 3) ตัวลูกกินตัวแม่

โดยจะใช้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการกำหนดความแข็งแรงของตัวแมงมุม

การกลายพันธุ์ (Mutation)

นอกจากกระบวนการข้างต้นแล้วยังสามารถมีกระบวนการกลายพันธุ์ของแมงมุมตามค่าอัตราการกลายพันธุ์ (Mutation Rate) ได้ดังรูปที่ 2.9 ทั้งนี้กระบวนการคำนวณแบบ BWOA สามารถแสดงเป็น Pseudo Code ได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 กระบวนการกลายพันธุ์

<i>Pseudo Code of Black Widow Optimization algorithm</i>
Input: Maximum number of iteration, Rate of procreating, rate of cannibalism, rate of mutation
Output: near-optimal solution for the objective function
<pre> // initialization 1. The initial population of black widow spiders Each pop is a D-dimensional array of chromosomes for a D-dimensional problem // Loop until the terminal condition 1. Based on procreating rate , calculation the number of reproduction " nr" ; 2. Select the best nr solutions in pop and save them in pop1 ; // Procreating and cannibalism 3. For i=1 to nr do 4. Randomly select two solutions as parents from pop1 ; 5. Generate D children using equation1 ; 6. Destroy father ; 7. Based on the cannibalism rate, destroy some of the children (new achieved solutions) ; 8. Save the remain solutions into pop2 ; 9. End for // Mutation 10. Based on the mutation rate, calculate the number of mutation children "nm" ; 11. For i=1 to nm do 12. Select a solution from pop1 ; 13. Mutate randomly one chromosome of the solution and generate a new solution ; 14. Save the new one into pop3 ; 15. End for // Updating 16. Update pop = pop2+pop3 ; 17. Returning the best solution ; 18. Return the best solution from pop ; </pre>

รูปที่ 2.10 Pseudo Code ในกระบวนการคำนวณ BWOA

2.1.4 วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาโดยเลียนแบบวิวัฒนาการทางธรรมชาติโดยมีพื้นฐานแนวคิดมาจากทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติของ ชาร์ล ดาร์วิน (Charle Darwin) คือ ผู้ที่แข็งแกร่งกว่าย่อมมีโอกาสในการอยู่รอดมากกว่าและมีโอกาสในการถ่ายทอดลักษณะที่แข็งแกร่งนั้นไปยังรุ่นถัดไป ซึ่งแนวคิดดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้โดย Holland (1975) และถูกพัฒนาต่อโดย โกลด์เบิร์ก (Goldberg, 1989) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เป็นหนึ่งในวิชาปัญญาประดิษฐ์ที่จำลองกระบวนการทำงานทางชีววิทยาหรือวิวัฒนาการทางธรรมชาติในการกำเนิดประชากรรุ่นใหม่โดยอาศัยพื้นฐานการวิวัฒนาการทางพันธุกรรมในการถ่ายทอดลักษณะต่างๆ ไปยังรุ่นหลาน ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดจากสถานภาพที่กำหนดไว้ ทั้งนี้นิยามศัพท์ที่สำคัญในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีดังต่อไปนี้

- 1) ยีน หมายถึง สายรหัสหรือตัวอักษร
- 2) อัลลีล หมายถึง ค่าที่เป็นไปได้ในแต่ละตำแหน่งของสายรหัส
- 3) โครโมโซม หมายถึง สายรหัสหรือกลุ่มผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ของตัวแปรต่าง ๆ ใน

ระบบในรูปแบบโครโมโซม

- 4) โลคัส หมายถึง ตำแหน่งของรหัสบนสายรหัส
- 5) ฟีนไทป์ หมายถึง ตัวแปรของการตัดสินใจหลังการถอดรหัส
- 6) จีโนไทป์ หมายถึง ลักษณะเฉพาะบนสายรหัส

2.1.4.1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบง่าย (Simple Genetic Algorithm : SGA)

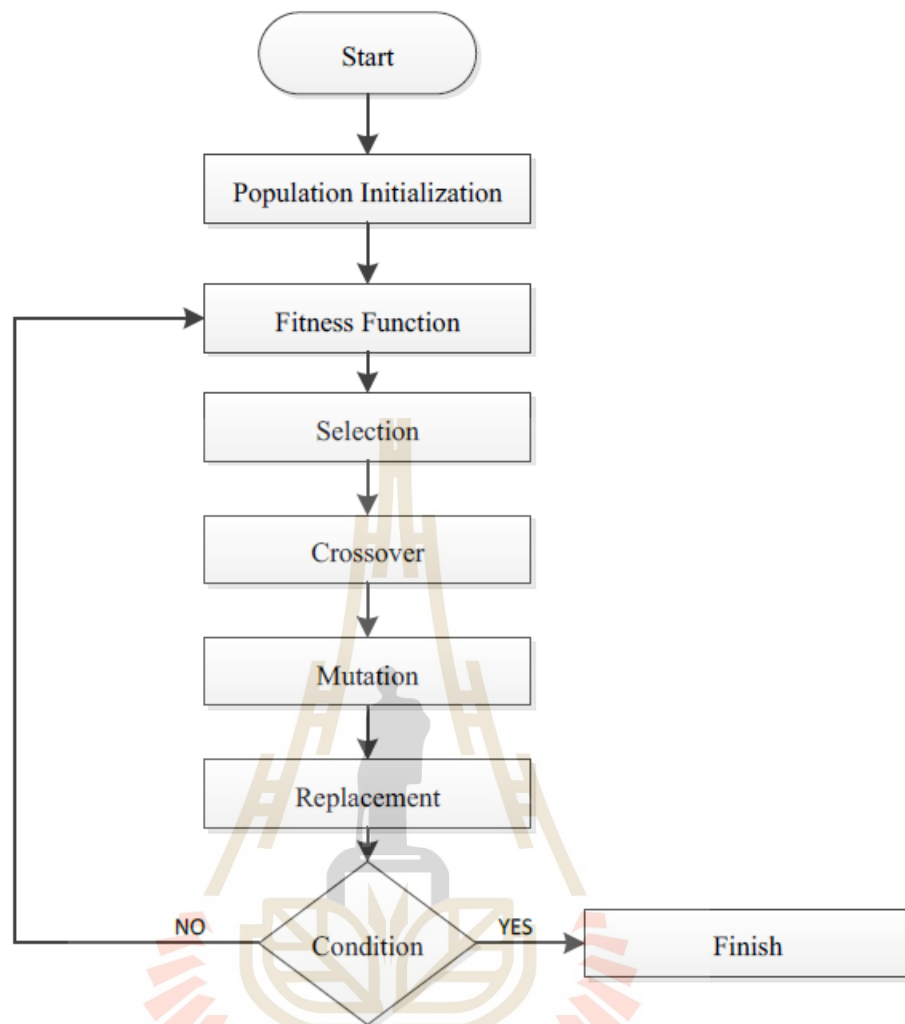
การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบง่ายแสดงดังรูปที่ 2.11 จะประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐานของระเบียบวิธีนี้ อธิบายเป็นขั้นตอนได้ว่า

- 1) การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome Encoding)
- 2) การสร้างประชากรเริ่มต้น (Population Initialization)
- 3) การประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness Function)
- 4) การดำเนินการทางขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Operations)

ประกอบไปด้วย การคัดเลือก (Selection) เพื่อเป็นประชากรในรุ่นต่อไป การสลับสายพันธุ (Crossover) การกลายพันธุ์ (Mutation)

- 5) การแทนที่ (Replacement)
- 6) การตรวจสอบเงื่อนไขสิ้นสุดการทำงาน (Termination Condition)

ทั้งนี้การวางลำดับขั้นตอนในการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอาจจะพบว่ามีแตกต่างกันไปตามการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาของผู้วิจัยแต่ละคน



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบง่าย

2.1.4.2 การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome Encoding)

การเข้ารหัสโครโมโซมเป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่สำคัญ เพราะก่อนเข้าสู่กระบวนการต่างๆ ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจำเป็นที่จะต้องผ่านการเข้ารหัสโครโมโซมก่อนจึงดำเนินกระบวนการอื่นๆ และเป็นขั้นตอนการออกแบบให้โครโมโซมเป็นตัวแทนของคำตอบของระบบโดยเลือกใช้วิธีเข้ารหัสแบบใดก็ได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการแก้ปัญหา ทำให้รูปแบบของการเข้ารหัสโครโมโซมนั้นมีความแตกต่างกันออกไปตามปัญหานั้นๆ ซึ่งมีการเข้ารหัสโครโมโซมหลายแบบ ดังต่อไปนี้

1) Binary Encoding เป็นรูปแบบโครโมโซมพื้นฐานที่นำมาใช้แก้ปัญหาของขั้นตอนวิธีเชิงทางพันธุกรรมซึ่งเป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดต่อการเข้ารหัสโครโมโซม วิธีเข้ารหัสนี้ให้แต่ละตำแหน่งของยีนใน โครโมโซมจะมีรูปแบบเป็น Bit String คือ 1 และ 0 เท่านั้น

2) Value Encoding แต่ละตำแหน่งของยีนในโครโมโซมจะแทนด้วยค่าต่างๆ ซึ่งเป็นตัวแทนของค่าที่สามารถเชื่อมโยงค่าที่ใช้ในการแก้ปัญหาได้ โดยมีรูปแบบต่างๆ เช่น ตัวอักษร จำนวนจริง และคำสั่งต่างๆ เป็นต้น ซึ่งรูปแบบของโครโมโซมนี้เหมาะสมกับปัญหาที่ค่อนข้างซับซ้อน

3) การเข้ารหัสแบบเพอมิวเตชัน (Permutation Encoding) รูปแบบโครโมโซมแบบนี้ทุกตำแหน่งของยีนในโครโมโซมจะเป็นค่าของจำนวนนับของตำแหน่งในแต่ละลำดับ ซึ่งเหมาะที่จะใช้ในการลำดับตำแหน่งของปัญหา เช่น ปัญหาของ Traveling Salesman Problem หรือ ปัญหาของ Scheduling Problem

4) การเข้ารหัสแบบทรี (Tree Encoding) เป็นรูปแบบโครโมโซมที่ทุกตำแหน่งของยีนจะเป็น node ของต้นไม้ เหมาะกับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโปรแกรม

2.1.4.3 การสร้างประชากรเริ่มต้น (Population Initialization)

การสร้างประชากรเริ่มต้นเป็นการกระทำ ขั้นถัดไปหลังจากเลือกรูปแบบการเข้ารหัสโครโมโซมได้แล้ว ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมโดยประชากรกลุ่มแรกจะเกิดจากการสุ่ม (Random) ค่าขึ้นมาจากกลุ่มข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อนำประชากรเข้าสู่กระบวนการ โดยในการสุ่มจะต้องสุ่มให้ได้จำนวนเท่ากับขนาดประชากร (Population Size) ที่ได้กำหนดไว้ โดยที่ยังไม่มีการสนใจค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม

2.1.4.4 ฟังก์ชันค่าความเหมาะสม (Fitness Function)

Fitness Function เป็นการกำหนดค่าความเหมาะสม เพื่อให้คะแนนสำหรับคำตอบต่างๆ ที่เป็นไปได้ของปัญหา โครโมโซมทุกตัวจะมีบ่งบอกถึงความเหมาะสมของตัวเอง เพื่อใช้สำหรับพิจารณาว่า โครโมโซมตัวนั้น เหมาะสมหรือไม่ ที่จะนำมาใช้ในการสืบทอดพันธุกรรม สำหรับสร้างโครโมโซมรุ่นใหม่ โดยวิธีการสำหรับคิดค่าความเหมาะสมนั้น จะใช้สมการที่สอดคล้องกับแต่ละปัญหาการกำหนดฟังก์ชันที่เกี่ยวกับเงื่อนไขต่างๆ ที่ต้องการขึ้นมาเพื่อใช้ในการหาค่าความเหมาะสม

1) ฟังก์ชันแบบจุดประสงค์เดียว (Single Objective Function) เป็นการกำหนดฟังก์ชันขึ้นมาหนึ่งฟังก์ชันที่ต้องการเพียงคำตอบเดียว ซึ่งเหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อย และไม่มีความขัดแย้งกัน

2) ฟังก์ชันแบบหลายจุดประสงค์ (Multi Objective Function) เป็นการกำหนดฟังก์ชันขึ้นมาหลายๆ ฟังก์ชันที่ต้องการเพียงคำตอบหลายๆ คำตอบ แต่ละคำตอบที่เป็นคู่แข่งกัน ซึ่งเหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก และมีความขัดแย้งกัน

2.1.4.5 ตัวดำเนินการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection)

ตัวดำเนินการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) เป็นการสนับสนุนให้สมาชิกที่มีความเหมาะสมในปัจจุบันถูกส่งต่อไปยังรุ่นถัดไปขั้นตอนในการคัดเลือกโครโมโซม ที่ดีที่สุดจากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด ซึ่งโครโมโซมที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ หรือ โครโมโซมพ่อแม่ ในการสืบสายพันธุ์เพื่อใช้ในการให้กำเนิดลูกหลายในรุ่นถัดไป โดยปกติแล้วเพื่อให้สายพันธุ์ที่ดี ต้นกำเนิดสายพันธุ์ต้องดีด้วย ซึ่งจะเป็นไปตามหลักการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมที่สุด โดยโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีย่อหมายถึงการเป็นโครโมโซมที่ดี และควรมีโอกาสที่จะให้ลูกหลานในจำนวนที่มากกว่าได้ ซึ่งย่อมเป็นการบ่งบอกว่าโอกาสในการอยู่รอดในรุ่นถัดไปก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยส่วนโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำกว่าจะมีโอกาสถูกเลือกน้อยกว่า หรือไม่ได้รับการคัดเลือกเลย ในกระบวนการคัดเลือกนี้จะมีเทคนิคในการคัดเลือกอยู่หลายเทคนิคที่จะนำมาช่วยกระบวนการคัดเลือกให้ดีขึ้น เช่น

1) การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette Wheel Selection) เป็นวิธีการคัดเลือกที่มีหลักการจากการเลียนแบบการเล่นรูเล็ต คือ โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่ามีโอกาสถูกเลือกมากกว่าโครโมโซมที่ด้อยกว่าซึ่งขนาดพื้นที่ของวงล้อเสี่ยงโชคหรือความกว้างของช่องแต่ละช่องของวงล้อรูเล็ตได้จากค่าความเหมาะสมของสมาชิกแต่ละตัว จากนั้นกำหนดตัวชี้ตำแหน่งตายตัว (Fixed Point) และทำการหมุนวงล้อรูเล็ต เมื่อวงล้อหยุดหมุนจะเลือกสมาชิกของกลุ่มประชากรที่มีตัวชี้ตำแหน่งขี้อยู่ ทำเช่นนี้ซ้ำจนได้สมาชิกของกลุ่มประชากรครบตามจำนวนในหนึ่งรุ่น ซึ่งวิธีนี้จะมีความลำเอียง (Bias Roulette Wheel) ในการเลือกค่อนข้างมากเนื่องจากถ้าโครโมโซม (สมาชิกของกลุ่มประชากรตัวใด) ที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่าจะมีโอกาสถูกเลือกซ้ำหลายครั้งทำให้สมาชิกของกลุ่มประชากรภายในรุ่นถัดไปของการทำงานมีลักษณะของสมาชิกของกลุ่มประชากรตัวนั้นๆ หลายตัว เมื่อมีการหมุนวงล้อรูเล็ตโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากจะถูกเลือกได้บ่อยกว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อย

2) การคัดเลือกแบบจัดอันดับ (Ranking Selection) เป็นวิธีการคัดเลือกแบบจัดอันดับจะให้ค่าของโอกาสในการถูกคัดเลือกที่ไม่แปรผันไปตามขนาดของค่าความเหมาะสมซึ่งจะทำให้โครโมโซมทุกตัวมีโอกาสที่จะได้รับการคัดเลือกเป็นประชากรในรุ่นต่อไปมากขึ้น เพื่อที่ใช้ในกรณีที่โครโมโซมบางโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดเด่นกว่าโครโมโซมอื่น

3) การคัดเลือกแบบการแข่งขัน (Tournament Selection) การคัดเลือกแบบการแข่งขันซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการคัดเลือกโครโมโซมพ่อแม่พันธุ์ที่ดี เป็นวิธีการที่เหมือนกับการแข่งขันกีฬาโดยจะทำได้โดยการสุ่มแบ่งกลุ่มคัดเลือกโครโมโซม แล้วเลือกเอาโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มนั้นเพื่อหาโครโมโซมผู้ชนะเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ต่อไป หลักการจัดการแข่งขันมีดังต่อไปนี้ ทำการสุ่มเลือกโครโมโซม สำหรับจัดการแข่งขันขนาด K (Tournament Size) โครโมโซมที่ชนะการแข่งขันและถูกคัดเลือกแล้ว สามารถออกจากการแข่งขันหรืออยู่ต่อ(เพื่อสามารถถูกเลือกได้อีก)ก็ได้ เราสามารถปรับขนาดของการแข่งขัน K เพื่อให้ได้ความเข้มข้นในการแข่งขันที่เหมาะสม กล่าวคือถ้า K มีขนาดใหญ่หรือการแข่งขันขนาดใหญ่ โครโมโซมที่ไม่ดีมาก (ค่าการประเมินน้อย) ก็จะมีโอกาสชนะน้อยวิธีจัดการแข่งขันมีความเหมาะสมในการทำปัญหาความเหลื่อมล้ำของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมหมดไป นอกไปจากนั้นแล้ว วิธีจัดการแข่งขันยังเขียนโปรแกรมได้ง่ายและทำงานเป็นแบบขนานได้ด้วยวิธีนี้ทำให้ช่วยลดปัญหาเรื่องความลำเอียง (Bias) ออกไป

2.1.4.6 การดำเนินการสลับสายพันธุ์ (Crossover)

การสลับสายพันธุ์ (Crossover) เป็นกระบวนการที่สำคัญของ ขั้นตอนวิธีเชิงทางพันธุกรรมเมื่อเกิดการสลับสายพันธุ์ ขึ้นในทางพันธุศาสตร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตที่หลากหลาย ซึ่งอัลกอริทึมพยายามสร้างทางเลือกที่ดีขึ้นโดยการรวมลักษณะที่ดีของแต่ละโครโมโซมเข้าด้วยกัน ขั้นตอนในการการสลับสายพันธุ์ คือจะนำสมาชิกของประชากรที่ผ่านการคัดเลือกมาเป็นคู่ ๆ กำหนดให้เป็นสมาชิกรุ่นพ่อกับสมาชิกรุ่นแม่ (Parent Individual) มาผสมกันเพื่อให้ได้โครโมโซมใหม่ขึ้นมาจากนั้นทำการแลกเปลี่ยนยีนระหว่างสมาชิกรุ่นพ่อกับสมาชิกรุ่นแม่ จากนั้นคัดลอกโครโมโซมที่อยู่หน้าตำแหน่งที่สุ่มได้จากโครโมโซมพ่อ และคัดลอกโครโมโซมที่อยู่หลังตำแหน่งที่สุ่มได้จากโครโมโซมแม่แล้วนำโครโมโซมที่ได้ทั้งสองมารวมกันเป็นโครโมโซมลูกตัวที่ 1 ส่วนลูกตัวที่สองทำในลักษณะเดียวกันแต่สลับตำแหน่งระหว่างพ่อและแม่ การสุ่มเลือกสมาชิกรุ่นพ่อกับสมาชิกรุ่นแม่มาทำการสลับสายพันธุ์จะถูกกำหนดโดยความน่าจะเป็นในการสลับสายพันธุ์ (Crossover Probability) วิธีการสลับสายพันธุ์มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น แบบ One Point, Two Point เป็นต้น การใช้งาน Cross Method นั้นจะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้รูปแบบ Encoding ของโครโมโซมด้วย

2.1.4.7 การดำเนินการกลายพันธุ์ (Mutation)

การกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการสลับสายพันธุ์วัตถุประสงค์เพื่อทำให้ค่าของโครโมโซมที่มีอยู่เดิมเกิดการเปลี่ยนแปลง และช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาการเวียนซ้ำอยู่กับค่าใดค่าหนึ่ง (Iteration Search) ขั้นตอนในการกลายพันธุ์

โดยทั่วไปคือทำการสุ่มตำแหน่งที่ต้องการการกลายพันธุ์ขึ้นมาภายใต้ความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Probability of Mutation) ซึ่งได้ทำการกำหนดไว้ในช่วงของการเริ่มกระบวนการ โดยจะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงค่าบางส่วนของสมาชิกของกลุ่มประชากร เพื่อให้สมาชิกของกลุ่มประชากรมีความหลากหลายมากขึ้น และเทคนิคในการกลายพันธุ์ส่วนมากจะขึ้นกับการเข้ารหัสโครโมโซม ความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.1 เทคนิคการกลายพันธุ์ (Mutation) มีอยู่หลายวิธีเช่น

1) การกลายพันธุ์แบบกลับบิต (Bit-Flipped Mutation) เป็นเทคนิคการกลายพันธุ์ในกรณีที่เข้ารหัสโครโมโซมเป็นเลขฐานสองสามารถทำได้โดยการกลับค่าบิตเป็นค่าตรงกันข้ามจากค่าเดิม (Complement) คือ จาก 0 เป็น 1 หรือ 1 เป็น 0 จากตำแหน่งที่สุ่มได้ตามค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์

2) การกลายพันธุ์แบบผกผัน (Inversion Mutation) เป็นการสลับตำแหน่งแบบหลังไปหน้า โดยสุ่มเลือกสมาชิกมาหนึ่งตัว ทำการสุ่มเลือกช่วงที่จะทำการกลายพันธุ์ และทำการสลับตำแหน่งภายในช่วงการตัด

3) การกลายพันธุ์แบบแทรก (Insertion Mutation) เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งโดยการแทรกตำแหน่ง โดยสุ่มเลือกสมาชิกมาหนึ่งตัว ทำการสุ่มเลือกตำแหน่งที่จะแทรก และทำการสุ่มเลือกยีนที่จะมาแทรกนำค่ายีนที่สุ่มได้เข้ามาทำการแทรกในตำแหน่งที่ถูกสุ่ม

ในปัจจุบันยีนอาจเป็นค่าจำนวนจริง (Real Value Coding) ทำให้มีรูปแบบการกลายพันธุ์อื่นเกิดขึ้นอีกมากมาย อาทิเช่น Uniform Mutation ค่าของยีนจะถูกดัดแปลงภายในค่าพิสัย (Range) ที่กำหนด, Modified Uniform Mutation ยีนจะถูกดัดแปลงโดยค่าคงที่เพียงค่าเดียว และ Non-uniform Mutation การดัดแปลงยีนโดยค่าที่ค่อยๆ ลดลงเมื่อ Generation ค่อยๆ เพิ่มขึ้น เป็นต้น

2.1.4.8 การแทนที่ (Replacement)

การแทนที่เป็นขั้นตอนที่เมื่อผ่านขั้นตอนของการสลับสายพันธุ์และกลายพันธุ์จะทำให้เกิดโครโมโซมลูกหลานเรียบร้อยแล้ว และนำโครโมโซมลูกหลานใหม่นี้ ไปแทนที่ประชากรรุ่นเก่า จุดประสงค์ในการแทนที่นั้นค่อนข้างชัดเจน คือการนำโครโมโซมลูกหลานมาแทนที่ประชากรรุ่นก่อนทำให้ประชากรรุ่นใหม่ เป็นโครโมโซมที่ดีกว่าเพราะได้สายพันธุ์ที่ดีจากต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกแล้ววิธีในการคัดเลือกกว่าโครโมโซมไหนจะถูกแทนที่มีด้วยกัน 2 วิธีคือ

1) การแทนที่ประชากรทั้งรุ่น (Generational Genetic Algorithm) ลูกหลานไปแทนที่ประชากรรุ่นเก่าทั้งหมด ดังนั้นถ้าในระบบหนึ่งมีจำนวนประชากรเท่ากับ N จำนวนของโครโมโซมลูกหลานที่จะมาแทนที่จะต้องมีขนาด N เช่นกัน วิธีนี้ เป็นวิธีที่ง่าย เนื่องมาจากไม่

จำเป็นจะต้องมีขั้นตอนของการคัดเลือกกว่าประชากรส่วนไหนจะถูกแทนที่ แต่มีข้อเสียคือโครโมโซมที่ดีในรุ่นก่อนจะถูกแทนที่ไปด้วย ซึ่งวิธีแก้ที่ง่ายคือ ก่อนที่จะทำการแทนที่ให้คัดเลือกเก็บโครโมโซมที่ดีที่สุด 2-3 ตัวแรกเอาไว้โดยอาจจะใช้วิธีการคัดเลือกหวักะทิ (Elitist Strategy) กล่าวคือถ้าไม่มีโครโมโซมใหม่ที่ดีกว่าเกิดขึ้น โครโมโซมที่ดีที่สุดจากรุ่นก่อนก็จะถูกเก็บไว้อยู่ตลอดไป และไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ขึ้นทำให้ Genetic Algorithm ไม่สามารถวิวัฒนาการโครโมโซมใหม่ขึ้นมาได้ ถึงแม้ว่าผลของโครโมโซมหวักะทิจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้แต่วิธีนี้ก็ทำให้ระบบโดยรวมดีขึ้น

2) การแทนที่ประชากรแบบบางส่วน (Partial Genetic Algorithm) เป็นการนำเอาประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเดิมเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยมีการคัดเลือกประชากรที่จะถูกแทนที่ซึ่งจะพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซม โครโมโซมเก่าจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมใหม่เพียง 1 หรือ 2 ตัวเท่านั้นวิธีในการแทนที่มีอยู่หลายวิธี เช่นการแทนที่ประชากรที่ด้อยที่สุด หรือการแทนที่ประชากรโดยการสุ่มเลือกเป็นต้น

2.1.4.9 การกำหนดการสิ้นสุดของการทำงาน (Termination Condition)

เมื่อถึงขั้นตอนการแทนที่ประชากร (Population Replacement) จากนั้นเป็นขั้นตอนการตรวจสอบว่าจบกระบวนการแล้วหรือยัง การทำงานของ Genetic Algorithm เป็นวัฏจักรหมุนเวียนอยู่เช่นนี้จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งตามเงื่อนไขโดยอาจสิ้นสุดเมื่อถึงรุ่นตามที่กำหนด หรือพบคำตอบที่ดีที่สุดตามที่กำหนดไว้หากไม่เข้าเงื่อนไขดังกล่าวมาแล้ว ก็ให้กลับไปขั้นตอนการสร้างต้นแบบ แล้วทำงานซ้ำ กระบวนการจนกว่าจะพบเงื่อนไขจบการทำงาน

2.2 งานวิจัยที่มีผู้ศึกษาไว้

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมางานวิจัยหลายชิ้นได้เสนอวิธีการหา ECP ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้เทคนิคต่างๆ ตัวอย่างเช่นใน (Wengerkiewicz, C. A. C., et.al., 2017) ECP ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถหาได้จากข้อมูลของผู้ผลิต อย่างไรก็ตาม ECP ของมอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานยาวนาน หรือมอเตอร์ที่ผ่านการพันขดลวดมาใหม่ อาจแตกต่างจากแคตตาล็อกของผู้ผลิตมาก ดังนั้นนักวิจัยหลายคนจึงมุ่งเป้าไปที่การประมาณค่า ECP โดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (AI) โดยการไปวัดข้อมูล ณ สถานที่นั้น (Alonge F., et.al., 1998) (Jangjit, S., et.al., 2009) (Kostov, I., et.al., 2009) (Hassan M., et.al., 2008) (Rashag, H. F., et.al., 2011) (Sakthivel, V. P., et.al., 2010) (Picardi, C., et.al., 2006) (Reza Mohammadi, H. and Akhavan, A., 2014) (Canakoglu, A. I., et. al., 2014) (Avalos O., et. al., 2016) ตัวอย่างเช่นการประมาณค่า ECP ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงพันธุกรรม (GA) ถูกเสนอใน (Alonge F., et.al., 1998)

(Jangjit, S., et.al., 2009) (Kostov, I., et.al., 2009) ในขณะเดียวกันใน (Hassan M., et.al., 2008) (Rashag, H. F., et.al., 2011) (Sakthivel, V. P., et.al., 2010) (Picardi, C., et.al., 2006) ได้มีการนำเสนอการระบุ ECP ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดย การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และการปรับปรุง ดังนั้นเทคนิคก่อนหน้าสำหรับการประมาณค่า ECP ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงมุ่งเน้นไปที่การใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ AI , การใช้ GA กับ PSO ผสมผสาน (Reza Mohammadi, H. and Akhavan, A., 2014) วิธีเมตาฮีวิริสติก (Canakoglu, A. I., et. al., 2014) อัลกอริทึมการค้นหาความโน้มถ่วง (Avalos O., et. al., 2016) ดังนั้นเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพอัจฉริยะจึงได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีการที่น่าสนใจสะดวกและมีประสิทธิภาพดี สำหรับการกำหนด ECP ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและยังคงต้องการการปรับปรุงความถูกต้องแม่นยำและการนำไปใช้งาน

สำหรับการกำหนดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ วิธีที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดคือการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาตรฐาน IEEE-112 (IEEE Standard 112-2004) และ IEC60034 (IEC60034-1999) อย่างไรก็ตาม ภายใต้การทำงานของมอเตอร์ การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะไม่สามารถใช้ขั้นตอนได้ ดังนั้น การทดสอบประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่ มักจะถูกประเมินที่หน้างาน ดังนั้น เพื่อให้ได้ค่าประมาณประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ยอมรับได้ (IMEE) ระหว่างสภาวะการทำงานจึงเป็นเครื่องมือข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับโปรแกรมการอนุรักษ์พลังงานและการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์

วิธีการประมาณประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ให้บริการโดยทั่วไป ได้แก่ วิธีอ่านจากป้ายชื่อ (NM) วิธีโกล (SM) และวิธีกระแส (CM) (U.S. Department of Energy, DOE/GO-10097-517) เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกที่สุด อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านั้นมีข้อผิดพลาดสูงในการประมาณประสิทธิภาพของมอเตอร์ ดังนั้นจึงมีการเสนอวิธีการหลายวิธี (J. S. Hsu, et.al., 1998) (Bin Lu, et.al., 2006) ในขณะเดียวกัน สามารถใช้ตัวแปรวงจรสมมูลของมอเตอร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้ ดังนั้นจึงใช้เทคนิคอัจฉริยะประดิษฐ์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ในสถานที่ เช่น การระบุตัวแปรมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (genetic algorithm) (M. S. Aspalli, et.al., 2008) (S. Jangjit and P. Laohachai, 2009) (I. Kostov, et.al., 2009) การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) (H. F. Rashag, et.al., 2011) (K. Chayakulkheeree, et.al., 2017) อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของวิธีการเหล่านั้นยังอยู่ระหว่างการปรับปรุงโดยนักวิจัยจำนวนมาก

ทั้งนี้งานวิจัยในการการใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการประมาณค่าตัวแปรในวงจรสมมูลของมอเตอร์สามารถแสดงตัวอย่างสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปตัวอย่างของงานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการประมาณค่าตัวแปรในวงจรสมมูลของมอเตอร์

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้ทำวิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	optimization	หมายเหตุ
2008	M. S. Aspalli, S. B. Shetagar, and S. F. Kodad	Estimation of Induction Motor Field Efficiency for Energy Audit and Management Using Genetic Algorithm	Genetic Algorithm	$F_{objective} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{P_{in,cal}}{P_{in,data}} - 1 \right]^2 + \sum_{i=1}^n \left[\frac{I_{li,cal}}{I_{li,data}} - 1 \right]^2$ $Fitness = \frac{1}{1 + F_{objective}}$
2008	Hamid Reza Mohammadi and Ali Akhavan	Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor Using Hybrid of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization	Hybrid of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization	$F = f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + f_4^2$ $f_1 = \frac{K_t R'_r / s \left[(R_{th} + R'_r / s)^2 + (X_{th} + X'_r)^2 \right] - T_{fl}(mf)}{T_{fl}(mf)}$ $f_2 = \frac{K_t R'_r / s \left[(R_{th} + R'_r / s)^2 + (X_{th} + X'_r)^2 \right] - T_{st}(mf)}{T_{st}(mf)}$ $f_3 = \frac{K_t / s \left[R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_r)^2} \right] - T_{max}(mf)}{T_{max}(mf)}$ $f_4 = \frac{\cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{X_{th} + X'_r}{R_{th} + R'_r / s}\right)\right) - pf_{fl}(mf)}{pf_{fl}(mf)}$ $V_{th} = \frac{V_{ph} X_m}{X_s + X_m} ; R_{th} = \frac{R_s X_m}{X_s + X_m} ; X_{th} = \frac{X_s X_m}{X_s + X_m}$ $K_t = \frac{3V_{th}^2}{\omega_s}$

ตารางที่ 2.2 สรุปตัวอย่างของงานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการประมาณค่าตัวแปรในวงจรสมมูลของมอเตอร์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้ทำวิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	optimization	หมายเหตุ
2009	Ivan Kostov, Vasil Spasov, Vania Rangelova	APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF INDUCTION MOTORS	GENETIC ALGORITHMS	$F_{obj} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\cos \varphi_{c,i}}{\cos \varphi_{m,i}} - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_{lc,i}}{I_{lm,i}} - 1 \right)^2$
2021	M. Aminu , M. Abana , S. W. Pallam , P. K. Ainah	Nonintrusive Method for Induction Motor Equivalent Circuit Parameter Estimation using Chicken Swarm Optimization (CSO) Algorithm	Chicken Swarm Optimization (CSO)	$f_{obj} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n f_j^2 \right)_i$ $f_1 = \left(\frac{I_{s-est} - I_s}{I_s} \right) \times 100$ $f_2 = \left(\frac{P_{input-est} - P_{input}}{P_{input}} \right) \times 100$ $f_3 = \left(\frac{pf_{est} - pf}{pf} \right) \times 100$ $f_4 = \left(\frac{P_{output-est} - P_{output}}{P_{output}} \right) \times 100$

ตารางที่ 2.2 สรุปตัวอย่างของงานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการประมาณค่าตัวแปรในวงจรสมมูลของมอเตอร์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้ทำวิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	optimization	หมายเหตุ
2021	Mohamed I. Abdelwanis , Ragab A. Sehiemya , Mohmed A. Hamida	Hybrid optimization algorithm for parameter estimation of poly-phase induction motors with experimental verification	The Hybrid PSO-Jaya optimization algorithm	$\Delta F = \Delta T_d^2 - \Delta T_{\max}^2 + \Delta T_{st}^2 + \Delta pf^2$ $\Delta pf = \frac{epf - mpf}{mpf} ; \Delta T_d = \frac{eT_d - mT_d}{mT_d}$ $\Delta T_{\max} = \frac{eT_{\max} - mT_{\max}}{mT_{\max}} ; \Delta T_{st} = \frac{eT_{st} - mT_{st}}{mT_{st}}$
2021	Moshe Averbukh and Efim Lockshin	Estimation of the Equivalent Circuit Parameters of Induction Motors by Laboratory Test		$Z = \sum_{i=1}^N \left(\tau_i - \frac{2\tau_{\max}}{\frac{s_i + s_K}{s_K} + \frac{s_i}{s_i}} \right)^2 \Rightarrow MIN$ $\frac{dZ}{d\tau_{\max}} = - \sum_{i=1}^N \left(\tau_i - \frac{2\tau_{\max}}{\frac{s_i + s_K}{s_K} + \frac{s_i}{s_i}} \right) \left(\frac{1}{\frac{s_i + s_K}{s_K} + \frac{s_i}{s_i}} \right) = 0$ $\frac{dZ}{ds_K} = - \sum_{i=1}^N \left(\tau_i - \frac{2\tau_{\max}}{\frac{s_i + s_K}{s_K} + \frac{s_i}{s_i}} \right) \left(\frac{2\tau_{\max} \left(\frac{1}{s_i} + \frac{s_i}{s_K^2} \right)}{\left(\frac{s_i + s_K}{s_K} + \frac{s_i}{s_i} \right)^2} \right) = 0$

บทที่ 3

การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไข การทำงานด้วยปัญญาประดิษฐ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษากระบวนการประมาณค่าตัวแปรวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงานโดยได้ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ประกอบด้วย

- 1) กระบวนการคัดสรรทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA)
- 2) การหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO)
- 3) กระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีแมงมุมแม่ม่ายดำ (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA)

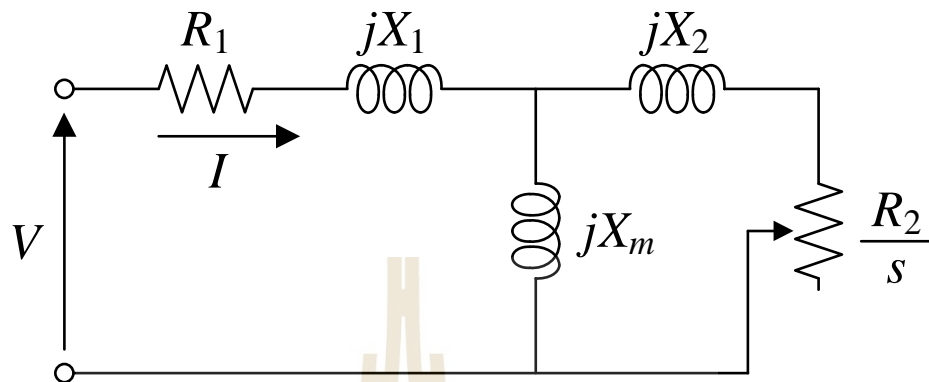
โดยมีการสร้างแบบจำลองของปัญหาจากวงจรสมมูลและได้ทดสอบแต่ละวิธีที่ค่าจำนวนประชากรและจำนวนรอบการคำนวณที่แตกต่างกัน

3.1 การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงาน

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Equivalent Circuit Parameters, ECPs) โดยใช้เงื่อนไขการทำงานที่หลากหลาย ทั้งนี้ ECP ของมอเตอร์เหนี่ยวนำถูกประมาณโดย PSO โดยใช้ข้อมูลการวัดของแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, กำลังงานจริง และตัวประกอบกำลัง ที่จุดการทำงานหลายจุด วิธีนี้ได้รับการตรวจสอบด้วยข้อมูลการวัดจำนวนที่แตกต่างกันและเปรียบเทียบกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีอื่น ๆ วิธีที่เสนอนี้พบว่าใช้ได้กับการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้ข้อมูลการวัดสำหรับจุดการทำงานหลาย ๆ จุด

พารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ (ECPs) เป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและคุณลักษณะของเครื่อง ทั้งในสถานะคงที่ และแบบไดนามิก ข้อมูล ECP ของมอเตอร์เหนี่ยวนำของเครื่องจักรขนาดใหญ่มักได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเหล่านี้พบได้ยากสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกลางและขนาดเล็กและสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีอายุการใช้งานยาวนาน ดังนั้นวิธีการที่สะดวกในการกำหนด ECP ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างการทำงานในสถานที่เป็นการศึกษาและพัฒนาที่น่าสนใจ

ในการคำนวณค่าของมอเตอร์ ใช้ 5 พารามิเตอร์ คือ R_1, X_1, X_m, R_2, X_2 ในโมเดลที่ใช้จะไม่คิด ความต้านทานของแกนแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โดยสามารถคำนวณค่ากระแสของมอเตอร์ (I^{cal}) กำลังไฟฟ้าปรากฏของมอเตอร์ (S^{cal}) กำลังไฟฟ้าจริงของมอเตอร์ (P^{cal}) และตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ (PF^{cal}) ดังต่อไปนี้

$$I^{cal} = \frac{V}{(R_1 + jX_1) + (jX_m // (jX_2 + \frac{R_2}{s}))} \quad (3.1)$$

$$S^{cal} = Vg(I^{cal})^* \quad (3.2)$$

$$P^{cal} = \text{Re}(S^{cal}) \quad (3.3)$$

$$PF^{cal} = \frac{P^{cal}}{|S^{cal}|} \quad (3.4)$$

ฟังก์ชันการประเมิน (EV) ในการประมาณค่าตัวแปรในวงจรสมมูลสามารถคำนวณได้จาก

$$EV = \sum_{k=1}^{NC} \left(\left(\frac{I_k^{cal}}{I_k^{meas}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{P_k^{cal}}{P_k^{meas}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{PF_k^{cal}}{PF_k^{meas}} - 1 \right)^2 \right) \quad (3.5)$$

3.2 การกำหนดปัญหาการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงานโดยใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO)

ในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เสนอการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ พารามิเตอร์ทั้งห้าจะถูกประเมินโดยใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Kennedy, J. and Eberhart, R., 2016) ECP ของมอเตอร์จะถูกค้นหาจากค่าที่สอดคล้องกับตัวแปรที่วัดได้มีดังนี้ กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง ตัวประกอบกำลัง แรงดันไฟฟ้า และ ค่าไถล

ดังนั้นอินพุตของการหาตัวแปรวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ คือ กระแส กำลังไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง แรงดันไฟฟ้า และค่าไถล ในการกำหนดค่าเริ่มต้นของอนุภาคจะได้เป็น (Canakoglu, A. I., et. al., 2014)

$$\mathbf{P}^{i(m)} = [p_1^{i(m)} \ p_2^{i(m)} \ p_3^{i(m)} \ p_4^{i(m)} \ p_5^{i(m)}] \quad (3.6)$$

เมื่อ $p_1^{i(m)}$ $p_2^{i(m)}$ $p_3^{i(m)}$ $p_4^{i(m)}$ $p_5^{i(m)}$ คือค่าของของ R_1, X_1, X_m, R_2, X_2 ตามลำดับ ของกลุ่มอนุภาค i ของการทำซ้ำ m ครั้ง

ทั้งนี้ I_k^{cal} , P_k^{cal} , และ PF_k^{cal} สามารถคำนวณได้จากแต่ละอนุภาค k ของ PSO โดยใช้ค่าที่ได้จากการตรวจวัด จากนั้นทำการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (EV) ที่ดีที่สุด ซึ่งจะเป็นค่าที่สอดคล้องกับ EPCs ของมอเตอร์มากที่สุด และทำการปรับปรุงค่าตามสมการ

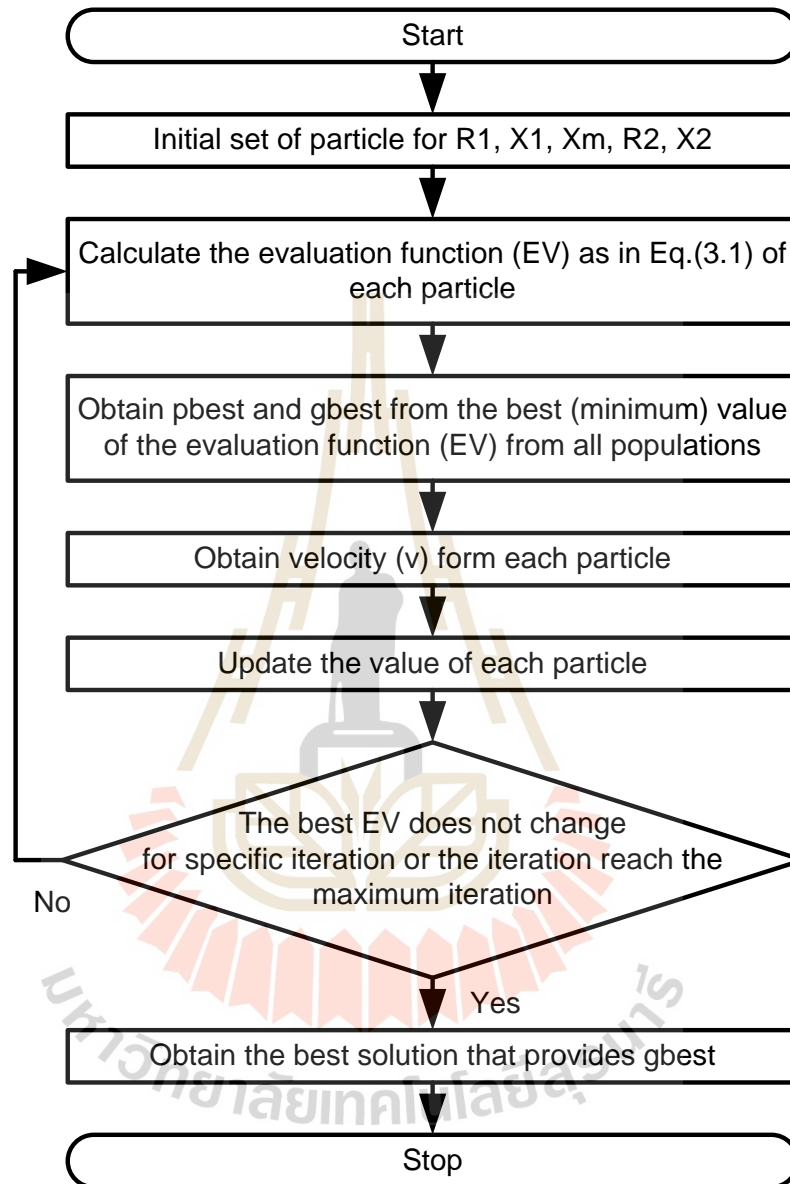
$$\mathbf{v}^{i(m)} = [v_1^{i(m)} \ v_2^{i(m)} \ v_3^{i(m)} \ v_4^{i(m)} \ v_5^{i(m)}] \quad (3.7)$$

$$v_j^{i(m)} = wv_j^{i(m-1)} + c_1rand() \cdot (pbest_j^{i(m)} - p_j^{i(m)}) + c_2rand() \cdot (gbest_j^{i(m)} - p_{id}^t) \quad (3.8)$$

$$w = w_{max} - \frac{w_{max}-w_{min}}{iter_{max}} iter \quad (3.9)$$

$$\mathbf{P}^{i(m+1)} = \mathbf{P}^{i(m)} + \mathbf{v}^{i(m)} \quad (3.10)$$

ทั้งนี้กระบวนการคำนวณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กระบวนการประมาณค่าในวงจรสมมูลของมอเตอร์ด้วยวิธี PSO

3.3 การกำหนดปัญหาการหาพารามิเตอร์วงจรมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงานด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกระบวนการแมงมุมแม่ม่ายดำ (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA)

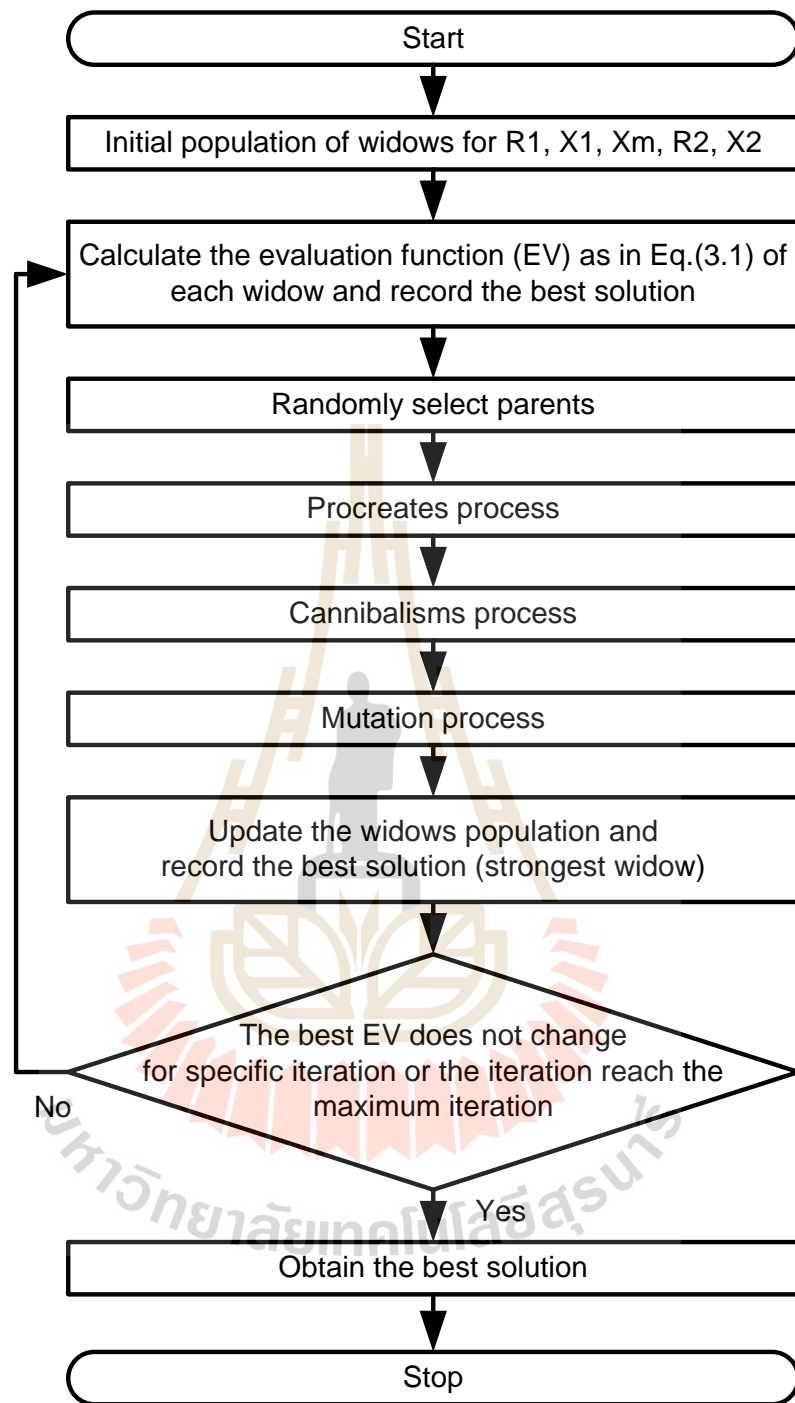
ในการประเมินค่าพารามิเตอร์ในวงจรมูลมอของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธี BWOA จะทำการกำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้นของแมงมุม (Widow) โดยประกอบด้วยพารามิเตอร์ในวงจรมูลมอของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังสมการ

$$Widow = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5] = [R_1, X_1, X_m, R_2, X_2] \quad (3.11)$$

และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$Fitness = f(Widow) = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \quad (3.12)$$

โดยเป็นการคำนวณตามสมการที่ (3.11) ด้วยค่าตัวแปรในแต่ละ Widow จากนั้นจะทำการคำนวณกระบวนการขยายพันธุ์ (Procreate) การกินกันเอง (Cannibalism) และการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อคัดเลือก Widow ที่แข็งแรงที่สุดคือมีค่า Fitness ที่ดีที่สุด ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.3 กระบวนการประมาณค่าในวงจรสมมูลของมอเตอร์ด้วยวิธี BWOA

บทที่ 4

ผลลัพธ์การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยปัญญาประดิษฐ์

ในบทนี้จะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อศึกษาความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละวิธี รวมทั้งการทดสอบกระบวนการคำนวณกับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลลัพธ์แนวทางในการประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไม่ปลดโหลด

4.1 ผลการทดลองด้วยวิธี PSO

ในการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ PSO ที่มีเงื่อนไขการทำงานหลายแบบ วิธีที่นำเสนอได้รับการทดสอบกับมอเตอร์ ขนาด 0.75 กิโลวัตต์ ที่สถานะการทำงานหลายจุดข้อผิดพลาดใน ECPD โดยวิธีการที่เสนอจะแสดงให้เห็นว่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับวิธีการที่มีอยู่ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบในการกรณีที่คำนวณจากเงื่อนไขการทำงานที่ 1 2 และ 3 จุดการทำงาน

ในการทดลองนี้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 2 ขั้ว, แรงดัน 380 V, ความถี่ 50 Hz, ขนาด 0.75 kW ที่ได้จากการที่ได้จากการทดสอบ (Kostov, I., 2009) ค่าพารามิเตอร์จากห้องปฏิบัติการตามตารางที่ 4.1 และมีข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าเพื่อที่จะนำมาหาพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์ตามตารางที่ 4.2 โดยค่าตัวแปรที่ใช้ใน PSO มีดังนี้

$$c_1 = 2.0$$

$$c_2 = 2.0$$

$$w_{max} = 0.9$$

$$w_{min} = 0.4$$

$$\text{รอบการทำซ้ำสูงสุด} = 100$$

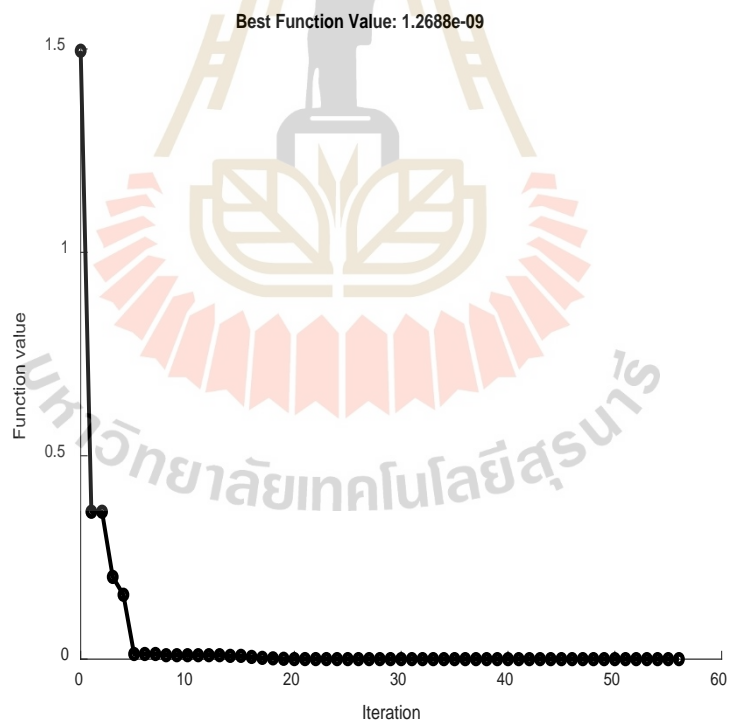
$$\text{จำนวนประชากร (Number of Population)} = 1000$$

ตารางที่ 4.1 ECPs ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 0.75 kW ที่ใช้ทดสอบ (Kostov, I., 2009)

R_1	X_1	X_m	R_2	X_2
10.2	8.17	143.57	10.52	19.16

ตารางที่ 4.2 สภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 0.75 kW ที่ใช้ทดสอบ

Condition	V (V)	s (%)	I (A)	P (W)	PF
1	380	0.06	1.8500	753.767	0.6188
2	380	0.10	2.3780	1152.700	0.7365
3	380	0.15	3.0482	1567.700	0.7814



รูปที่ 4.1 การลู่เข้าของกระบวนการคำนวณ PSO

จากรูปที่ 4.1 แสดงกราฟผลลัพธ์การลู่เข้าคำตอบของ PSO ซึ่งให้คำตอบค่าที่ดีที่สุดได้ในจำนวนรอบไม่เกิน 20 รอบการคำนวณ ตารางที่ 4.3 – 4.5 แสดงผลลัพธ์การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากผลลัพธ์ในตารางที่ 4.3 พบว่าการวิเคราะห์ที่จุดทำงานเดียวโดยใช้ PSO ส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดสูงของ ECP คล้ายกับ GA (Kostov, I., 2009) แต่การวิเคราะห์ด้วย PSO ยังมีความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่า GA และเมื่อวิเคราะห์ด้วยจุดทำงานพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนน้อย จากตารางที่ 4.4 กรณีที่ใช้ 2 จุดการทำงาน ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ทั้งวิธีที่ใช้ GA และวิธี PSO แต่วิธี PSO จะมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error) เท่ากับ 0.46% ซึ่งต่ำกว่าวิธี GA ในตารางที่ 4.5 กรณีที่ใช้ 3 จุดการทำงานจะมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด ทั้งนี้โดยภาพรวมพบว่าวิธีการ PSO สามารถให้ผลลัพธ์การประเมินค่า ECPs ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไม่ผิดพลาดได้แม่นยำ

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่า ECPs โดยใช้เงื่อนไขการทำงานเดียว

Actual Values (Ohm)		Single Condition			
		GA (Kostov, I., 2009)		Proposed ECPD	
		Ohm	%Error	Ohm	%Error
R_1	10.20	62.56	-513.33	63.9088	-526.56
X_1	8.17	43.49	-432.31	7.2860	10.82
X_m	143.57	58.77	59.07	155.4168	-8.25
R_2	10.52	11.02	-4.75	10.9593	-4.18
X_2	19.16	101.98	-432.25	20.5440	-7.22
Root Mean Square Error			357.98		235.59

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่า ECPs โดยใช้ 2 เงื่อนไขการทำงาน

Actual Values (Ohm)		Two Conditions			
		GA (Kostov, I., 2009)		Proposed ECPD	
		Ohm	%Error	Ohm	%Error
R_1	10.20	10.54	-3.33	10.2000	0.00
X_1	8.17	8.24	-0.86	8.2443	-0.91
X_m	143.57	142.73	0.59	143.4905	0.06
R_2	10.52	10.47	0.48	10.5092	0.10
X_2	19.16	19.32	-0.84	19.0676	0.48
Root Mean Square Error			1.62		0.46

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่า ECPs โดยใช้ 3 เงื่อนไขการทำงานเดียว

Actual Values (Ohm)		Three Conditions			
		GA (Kostov, I., 2009)		Proposed ECPD	
		Ohm	%Error	Ohm	%Error
R_1	10.20	10.28	-0.78	10.2000	0.00
X_1	8.17	8.19	-0.24	8.1785	-0.10
X_m	143.57	143.17	0.28	143.5553	0.01
R_2	10.52	10.48	0.38	10.5189	0.01
X_2	19.16	19.21	-0.26	19.1449	0.08
Root Mean Square Error			0.44		0.06

4.2 ผลการเปรียบเทียบการหาพารามิเตอร์วงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงาน

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบกระบวนการประเมินค่าพารามิเตอร์ในวงจรมอเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธี GA PSO และ BWOA โดยได้ทำการทดสอบด้วยจำนวนประชากรและจำนวนรอบคำนวณที่แตกต่างกัน โดยมีการคำนวณตามเงื่อนไขดังตารางที่ 4.6 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.6 การทดสอบคำนวณด้วยจำนวนประชากรและจำนวนรอบที่แตกต่างกัน

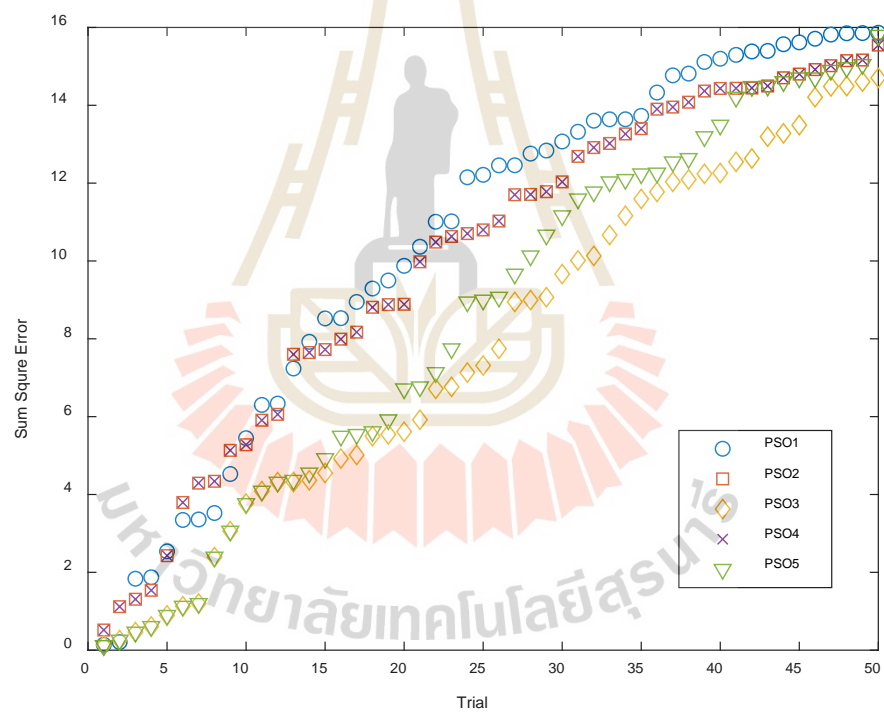
	จำนวนประชากร	จำนวนรอบ
PSO1 / GA1 / BWOA1	1000	1000
PSO2 / GA2 / BWOA2	1500	1000
PSO3 / GA3 / BWOA3	2000	1000
PSO4 / GA4 / BWOA4	2500	1000
PSO5 / GA5 / BWOA5	3000	1000

ตารางที่ 4.7 ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากการทดสอบคำนวณ

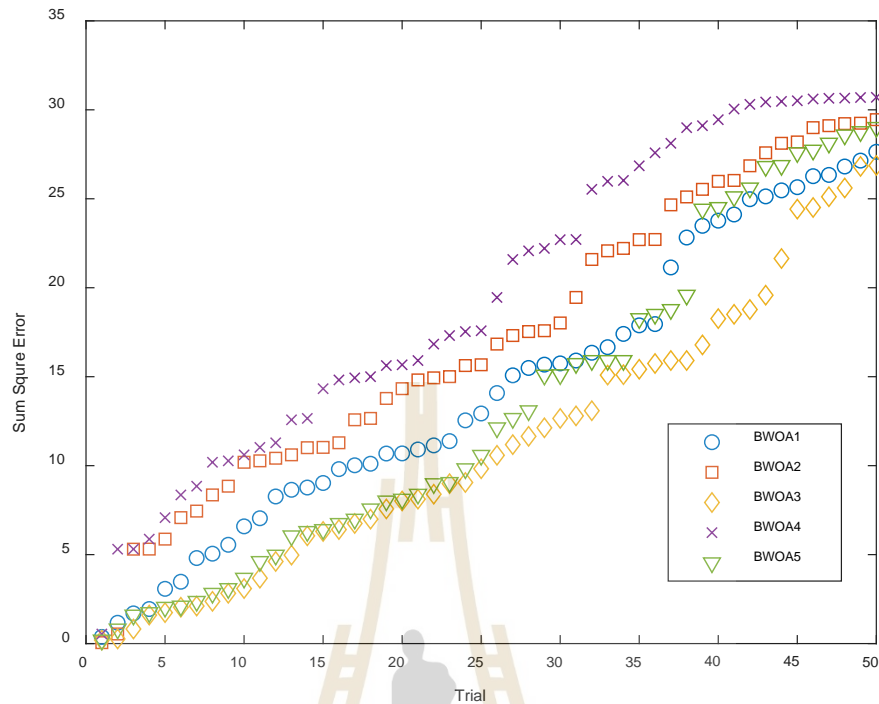
	Population	Iteration	R_1	X_1	X_m	R_2	X_2	Root Sum Square Error
Actual value	-	-	10.2000	8.1700	143.5700	10.5200	19.1600	-
GA	1000	1000	10.2288	8.2867	143.4452	10.5030	19.0088	0.2288
PSO	2000	1000	10.1996	8.0990	143.6239	10.5309	19.2394	0.1199
BWOA	1500	1000	10.1996	8.1387	143.5958	10.5248	19.1953	0.0539

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากการทดสอบคำนวณ

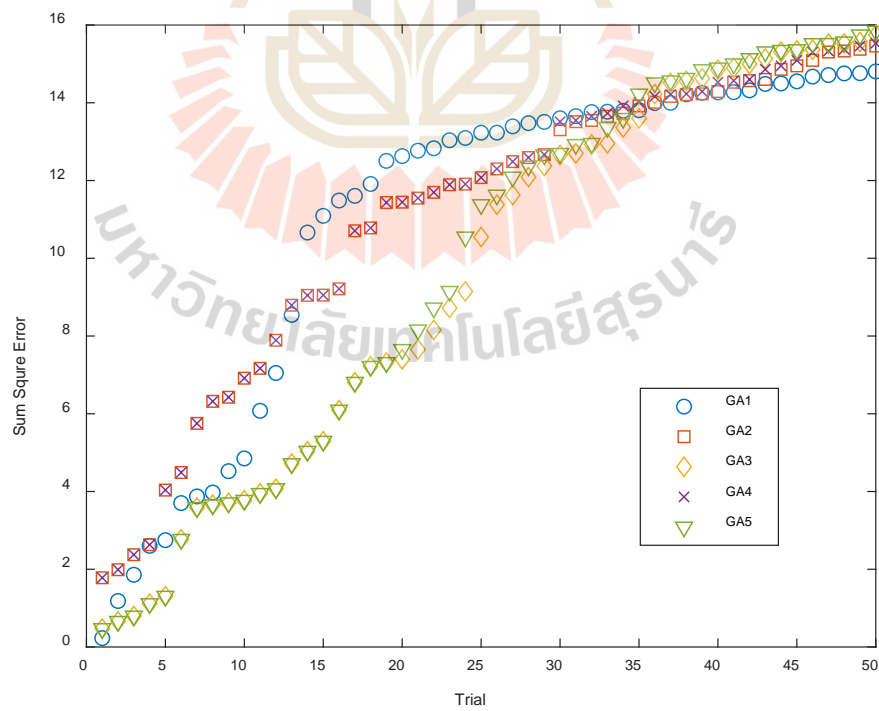
	Population	Iteration	R_1	X_1	X_m	R_2	X_2	Root Sum Square Error
Actual value	-	-	10.2000	8.1700	143.5700	10.5200	19.1600	-
GA	1000	1000	10.2070	10.5291	141.1790	10.2360	17.1040	3.9489
PSO	2500	1000	10.1996	8.4890	143.2470	10.5170	0.5249	0.5249
BWOA	1000	1000	13.1342	18.9569	127.535	29.2550	12.502	27.8826



รูปที่ 4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าตอบในการคำนวณ 50 ครั้งด้วยวิธี PSO



รูปที่ 4.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบในการคำนวณ 50 ครั้งด้วยวิธี BWOA



รูปที่ 4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบในการคำนวณ 50 ครั้งด้วยวิธี GA

รูปที่ 4.2 – 4.4 เป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนของแต่ละพารามิเตอร์ (Sum Square Error, SSE) จากผลการคำนวณแต่ละวิธีที่นำมาศึกษาวิธีการละ 50 ครั้ง ทั้งนี้จากการทดสอบกระบวนการคำนวณพบว่า

- 1) ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของ BWOA มีการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้แม่นยำที่สุด แต่ผลลัพธ์โดยรวมของ BWOA มีการกระจายตัวที่กว้าง ทำให้มีค่าเฉลี่ยที่คลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงกว่าวิธีอื่น
- 2) ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของ PSO มีค่าแม่นยำกว่า GA แต่คลาดเคลื่อนมากกว่าค่าที่ดีที่สุดของ BWOA แต่ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์เป็นค่าที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับทั้ง 3 วิธี
- 3) ผลลัพธ์ของ PSO มีค่าใกล้เคียงกันในทุกการคำนวณมากกว่าวิธีอื่นและมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมที่ต่ำกว่าวิธีอื่น

4.3 การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไม่ปลดโหลดจากวิธีการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงาน

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการประมาณประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) โดยมีสภาพการทำงานที่หลากหลาย การประมาณค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำโดย PSO โดยใช้แรงดันการวัด กระแส กำลังจริง และตัวประกอบกำลัง ที่จุดการทำงานหลายจุด จากนั้นสามารถประมาณค่าด้วยค่ามาตรฐานของความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลด (stray loss) ความสูญเสียจากความเสียดทานและลม (fiction and windage loss) และแรงบิดที่แกนเพลลาของโรเตอร์ (shaft-torque output power) ดังนั้นสามารถกำหนดประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้โดยไม่ต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ วิธีการนี้ได้ตรวจสอบด้วยข้อมูลการวัดจำนวนต่างกันและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ วิธีการที่นำเสนอนี้ใช้ได้กับการประมาณประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้ข้อมูลการวัดค่าสภาพการทำงานที่หลากหลาย โดยใช้การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้เงื่อนไขการทำงานหลายเงื่อนไขที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ โดยกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$P_{out} = I_2^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) R_2 - P_{fw} - P_{stray} \quad (4.1)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของมอเตอร์จึงสามารถคำนวณได้โดย

$$\%Efficiency = \frac{P_{out}}{P} \times 100\% \quad (4.2)$$

มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบด้วยวิธีที่นำเสนอ มีผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ ตามตารางที่ 4.1 และค่าตัวแปรที่ใช้ใน PSO มีตามนี้

$$c_1 = 2.0, c_2 = 2.0, w_{max} = 0.9, w_{min} = 0.4$$

$$\text{รอบการทำซ้ำสูงสุด} = 100$$

$$\text{จำนวนประชากร (Number of Population)} = 1000$$

ผลการทดสอบมอเตอร์จากห้องปฏิบัติการ ขนาด 30 kW ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วกว่า 5 ปี มีผลการทดสอบดังนี้

1) แรงดันพิกัด(Rated Voltage)	380	V
2) กระแสพิกัด(Rated Current)	56.8	A
3) พิกัดกำลัง (Rated Power Output)	30	kW
4) ตัวประกอบกำลัง(Power Factor)	0.87	Lagging
5) พิกัดความเร็วรอบ(Speed at Rated)	1470	RPM
6) จำนวนของขั้วมอเตอร์(Number of pole)	4	pole
7) ประสิทธิภาพ (Efficiency)	92.24	%

ผลการทดสอบมอเตอร์ที่โหลด 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.9 และ 4.10

ตารางที่ 4.9 ค่าทางไฟฟ้าของผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW ที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา

Load (%)	Voltage (V)	Current (A)	Power Factor Lagging	Power Input (kW)
50.00	376.00	33.40	0.75	16.53
60.00	375.00	41.10	0.76	19.90
70.00	373.00	44.60	0.84	24.28
80.00	373.00	49.20	0.84	26.84
90.00	373.00	53.20	0.87	29.83
100.00	373.00	57.40	0.88	32.59

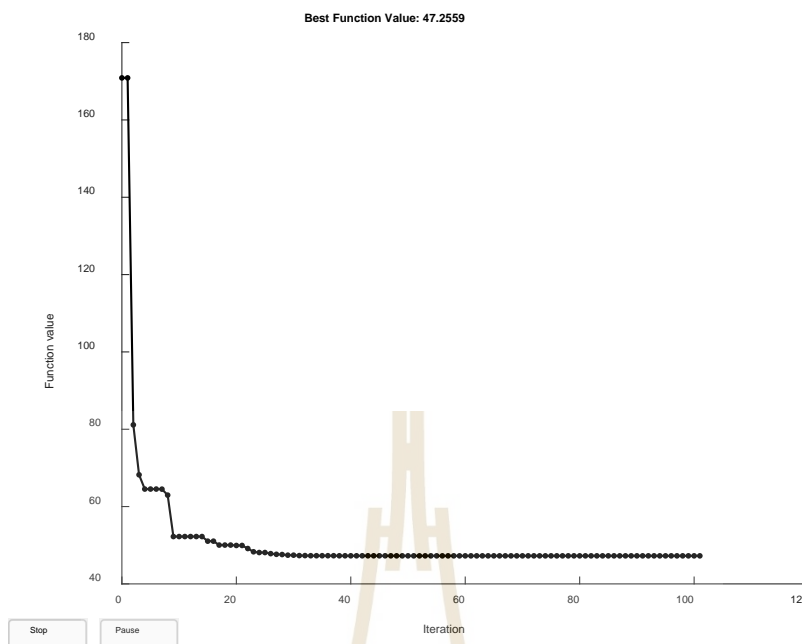
ตารางที่ 4.10 ค่าทางกลและประสิทธิภาพของผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW ที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา

Torque (N.m)	Speed (RPM)	Slip %	Power Output (kW)	Test Efficiency (%)
95.10	1488.00	0.80	14.79	89.51
115.20	1486.00	0.93	17.89	89.89
141.10	1479.00	1.40	21.82	89.89
156.20	1478.00	1.47	24.13	89.90
173.20	1477.00	1.53	26.74	89.63
190.30	1476.00	1.60	29.35	90.06

ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ประเมินได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังงานและประสิทธิภาพของแต่ละจุดการทำงานแสดงในตารางที่ 4.12 โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ โดยรูปที่ 4.5 การลู่เข้าของคำตอบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลที่ประเมินได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW ที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา

R_1	X_1	X_m	R_2	X_2
0.0001	0.0073	8.6069	0.0716	0.0002



รูปที่ 4.5 การลู่เข้าของค่าตอบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ตารางที่ 4.12 ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย PSO เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW ที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา

Laboratory Test		PSO based IMEE (Proposed)	
Power Output (kW)	Efficiency (%)	Power Output (kW)	Efficiency (%)
14.79	89.51	14.14	83.96
17.89	89.89	16.57	85.89
21.82	89.89	25.27	89.73
24.13	89.90	26.60	90.09
26.74	89.63	27.77	90.35
29.35	90.06	29.04	90.64

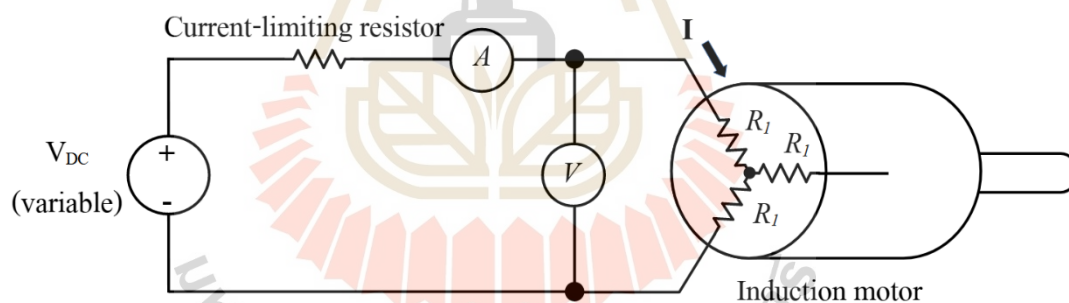
จากตารางที่ 4.12 พบว่าการประมาณประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ PSO มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด ดังนั้นวิธีการนี้สามารถนำไปใช้กับการทดสอบประสิทธิภาพมอเตอร์เบื้องต้นในขณะทำงานในกรณีที่ต้องการหลีกเลี่ยงการปลดมอเตอร์ไปทดสอบในห้องปฏิบัติการได้

4.4 ผลการทดสอบการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงานโดยใช้ข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบวิธีการในวิทยานิพนธ์กับการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ โดยจะเปรียบเทียบวิธีการ PSO กับการหาค่าพารามิเตอร์และค่าประสิทธิภาพจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 kW

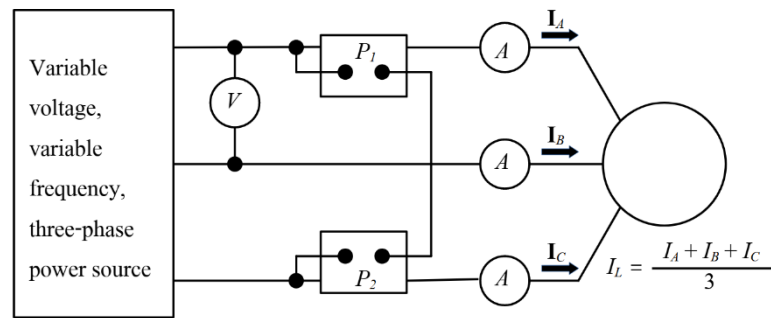
วิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มีขั้นตอนดังนี้

1) การวัดความต้านทาน แสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งในการทดสอบจะใช้วิธีการวัดโดยตรงจากมอเตอร์ โดยใช้ Digital Multimeter เนื่องจากการวัดความต้านทานโดยตรงจากมอเตอร์นั้นเป็นวิธีที่สะดวกและง่ายต่อการทำเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ



รูปที่ 4.6 วงจรทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์

2) การทดสอบสภาวะไร้อโหลด (No Load test) ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนที่ความเร็วตามขนาดของแรงดันพิกัด เนื่องจากไม่มีการขับโหลดที่เพลลาของมอเตอร์ ดังนั้น n_r มีค่าสูงส่งผลให้ค่าสลิปต่ำ $s=0$ กระแสที่โรเตอร์และค่าความสูญเสียที่ขดลวดทองแดงมีค่าต่ำมาก จึงไม่คิดค่าความสูญเสีย ดังรูปที่ 4.7



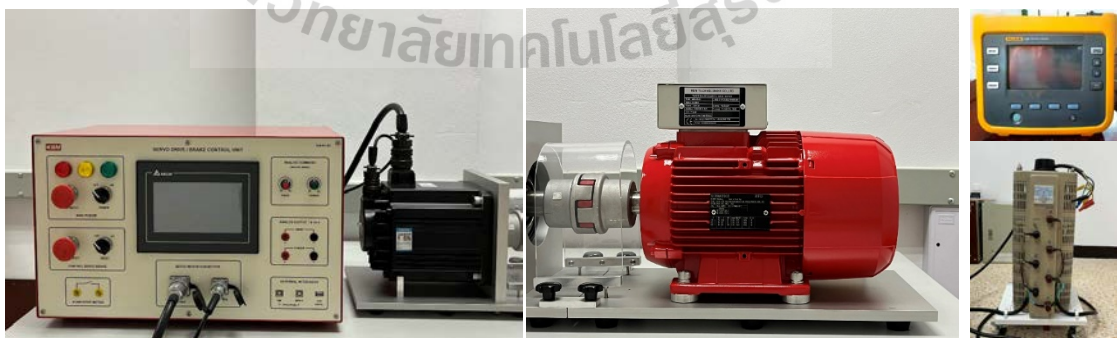
รูปที่ 4.7 การทดสอบสภาวะไร้โหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

3) การทดสอบยึดโรเตอร์ (Locked-rotor test) วงจรที่ใช้ทดสอบเหมือนกับวงจรทดสอบสภาวะไร้โหลดทุกประการ ต่างกันที่จับยึดโรเตอร์ไว้ไม่ให้หมุน $s=1$ ค่า R_2/s จึงมีค่าน้อย เท่ากับ R_2 ดังนั้น มองวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเพียงการอนุกรมของ R_1 , X_1 , R_2 และ X_2

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือในการทดสอบมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.8 และสามารถแสดงได้ดังนี้

- 1) 3 \emptyset Squirrel-cage Induction Motor Type 3 kW, 4 pole, 230/400 V, 50 Hz
- 2) Class B
- 3) SERVO DRIVE/BRAKE CONTROL UNIT
- 4) Power Meter
- 5) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า
- 6) Digital Multimeter



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์ในการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ต่อมอเตอร์แบบ Y จากนั้นใช้ Digital Multimeter ปรับเป็นโหมดความต้านทานเพื่อวัดความต้านทานของมอเตอร์
- 2) ปรับตั้ง Power Meter โดยกดปุ่ม T3FE/3Ø3W ให้นำหน้าจอแสดง T3FE สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า 3 เฟส
- 3) เปิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า เพื่อจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยปรับค่าแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงค่าแรงดันพิกัด
- 4) บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า 3 เฟส
- 5) ลดแรงดันไฟฟ้าลงต่ำสุด จากนั้นปิดแหล่งจ่ายแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์
- 6) ทำการทดสอบยัดโรเตอร์ไม่ให้เกิดการหมุน จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยปรับค่าแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงค่ากระแสพิกัด
- 7) บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า 3 เฟส
- 8) ลดแรงดันไฟฟ้าลงต่ำสุด จากนั้นปิดแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับมอเตอร์
- 9) เปิดเครื่อง SERVO DRIVE/BRAKE CONTROL UNIT เพื่อทำการวัดค่าต่างๆ ในจุดการทำงานที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ในหน้าจอเครื่อง SERVO DRIVE/BRAKE CONTROL UNIT ให้กดเลือก Brake ใน Auto Mode จากนั้นกดเลือก Brake Set Step และสุดท้ายกดเลือก ON Motor
- 10) เปิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และค่อยๆ ปรับค่าแรงดันขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงค่าที่พิกัด
- 11) กดเลือกจุดทำงานที่ 25% หลังจากนั้นบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า, แรงดันไฟฟ้าขาออก, กระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า, ความเร็วรอบของโรเตอร์, แรงบิด และ ค่าตัวประกอบกำลัง
- 12) ทำซ้ำข้อที่ 12 แต่เป็นจุดการทำงานที่ 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ
- 13) เมื่อวัดครบทุกจุดการทำงานแล้ว ให้กดเลือก RESET ที่หน้าจอเครื่อง SERVO DRIVE/BRAKE CONTROL UNIT
- 14) ลดแรงดันไฟฟ้าลงต่ำสุด จากนั้นปิดแหล่งจ่ายแรงดัน

ผลการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลดและยัดโรเตอร์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ โดยทำการบันทึกค่า 3 ครั้งนำมาเฉลี่ยกัน ซึ่งผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.13 การทดสอบสถานะไร้อโหลด (No Load test)

บันทึกครั้งที่ 1	A	B	C	Average
V (V)	230.3	229.7	230.2	230
I (A)	3.380	3.289	3.436	3.368
P (W)	68	75	87	229/3
บันทึกครั้งที่ 2				
V (V)	229.9	229.7	230.7	230.1
I (A)	3.359	3.264	3.522	3.382
P (W)	53	87	90	230/3
บันทึกครั้งที่ 3				
V (V)	229.9	229.5	230	229.8
I (A)	3.368	3.286	3.434	3.363
P (W)	67	77	85	229/3

ตารางที่ 4.14 การทดสอบยึดโรเตอร์ (Locked-rotor test)

บันทึกครั้งที่ 1	A	B	C	Average
V (V)	47.8	49.1	48.2	48.37
I (A)	6.472	6.638	6.558	6.556
P (W)	178	179	168	524/3
บันทึกครั้งที่ 2				
V (V)	46.9	48.3	47.3	47.50
I (A)	6.266	6.461	6.394	6.374
P (W)	172	175	164	511/3
บันทึกครั้งที่ 3				
V (V)	46.9	48.2	47.3	47.47
I (A)	6.267	6.561	6.294	6.374
P (W)	176	176	161	512/3

ตารางที่ 4.15 ค่าพารามิเตอร์วงจรมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ได้แทนค่าจากการทดสอบมอเตอร์ในการหาค่าพารามิเตอร์

	R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
Squirrel cage class B ต่อแบบ Y	2.27	2.39	1.79	3.59	68.23

นอกจากนี้ในการทดสอบมอเตอร์ยังได้ทำการวัดค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 25%, 50%, 75%, และ 100% ของพิกัด แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 มอเตอร์ทำงาน ณ จุดการทำงาน

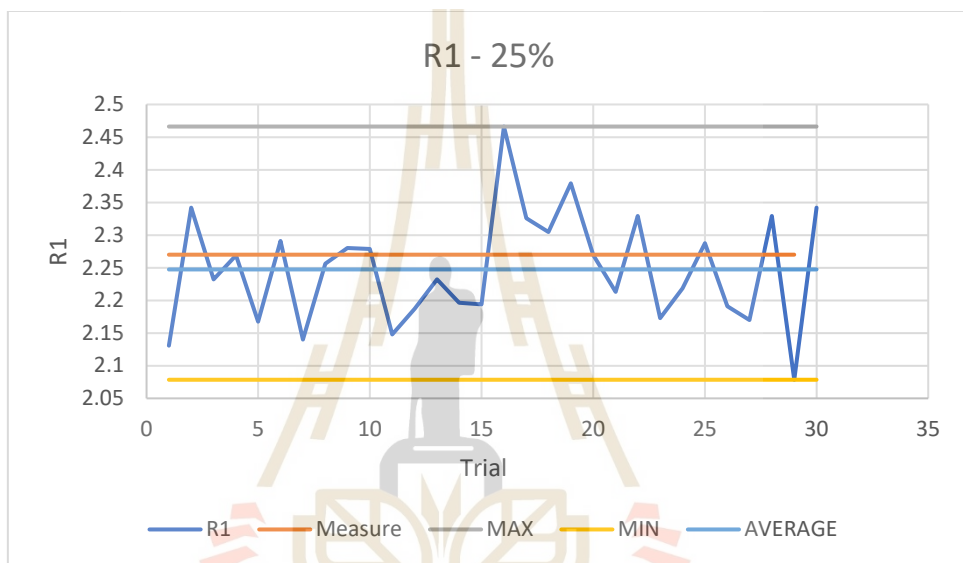
สภาวะการทำงาน	V (V)	I (A)	P (W)	PF	Nr (rpm)	Torque (Nm)	Pout (W)	η (%)
25%	230.03	3.639	1130	0.45	1484	5.23	812.8	71.93
50%	229.3	12.868	1915	0.65	1471.1	10.45	1640.4	85.66
75%	228.6	5.211	2720	0.75	1456.3	15.68	2392.4	87.96
100%	228.07	6.311	3552	0.82	1440.6	20.91	3154.8	88.82

ทั้งนี้ได้ทำการทดสอบเป็น 5 กรณี ดังนี้

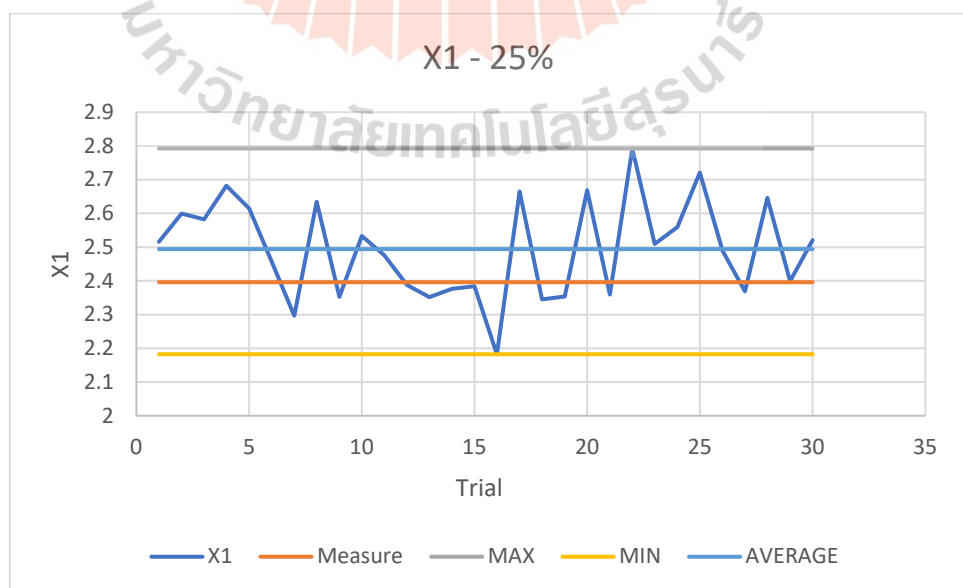
- 1) ประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 25% ของพิกัด แสดงผลดังตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.9 – 4.13 โดยผลการคำนวณ 30 ครั้งแสดงในภาคผนวก ข.
- 2) ประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 50% ของพิกัด แสดงผลดังตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.14 – 4.18 โดยผลการคำนวณ 30 ครั้งแสดงในภาคผนวก ข.
- 3) ประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 75% ของพิกัด แสดงผลดังตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.19 – 4.23 โดยผลการคำนวณ 30 ครั้งแสดงในภาคผนวก ข.
- 4) ประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 100% ของพิกัด แสดงผลดังตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.24 – 4.28 โดยผลการคำนวณ 30 ครั้งแสดงในภาคผนวก ข.
- 5) ประเมินค่าพารามิเตอร์ที่ 4 สภาวะการทำงานค่า 25% 50% 75% และ 100% ของพิกัด แสดงผลดังตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.29 – 4.33 โดยผลการคำนวณ 30 ครั้งแสดงในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.17 ผลการประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 25% ของพิกัด

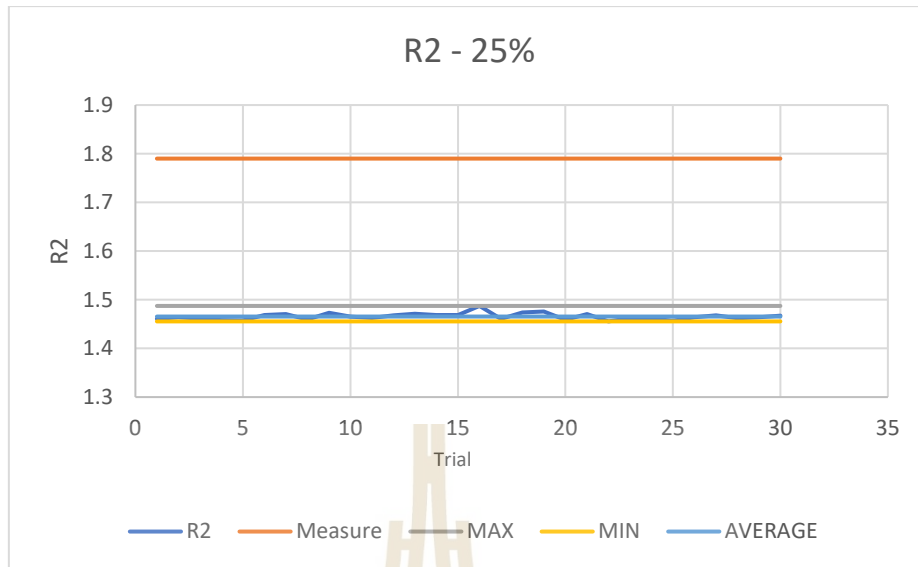
25%	R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
Max	2.4662	2.7924	1.4873	4.5953	67.792
Min	2.0785	2.1824	1.4555	3.0604	67.109
Avg	2.2474	2.4941	1.4655	3.9588	67.532
% η = 86.25					



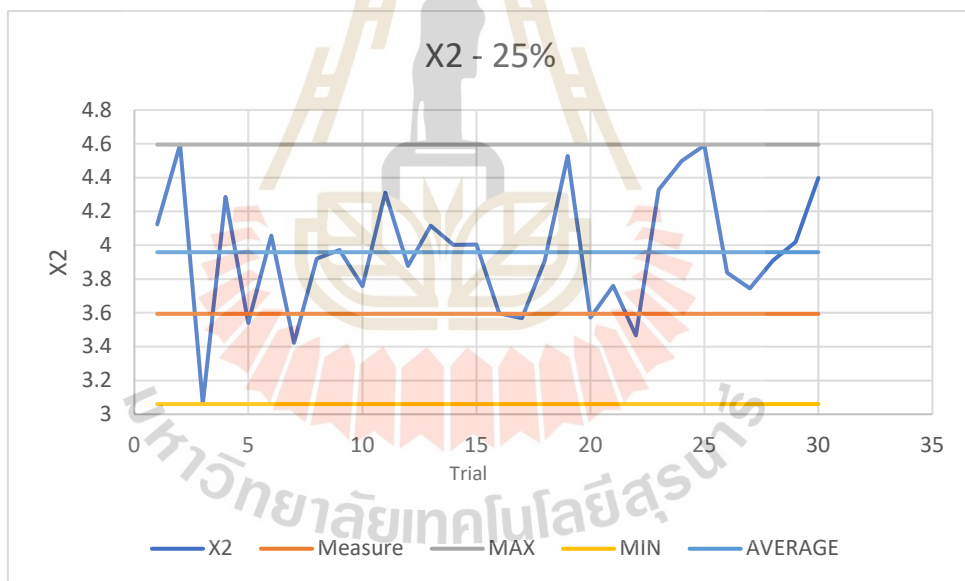
รูปที่ 4.9 ผลลัพธ์ของ R_1 ณ จุดการทำงานที่ 25% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



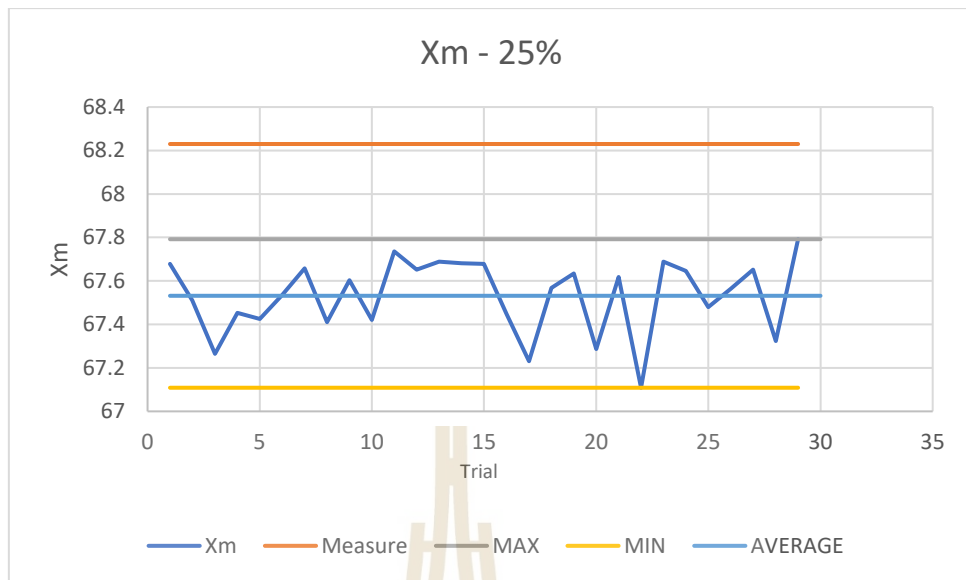
รูปที่ 4.10 ผลลัพธ์ของ X_1 ณ จุดการทำงานที่ 25% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



รูปที่ 4.11 กราฟ R_2 ณ จุดการทำงานที่ 25% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



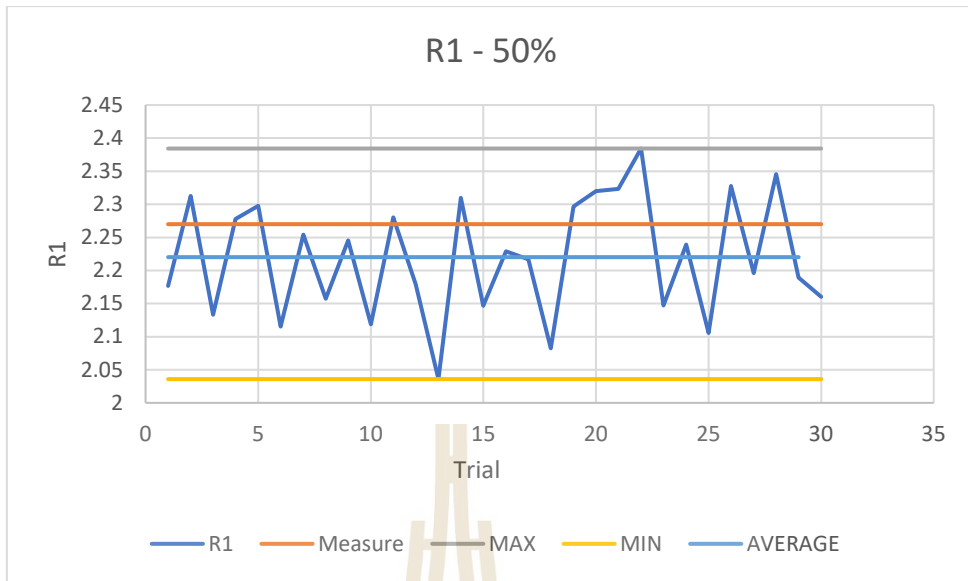
รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์ของ X_2 ณ จุดการทำงานที่ 25% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



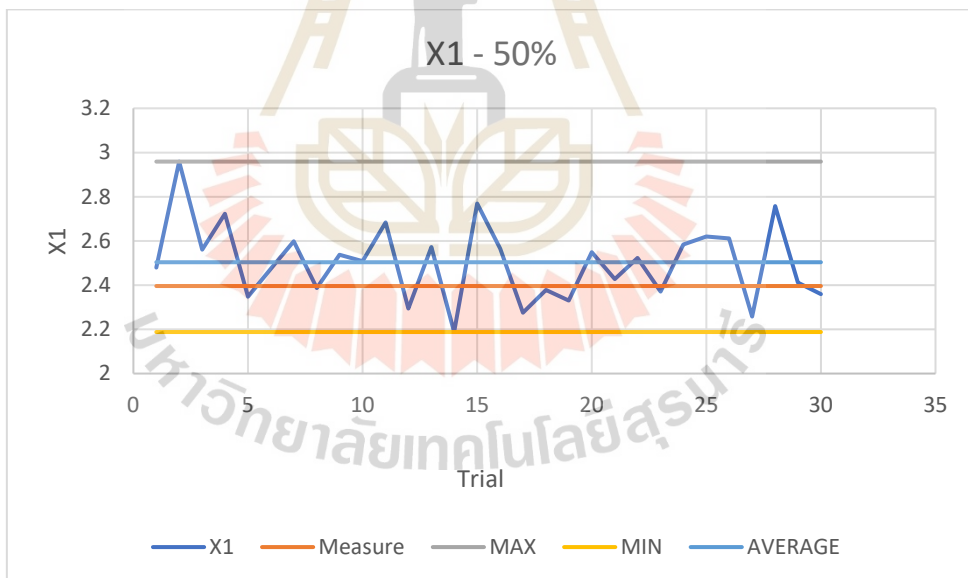
รูปที่ 4.13 ผลลัพธ์ของ X_m ณ จุดการทำงานที่ 25% จากการคำนวณ 30 ครั้ง

ตารางที่ 4.18 ผลการประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 50% ของพิกัด

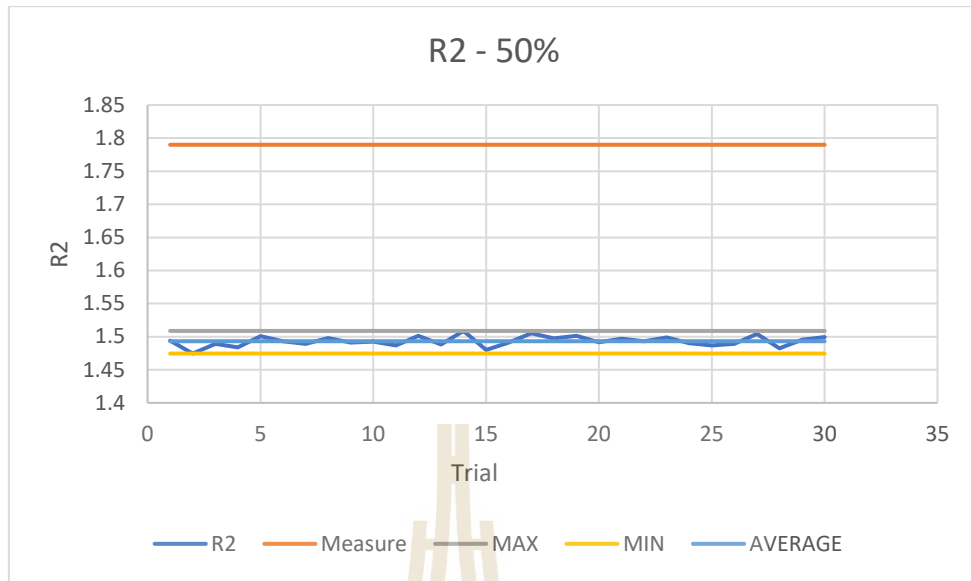
50%	R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
Max	2.3843	2.9590	1.5087	4.6926	69.7276
Min	2.0359	2.1879	1.4745	3.2388	68.3419
Avg	2.2186	2.5036	1.4931	4.0714	69.1482
% η = 86.93					



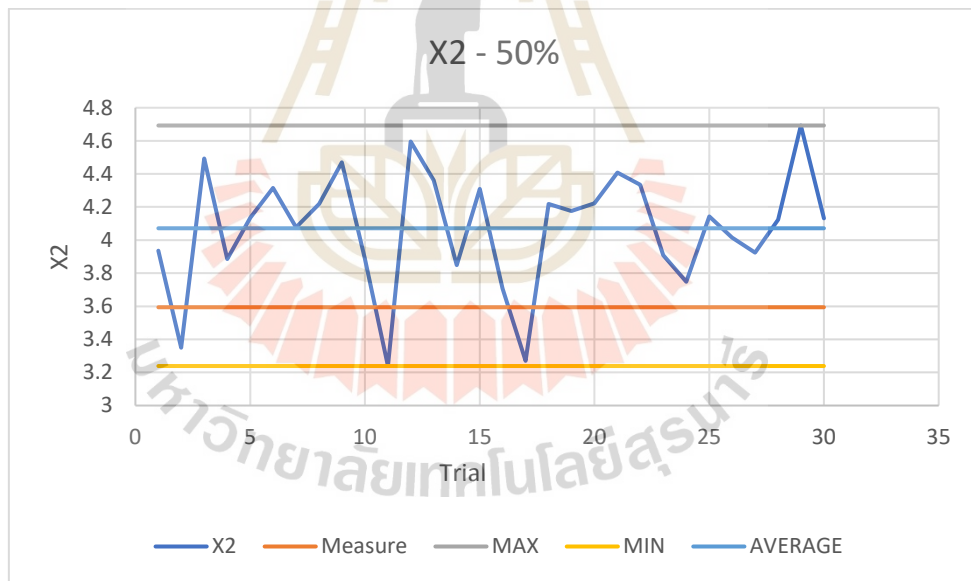
รูปที่ 4.14 ผลลัพธ์ R_1 ณ จุดการทำงานที่ 50% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



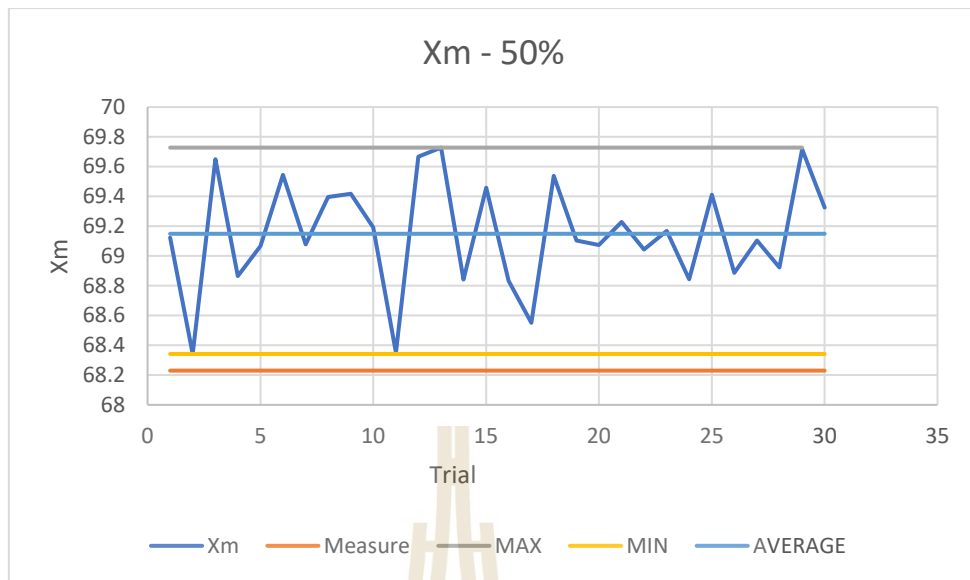
รูปที่ 4.15 ผลลัพธ์ของ X_1 ณ จุดการทำงานที่ 50% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



รูปที่ 4.16 ผลลัพธ์ของ R_2 ณ จุดการทำงานที่ 50% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



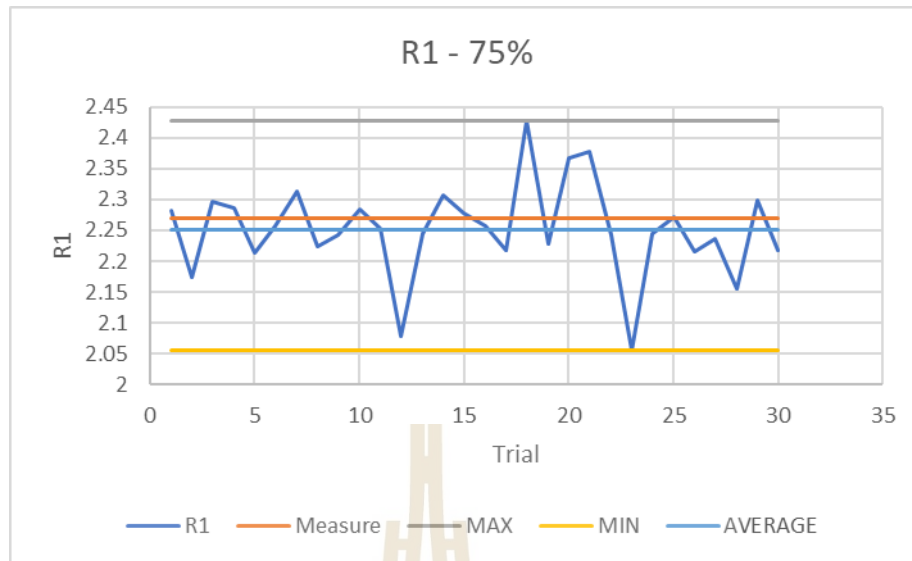
รูปที่ 4.17 ผลลัพธ์ของ X_2 ณ จุดการทำงานที่ 50% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



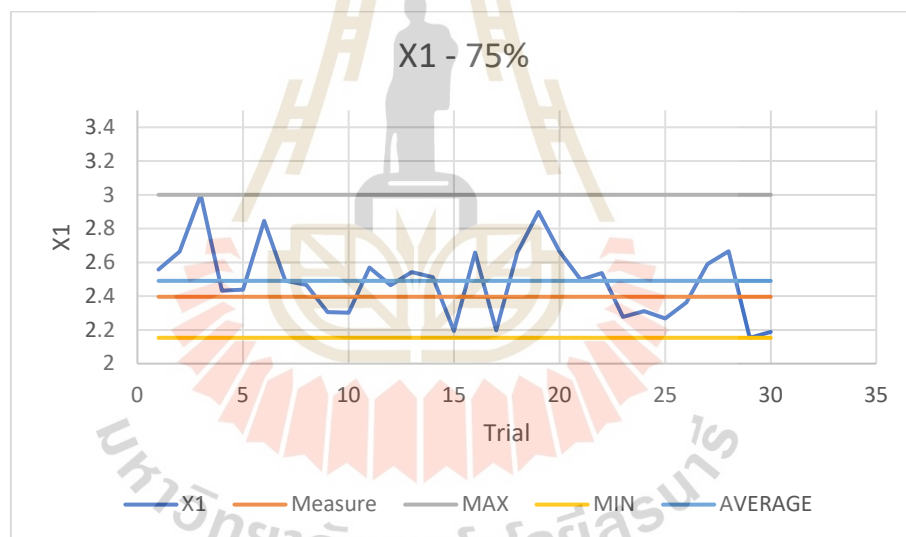
รูปที่ 4.18 ผลลัพธ์ของ X_m ณ จุดการทำงานที่ 50% จากการคำนวณ 30 ครั้ง

ตารางที่ 4.19 ผลการประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 75% ของพิกัด

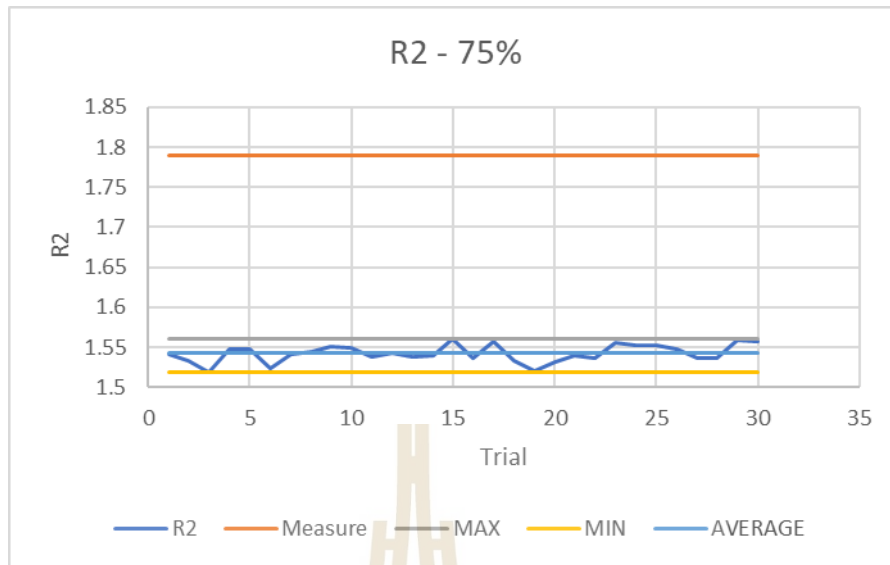
75%	R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
Max	2.4267	3	1.5605	4.7281	71.1198
Min	2.0556	2.1530	1.5197	3.0785	67.8814
Avg	2.2515	2.4902	1.5425	3.9780	69.7212
% $\eta = 85.74$					



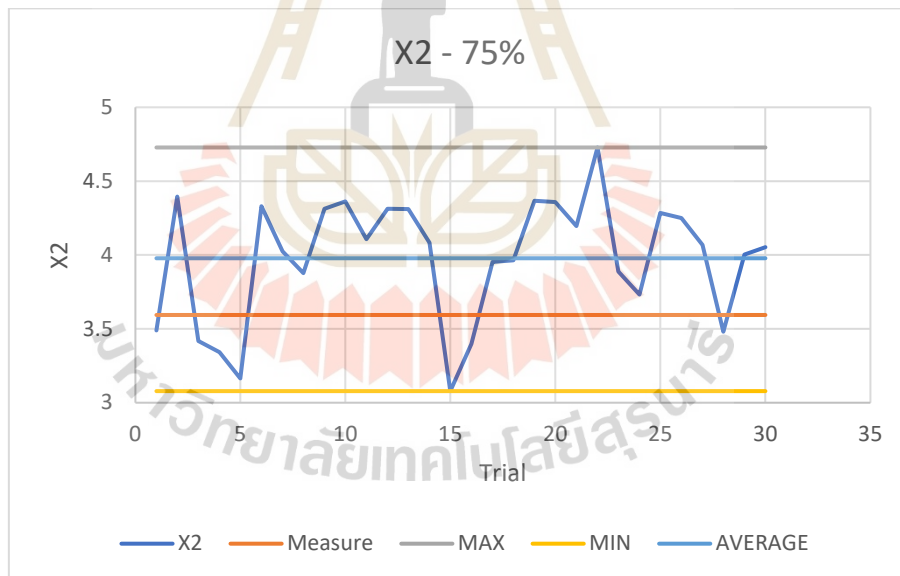
รูปที่ 4.19 ผลลัพธ์ของ R_1 ณ จุดการทำงานที่ 75% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



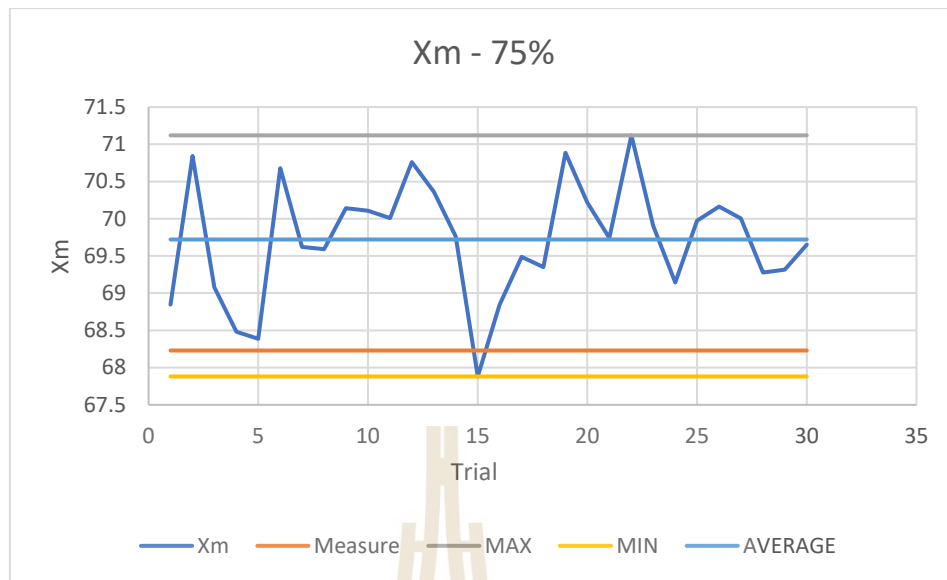
รูปที่ 4.20 ผลลัพธ์ของ X_1 ณ จุดการทำงานที่ 75% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



รูปที่ 4.21 ผลลัพธ์ของ R_2 ณ จุดการทำงานที่ 75% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



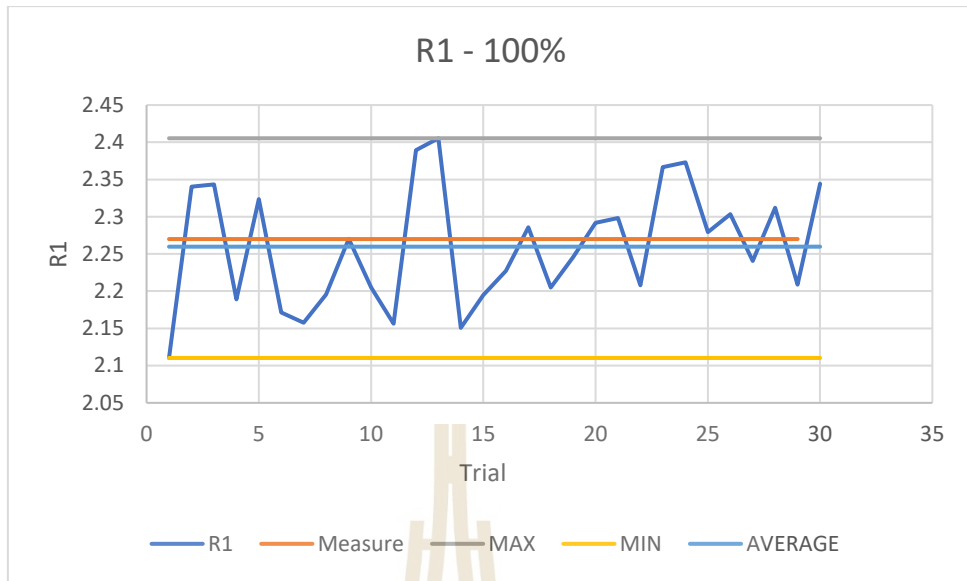
รูปที่ 4.22 ผลลัพธ์ของ X_2 ณ จุดการทำงานที่ 75% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



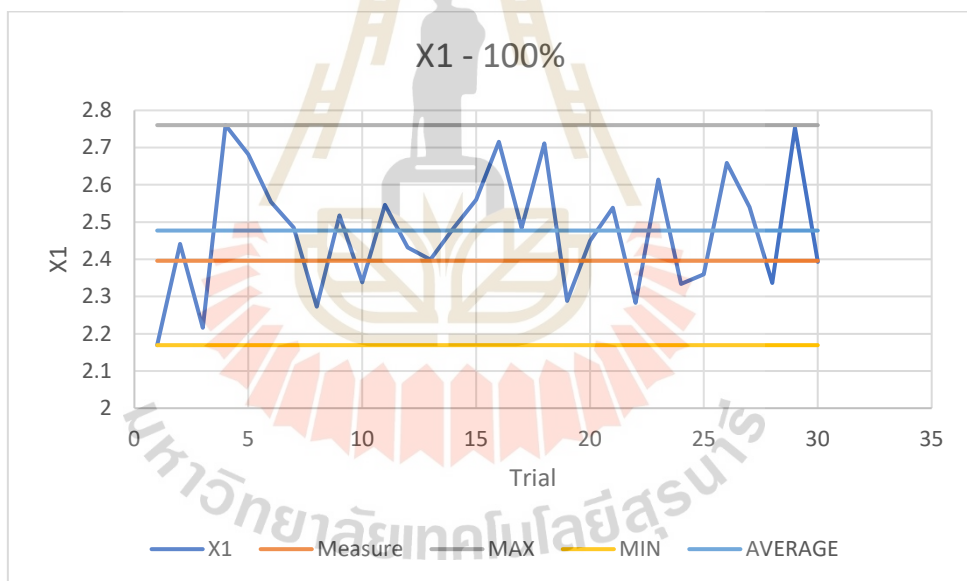
รูปที่ 4.23 ผลลัพธ์ของ X_m ณ จุดการทำงานที่ 75% จากการคำนวณ 30 ครั้ง

ตารางที่ 4.20 ผลการประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะการทำงาน 100% ของพิกัด

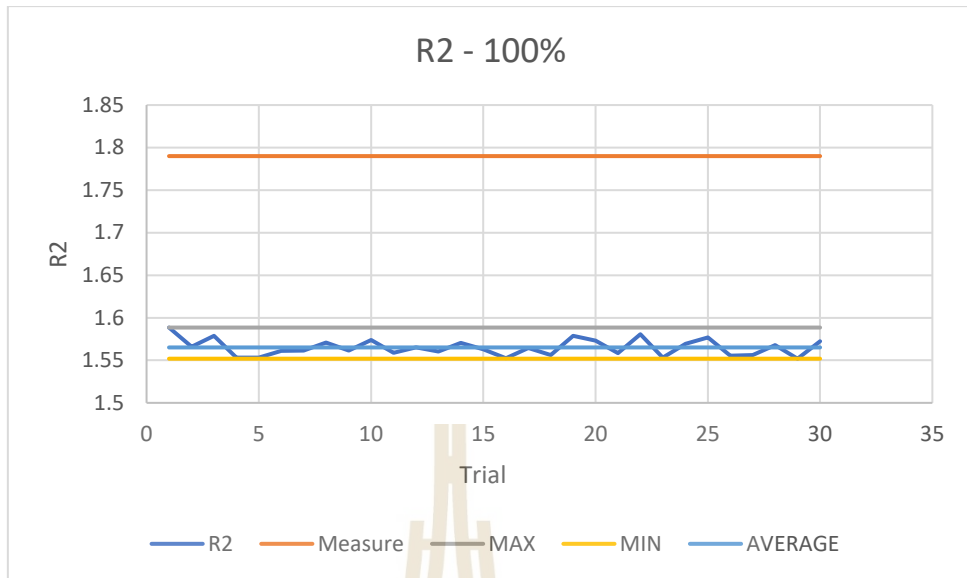
100%	R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
Max	2.4054	2.7604	1.5885	4.7958	73.0341
Min	2.1103	2.1693	1.5519	3	67.1622
Avg	2.2598	2.4772	1.5651	4.0319	70.5201
% $\eta = 84.05$					



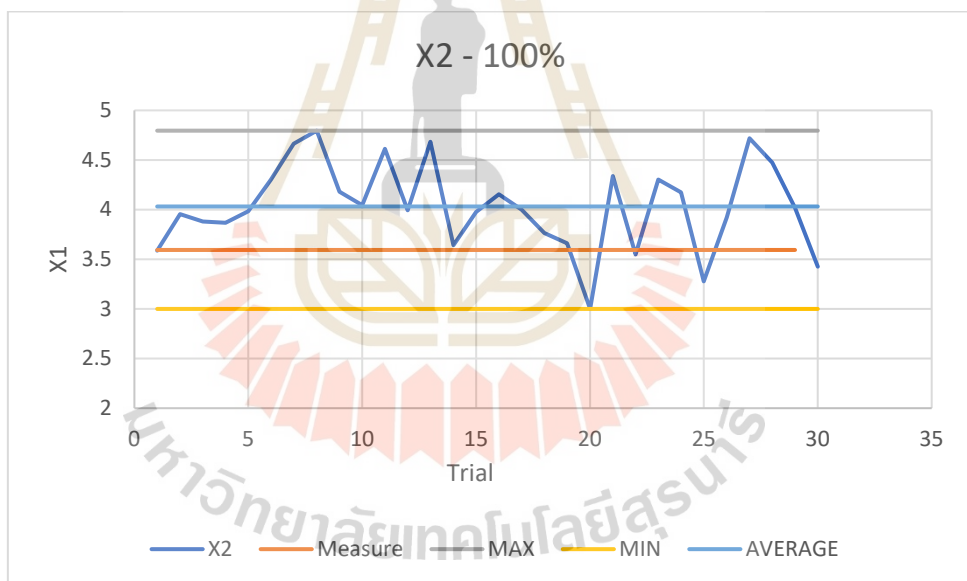
รูปที่ 4.24 ผลลัพธ์ของ R_1 ณ จุดการทำงานที่ 100% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



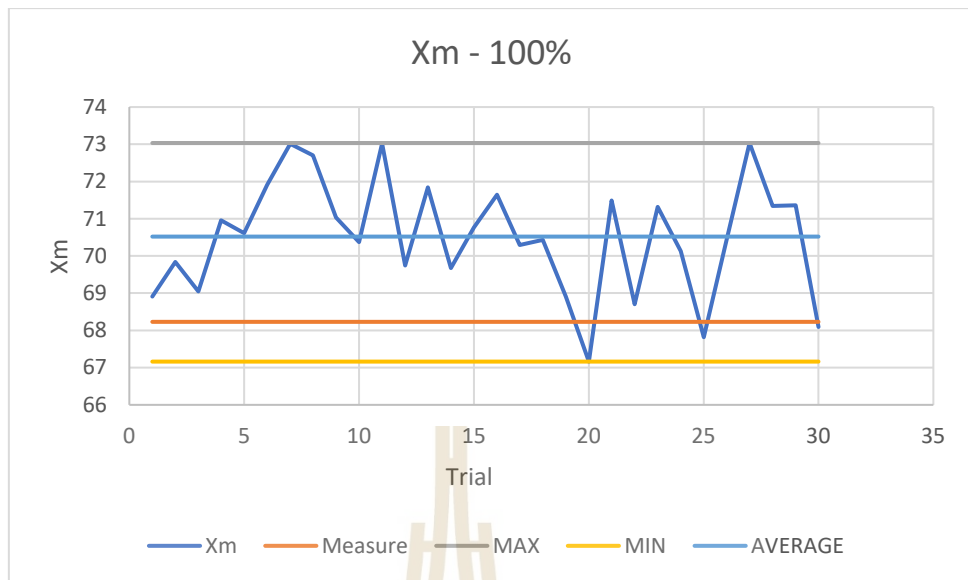
รูปที่ 4.25 ผลลัพธ์ของ X_1 ณ จุดการทำงานที่ 100% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



รูปที่ 4.26 ผลลัพธ์ของ R_2 ณ จุดการทำงานที่ 100% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



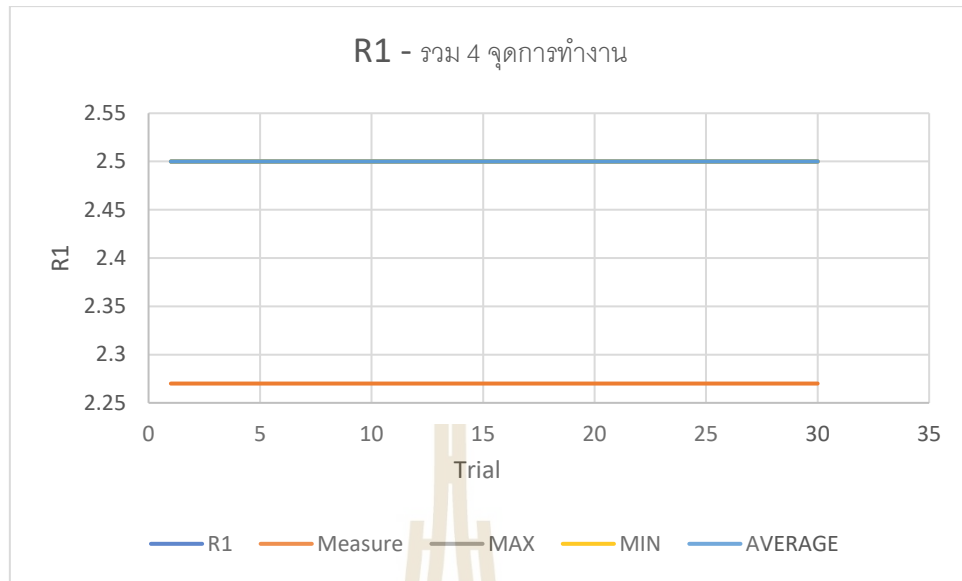
รูปที่ 4.27 ผลลัพธ์ของ X_2 ณ จุดการทำงานที่ 100% จากการคำนวณ 30 ครั้ง



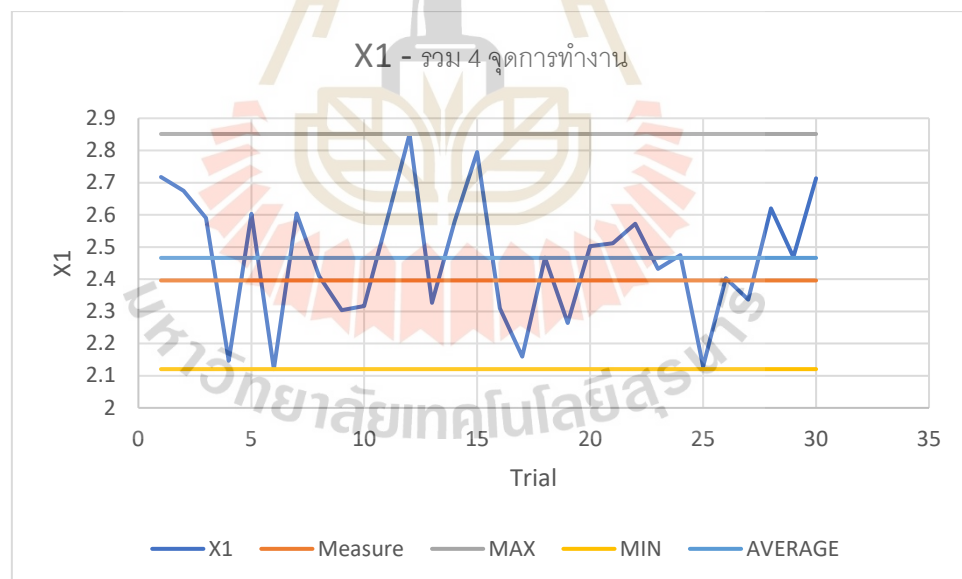
รูปที่ 4.28 ผลลัพธ์ของค่า X_m ณ จุดการทำงานที่ 100% จากการคำนวณ 30 ครั้ง

ตารางที่ 4.21 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส จากการคำนวณด้วย 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%)

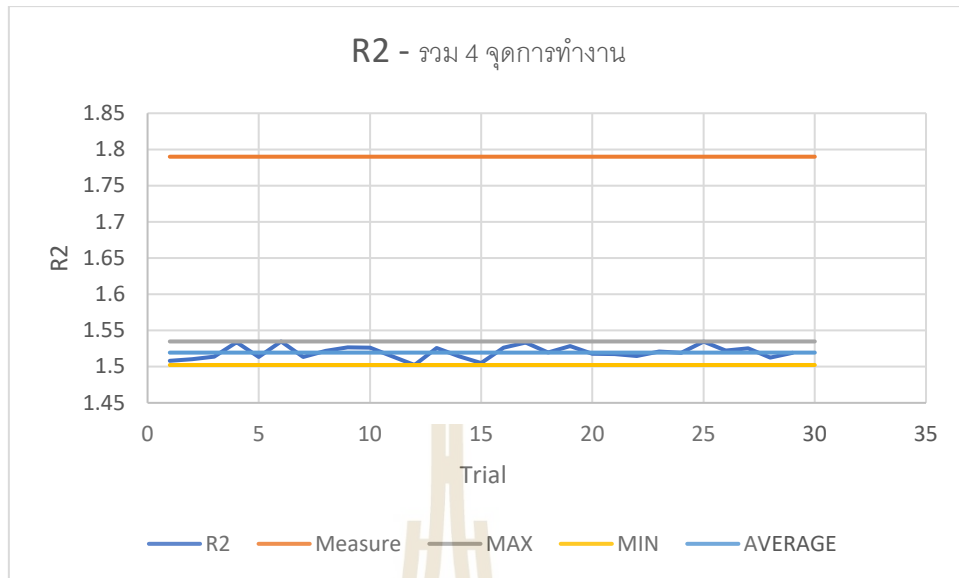
4 points	R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
Max	2.5	2.8512	1.5348	4.1001	68.5468
Min	2.5	2.1204	1.5023	3.2901	67.816
Avg	2.5	2.47	1.52	3.72	68.20
% η = 85.47 (25%), 85.98 (50%), 85.38 (75%) และ 84.25 (100%)					



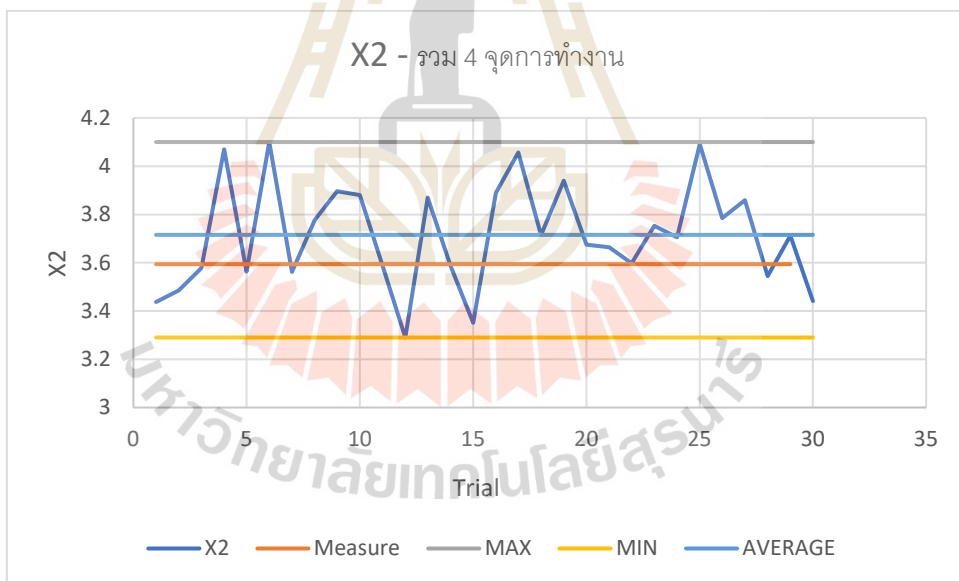
รูปที่ 4.29 ผลลัพธ์ของค่า R_1 ณ 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%)
จากการคำนวณ 30 ครั้ง



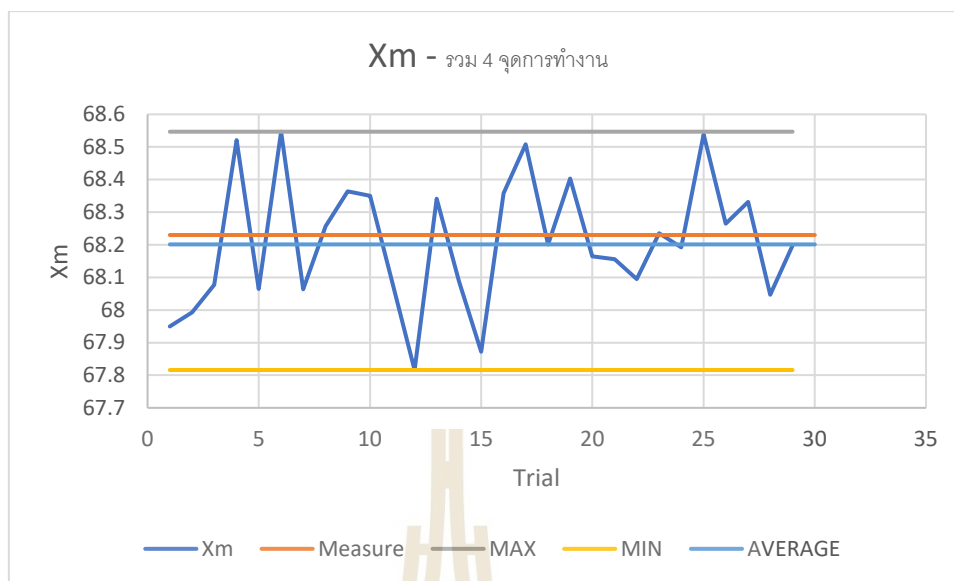
รูปที่ 4.30 ผลลัพธ์ของค่า X_1 ณ 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%)
จากการคำนวณ 30 ครั้ง



รูปที่ 4.31 ผลลัพธ์ของค่า R_2 ณ 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%)
จากการคำนวณ 30 ครั้ง



รูปที่ 4.32 ผลลัพธ์ของค่า X_2 ณ 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%)
จากการคำนวณ 30 ครั้ง



รูปที่ 4.33 ผลลัพธ์ของค่า X_m ณ 4 จุดการทำงาน (25%, 50%, 75% และ 100%)
จากการคำนวณ 30 ครั้ง

ตารางที่ 4.22 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ใน
วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส กับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการแทนค่า
จากการทดลอง

พารามิเตอร์	R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
ค่าจากการทดลอง	2.27	2.39	1.79	2.59	68.23
ค่าจากโปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์	2.50	2.47	1.52	3.72	68.20

ตารางที่ 4.23 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากโปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจร
สมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส กับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการแทนค่าจาก
การทดลอง

จุดการทำงาน	%η	
	ค่าจากโปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์	ค่าจากการทดลอง
25%	85.47	71.93
50%	85.98	85.66
75%	85.38	87.96
100%	84.25	88.82

ตารางที่ 4.22 แสดงผลลัพธ์ของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการประมาณค่าด้วย PSO พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ และจากตารางที่ 4.23 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากโปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส กับค่าที่ได้จากการแทนค่าจากการทดลองพบว่า ณ จุดการทำงานที่ 50%, 75% และ 100% มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 5% ซึ่งอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ แต่ ณ จุดการทำงานที่ 25% มีค่าความผิดพลาดอยู่ประมาณ 14%

จากการเปรียบเทียบผลระหว่างการนำผลการทดลองไปคำนวณ โดยแทนค่าในสมการตามทฤษฎี กับผลการจำลองบนโปรแกรม พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากการประมาณค่าไม่สามารถทราบได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการแทนค่าที่ได้จากการทดลองและผลของการจำลองโปรแกรมนั้นถูกต้อง และแม่นยำเพียงใด จึงจำเป็นต้องใช้ค่าประสิทธิภาพมาช่วยในการอ้างอิง และจากผลที่ได้จากการแทนค่าในทฤษฎีกับผลการจำลองบนโปรแกรม พบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้ทั้ง 3 จุดการทำงาน (50%, 75% และ 100%) นั้น มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณไม่เกิน 5% แต่ในจุดการทำงานที่ 25% นั้น มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 14% โดยค่าความคลาดเคลื่อนอาจเกิดขึ้นได้จากค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังทางกลที่เกิดขึ้นในโรเตอร์

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ปลดโหลดด้วยปัญญาประดิษฐ์ โดยจะมีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกระบวนการแมงมุมแม่ม่ายดำ (Black Widow Optimization Algorithm, BWOA) โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงาน การหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงานโดยใช้ข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ และการประยุกต์ใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไม่ปลดโหลด จากวิธีการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเงื่อนไขการทำงาน

ทั้งนี้จากการศึกษาข้างต้นพบว่ากระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลดสามารถหาคำตอบที่มีค่าความคลาดเคลื่อนในระดับที่ยอมรับได้ โดยวิธีการที่มีความแม่นยำที่สุดคือ PSO และในการประยุกต์วิธีการดังกล่าวเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไม่ปลดโหลดหาคำตอบที่ค่าใกล้เคียงกับการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลลัพธ์ของการศึกษาวิจัย พบว่าการใช้กระบวนการทางปัญญาประดิษฐ์จะมีค่าความคลาดเคลื่อนแตกต่างกันในแต่ละกรณีศึกษา ในการพัฒนาวิธีการอาจทำได้โดยการผสมผสานปัญญาประดิษฐ์ที่มากกว่าหนึ่งประเภทในลักษณะไฮบริด (Hybrid) และในส่วนของการใช้เพื่อประเมินสมรรถนะและประสิทธิภาพของมอเตอร์นั้นสามารถให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพจริง โดยอาจเพิ่มเติมฐานข้อมูลค่าความสูญเสียทางกลและค่าความสูญเสียแบบสแตตของมอเตอร์แต่ละขนาดเพื่อให้เกิดความแม่นยำมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- ABB Technical note, “IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors”.
- Alonge F.; D’Ippolito, F.; Ferrante, G.; Raimondi, F. M. Parameter Identification of Induction Motor Model Using Genetic Algorithm. IEE Proc-Control Theory Appl., 1998, Vol. 145, No. 6, November, pp. 587-593.
- Anbal T. de Almeida, Fernando J. T. E. Ferreira and Joao A.C. Fong., “Standards for Super- Premium Efficiency Class for Electric Motors”, Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference - Conference Record 2009 IEEE, Calgary, AB, Canada, 3-7 May 2009.
- Aníbal T. De Almeida and Fernando J. T. E. Ferreira., “Technical and Economical Considerations on Super High-Efficiency Three-Phase Motors”, IEEE Transactions on industry applications, vol. 50, no. 2, March/April 2014.
- Avalos, O.; Cuevas, E.; Gálvez, J. Induction Motor Parameter Identification Using a Gravitational Search Algorithm. Computer, 2016 Vol.5 (6), pp.1-12.
- Bin Lu, Thomas G. Habetler, and Ronald G. Harley, “A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors,” IEEE Trans. Industry Application, VOL. 42, NO. 4, JULY/AUGUST, pp. 924-932, 2006.
- C.Picardi and N. Rogano, “Parameter Identification of Induction Motor Based on Particle Swarm Optimization,” in Proc. IEEE Power Electronic, Electrical Drives, Automation and Motion. SPEEDAM International Symposium., May, 2006, pp. 968–973.
- Canakoglu, A. I.; Yetgin, A. G.; Temurtas, H.; Turan, M. Induction motor parameter estimation using metaheuristic methods. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2014 Vol. 22, pp. 1177-1192.
- Conrad U. Brunner, Chris Evans, Rita Werle, “Standard Format for IEC Standards - Learning from motor standards for other electric equipment”, Electric Systems Motor Forum.

- D. E. BORGARD, G. OLSSON, and R. D. LORENZ, "Accuracy issues for parameter estimation of field oriented induction machine drives," IEEE Trans. Ind. Appl., 1995, 31, (4), pp. 795-801.
- Daniel Liang, "High efficiency motors: Standards and Solutions", International Copper Association, 7th Oct. 2015.
- Ed. 1: Rotating Electrical Machines—Part 30: Efficiency Classes of Single-Speed, Three-Phase, Cage-Induction Motors (IE-Code), IEC Std. 60034-30, 2008.
- 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.
- Gastli, "Identification of Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Using the Single phase Test," IEEE Transactions on Energy Conv., vol. 14, no. 1, pp. 51-56, March 1999.
- Hassan Farhan and et al., "Investigation of Induction Motor Parameter Identification Using Particle Swarm Optimization-Based RBF Neural Network (PSO-RBFNN)," International Journal of the Physical Sciences, vol. 6(19), pp. 4564-4570, September 2011.
- Hassan M. Emara, Wesam Elshamy and A. Bahgat, "Parameter identification of induction motor using modified Particle Swarm Optimization algorithm," in Proc. IEEE Industrial Electronics. ISIE International Symposium., June, 2008, pp. 841–847.
- Hassan M. Emara, Wesam Elshamy and A. Bahgat, "Parameter identification of induction motor using modified Particle Swarm Optimization algorithm," Proceeding of IEEE Industrial Electronics International Symposium (ISIE), June, 2008, pp. 841–847.
- I. Kostov, V. Spasov and V. Rangelova, "Application of Genetic Algorithms for Determining the Parameters of Induction Motors," Technical Gazette 16, 2(2009), pp. 49-53.
- IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112-2004, Nov. 2004.
- In-plant electric motor loading and efficiency techniques., Ontario Hydro, Toronto, ON, Canada, Market Literature.

- International Standard, Rotating Electrical Machines, IEC60034, 1999.
- J. D. Kueck, "Development of a method for estimating motor efficiency and analyzing motor condition," in Proc. IEEE Pulp and Paper Ind. Tech. Conf., Jun. 1998, pp. 67-72.
- J. D. Kueck, M. Olszewski, D. A. Casada, J. Hsu, P. J. Otaduy, and L. M. Tolbert, "Assessment of methods for estimating motor efficiency and load under field conditions," Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Laboratory Rep. ORNL/ TM-13165, 1996.
- J. R. Holmquist, J. A. Rooks, and M. E. Richter, "Practical approach for determining motor efficiency in the field using calculated and measured values," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 1, Jan./Feb. 2004, pp. 242-248.
- J. S. Hsu, and B. P. Scoggins, "Field Test of Motor Efficiency and Load Changes Through Air-gap Torque," IEEE Trans. Energy Conv., vol. 10, no. 3, pp. 471-477, Sept. 1995.
- 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 Appl., vol. 34, issue:1, pp. 117-125, Jan./Feb. 1998.
- Jangjit, S.; Laohachai, P. Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor by Using Genetic Algorithm. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2009, vol. 4, no. 3, pp. 360-364.
- K. S. Huang, Q. H. Wu, and D. R. Turner, "Effective Identification of Induction Motor Parameters Based on Fewer Measurements," IEEE Trans. Energy Conv., vol. 17, no. 1, pp. 55-60, March 2002.
- Kennedy, J.; Eberhart, R. Particle Swarm Optimization. Proceeding IEEE International Conference on Neural Networks, 1995, vol. IV, pp. 1942-1948.
- Kostov, I.; Spasov, V.; Rangelova, V. Application of Genetic Algorithms for Determining the Parameters of Induction Motors," Technical Gazette, 2009, Vol.16, 2, pp. 49-53.
- Manoharan SUBRAMANIAN, Ananthi KALIYAMOORTHYA, "Review On Efficiency Of Energy Efficient Motor Standards", Journal of Electrical Engineering.

- Mayank Pratap Singh, "Parameter Estimation of Three Phase Induction Motor: An Innovative Approach", Ph.D. Synopsis in the area of Electrical Machines., Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Dayalbagh Educational Institute, 2013.
- Motors and Generators, NEMA MG1-2003 Standard, 2003.
- N. Supakit, "Evolutionary Computation Between Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization." *Journal of Information Science and Technology*, vol. 2, no.2, Jul-Dec. 2011.
- Picardi, C.; Rogano, N. Parameter Identification of Induction Motor Based on Particle Swarm Optimization. *Proceeding of IEEE Power Electronic, Electrical Drives, Automation and Motion International Symposium (SPEEDAM)*, May, 2006, pp. 968–973.
- Rashag, H. F.; Koh, S. P.; Tiong, S. K.; Chong, K. H.; Abdalla, A. N. Investigation of induction motor parameter identification using particle swarm optimization-based RBF neural network (PSORBFNN). *International Journal of the Physical Sciences*, 2011, Vol. 6(19), 16 September, pp. 4564-4570.
- Reza Mohammadi, H.; Akhavan, A. Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor Using Hybrid of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization. *Journal of Engineering* 2014, pp.1-6.
- S. A. Ethni and et al., "Comparison of Particle Swarm and Simulated Annealing Algorithms for Induction Motor Fault Identification," in *Proc. IEEE Industrial Informatics. INDIN International Conference.*, June, 2009, pp. 470–474.
- S. I. MOON and A. KEYANY, "Estimation of induction machine parameters from standstill time-domain data," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1994, 30, (6), pp. 1609-1615.
- Sakthivel, V.P. ; Bhuvanneswari, R.; Subramanian, S. An Improved Particle Swarm Optimization for Induction Motor Parameter Determination. *International Journal of Computer Application*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 62-67. doi.org/10.5120/44-150
- T. Phumiphak and C. Chat-uthai, "Estimation of Induction Motor Parameters Based on Field Test Coupled with Genetic Algorithm." in *Proc. IEEE Power System Technology. PowerCon.*, vol.2, 2002, pp. 1199–1203.

- U.S. Department of Energy, “Determining Electric Motor Load and Efficiency,” Motor Challenge, DOE/GO-10097-517.
- V.P. Sakthivel, R. Bhuvaneswari and S. Subramanian, “An Improved Particle Swarm Optimization for Induction Motor Parameter Determination,” International Journal of Computer Application, vol. 1, no. 2, pp. 62-67, 2010.
- Vahideh Hayyolalam, Ali Asghar Pourhaji Kazem, Black Widow Optimization Algorithm: A novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 87 (2020) 103249.
- Wallance, A. Von Jouanne, E. Wiedenbrug, E. Matheson, and J. Douglass, “A laboratory assessment of in-service and non-intrusive motor efficiency testing methods,” Electr. Power Compon. Syst., vol. 29, no. 6, Jun. 2001, pp. 517–529
- Wengerkievicz, C. A. C. ; Elias, R. de A. ; Batistela, N. J. ; Sadowski, N.; Kuo-Peng, P.; Lima, S. C.; da Silva Jr., P. A.; Beltrame, A. Y. Estimation of Three-Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters from Manufacturer Catalog Data. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2017, Vol. 16, No. 1, March, pp. 90-107.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน สถานการณ์พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทย มกราคม-มิถุนายน 2560 เข้าถึงได้ที่ www.dede.go.th
- สถาบันพลังงานเพื่ออุตสาหกรรม สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย คู่มือการขึ้นทะเบียนเป็นบริษัทจัดการพลังงาน 2558
- องค์การภาคีด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม การอนุรักษ์พลังงานของมอเตอร์ เข้าถึงได้ที่ www.ienergyguru.com

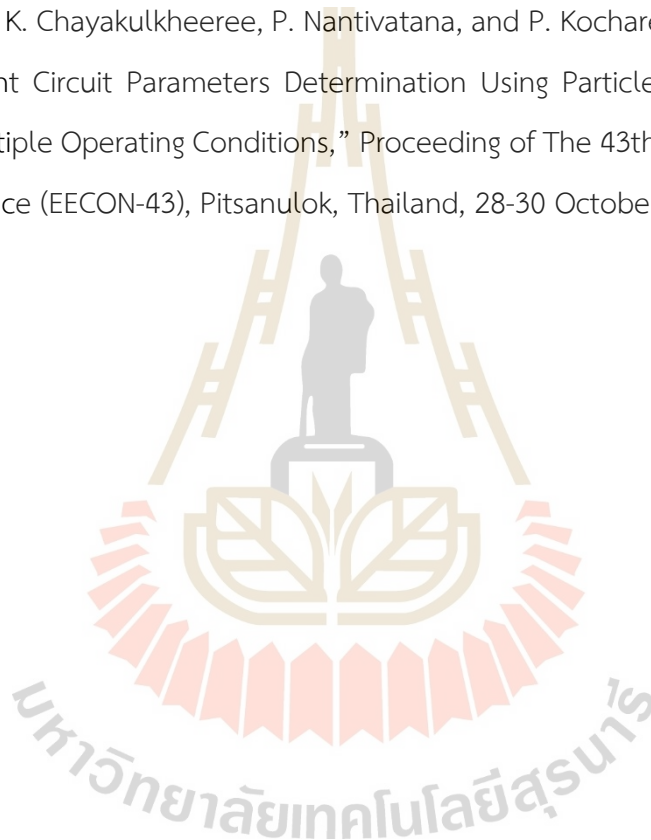


ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

1. T. Srited and K. Chayakulkheeree, "Induction Motor Efficiency Estimation Using Particle Swarm Optimization with Multiple Operating Conditions," The 2021 International Electrical Engineering Congress (iEECON2022), March 9-11, 2022, Khonkhan, THAILAND
2. T. Srited, K. Chayakulkheeree, P. Nantivatana, and P. Kochareon, "Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Determination Using Particle Swarm Optimization with Multiple Operating Conditions," Proceeding of The 43th Electrical Engineering Conference (EECON-43), Pitsanulok, Thailand, 28-30 October, 2020



Induction Motor Efficiency Estimation Using Particle Swarm Optimization with Multiple Operating Conditions

Tempong Srited

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
tempong@gmail.com

Keerati Chayakulkheeree

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
keerati.ch@sut.ac.th

Abstract—In this paper, the particle swarm optimization (PSO) based induction motor efficiency estimation (IMEE), using multiple operating conditions, is presented. The ECPs of induction motor are determined by PSO using the measurement voltage, current, real power, and power factor, at multiple operating points. Then, with standard value of stay, fiction and windage loss, the shaft-torque output power can be estimated. Therefore, the efficiency of motor can be determined without laboratory test. The method was investigated with different number of measurement data and compared to the laboratory test results. The proposed method is found to be applicable for IMEE using measurement data for several operating point.

Keywords—induction motor efficiency estimation, particle swarm optimization

I. INTRODUCTION

For induction motor efficiency determination, the most accepted standard laboratory test methods are IEEE-112 and IEC60034 [1,2]. However, under motor operation, the laboratory test procedure can not be applied. The efficiency test, especially for large motor, are, therefore, usually estimated on-site. As a result, in order to obtain the acceptable induction motor efficiency estimation (IMEE) during operating condition is, therefore, a useful information tool for energy conservation program and motor performance assessment.

The commonly used in-service motor's efficiency approximation methods are nameplate method (NM), slip method (SM), and current method (CM) [3]. due to they are the most convenience methods. However, those methods provide high error in motor efficiency estimations. Therefore, several methods were proposed [4-5]. Meanwhile, the motor equivalent circuit parameters can be used for motor efficiency estimation. Therefore, the artificial intelligent techniques were also applied to obtain the motor efficiency on-site, for example, induction motor parameters identification using genetic algorithm [6-8], particle swarm optimization (PSO) [9-10]. However, the accuracies of those methods are still under improving by many researchers.

This paper, therefore, the further development on the on-service IMEE using parameter estimation using multiple operation condition is presented. The PSO based induction motor equivalent circuit parameters estimation with multiple operating conditions has been developed and tested. The laboratory test data were used to verify the accuracy of the proposed method. The experimentation results of the proposed IMEE are compared to the laboratory test.

The organization of the paper is as follows. Section 2 address the methods for three-phase induction motor efficiency estimation using motor equivalent circuit. The development of PSO based IMEE, using multiple operating conditions, is discuss in Section 3. The experimentation results are illustrated in Section 4. Then, the conclusion is in Section 5.

II. INDUCTION MOTOR EQUIVALENT CIRCUIT AND EFFICIENCY

The well-known induction motor five parameters equivalent model can be illustrated as Fig. 1.

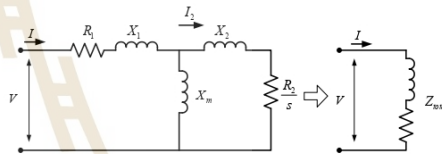


Fig. 1. The induction motor equivalent circuit

In Fig. 1., R_1 is the motor stator resistance (Ω), X_1 is the motor stator leakage reactance (Ω), X_m is the motor magnetizing reactance (Ω), R_2 is the motor rotor resistance (Ω), X_2 is the motor rotor leakage reactance (Ω), s is the rotor slip, I is the motor current (A), P is the motor real power (kW, W), V is the motor terminal voltage (V), and s is the motor slip.

The power output of induction motor can be computed by,

$$P_{out} = I_2^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) R_2 - P_{fw} - P_{stray} \quad (1)$$

where, P_{out} is the motor net output (kW, W), I_2 is the rotor current (A), P_{fw} is the motor fiction and windage loss (kW, W), and P_{stray} is the motor stray loss (kW, W).

Therefore, the motor efficiency can be calculated by,

$$\%Efficiency = \frac{P_{out}}{P} 100\% \quad (2)$$

The 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON2022), March 9 - 11, 2022, Khon Kaen, THAILAND

978-1-6654-0206-4/22/\$31.00 ©2022 IEEE

III. PSO BASED IMEE

In the proposed PSO based IMEE, the five parameters are estimated using PSO [11]. The input of the proposed IMEE are the measured I, P, V, s. The computation steps can be illustrated as follow,

Step 1: Initialize the set of particles as,

$$\mathbf{p}^{(m)} = [\rho_1^{(m)} \rho_2^{(m)} \rho_3^{(m)} \rho_4^{(m)} \rho_5^{(m)}] \quad (3)$$

where,

$\rho_1^{(m)}, \rho_2^{(m)}, \rho_3^{(m)}, \rho_4^{(m)}, \rho_5^{(m)}$ represent the parameters R_1, X_1, X_m, R_2, X_2 , respectively, for particle i of iteration m .

Step 2: Compute the equivalent impedance

$Z_{Total,k}^{meas} = R_{Total,k}^{meas} + jX_{Total,k}^{meas}$ for condition k from measuring data as,

$$Z_{Total,k}^{meas} = \frac{V_k^{meas}}{\sqrt{3} \cdot I_k^{meas}} \angle \cos^{-1}(PF_k^{meas}) \quad (4)$$

Step 3: Compute the equivalent impedance

$Z_{Total,k}^{i,cal} = R_{Total,k}^{i,cal} + jX_{Total,k}^{i,cal}$ (see Fig. 1) of each particle i for condition k .

Step 4: Compute the current of the equivalent circuit of individual particle i at the operating condition k as $I_k^{i,cal}$.

Step 5: Compute the evaluation function (EV) of each particle as,

$$EV = \sum_{k=1}^{NC} \left((I_k^{i,cal} - I_k^{meas})^2 + (R_{Total,k}^{i,cal} - R_{Total,k}^{meas})^2 + (X_{Total,k}^{i,cal} - X_{Total,k}^{meas})^2 \right) \quad (5)$$

where NC is a number of operating conditions.

Step 6: Obtain $pbest_j^{i(m)}$ as the particle that provide minimum EV of the particle i and $gbest_j^{i(m)}$ as the particle that provide minimum EV among all particles.

Step 7: Compute the particle velocities as,

$$\mathbf{v}^{i(m)} = [v_1^{i(m)} v_2^{i(m)} v_3^{i(m)} v_4^{i(m)} v_5^{i(m)}] \quad (6)$$

$$v_j^{i(m)} = w \cdot v_j^{i(m-1)} + C_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest_j^{i(m)} - \rho_j^{i(m)}) + \dots + C_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest_j^{i(m)} - \rho_j^{i(m)}) \quad (7)$$

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \cdot iter \quad (8)$$

where, $v_1^{i(m)}, v_2^{i(m)}, v_3^{i(m)}, v_4^{i(m)}, v_5^{i(m)}$ are the velocity for particle i of iteration m , C_1, C_2 are the constants acceleration factors, $rand_1$ and $rand_2$ are uniform random numbers, w is the weighting factor, w_{max} is the maximum value of weighting factor, w_{min} is the minimum value of weighting factor, $iter$ is the iteration number, and $iter_{max}$ is the maximum number of iteration.

Step 8: Update the particles by,

$$\mathbf{p}^{i(m+1)} = \mathbf{p}^{i(m)} + \mathbf{v}^{i(m)} \quad (9)$$

Step 9: If the iteration reaches the maximum iteration, stop. If the iteration does not reach the maximum iteration, go to Step 3.

IV. SIMULATION RESULTS

In this paper, the practical motor is used for testing the proposed method. The laboratory test result are as shown in Table I. The PSO parameter is as follows,

$$C_1 = 2.0, C_2 = 2.0$$

$$w_{max} = 0.9, w_{min} = 0.4$$

$$iter_{max} = 100, \text{Number of Population} = 1000.$$

The test data is obtained from the laboratory test of 30 kW motor which has been operated for more than five years. The motor specification is as follow.

- Rated Voltage 380 V
- Rated Current 56.8 A
- Rated Power Output 30 kW
- Power Factor 0.87 Lagging
- Speed at Rated 1470 RPM
- Number of pole 4 pole
- Efficiency 92.24 %

The selected conditions are 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% of full load condition, as shown in Tables I and II.

TABLE I LABORATORY TEST RESULT OF 30 KW MOTOR FOR ELECTRICAL MEASUREMENT THE ESTIMATED POWER

Load (%)	Voltage (V)	Current (A)	Power Factor Lagging	Power Input (kW)
50.00	376.00	33.40	0.75	16.53
60.00	375.00	41.10	0.76	19.90
70.00	373.00	44.60	0.84	24.28
80.00	373.00	49.20	0.84	26.84
90.00	373.00	53.20	0.87	29.83
100.00	373.00	57.40	0.88	32.59

TABLE II LABORATORY TEST RESULT OF 30 KW MOTOR FOR MECHANICAL MEASUREMENT

Torque (N.m)	Speed (RPM)	Slip (%)	Power Output (kW)	Test Efficiency (%)
95.10	1488.00	0.80	14.79	89.51
115.20	1486.00	0.93	17.89	89.89
141.10	1479.00	1.40	21.82	89.89
156.20	1478.00	1.47	24.13	89.90
173.20	1477.00	1.53	26.74	89.63
190.30	1476.00	1.60	29.35	90.06

The 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON2022), March 9 - 11, 2022, Khon Kaen, THAILAND

The estimated equivalent circuit parameters are shown in Table III. The estimated power output, and the estimated efficiencies of each condition are shown in Table IV, comparing to the measured values. The convergence plot of the proposed PSO based IMEE is shown in Fig. 2.

TABLE III. THE ESTIMATED EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS (Ω)

R_l	X_l	X_m	R_2	X_2
0.0001	0.0073	8.6069	0.0716	0.0002

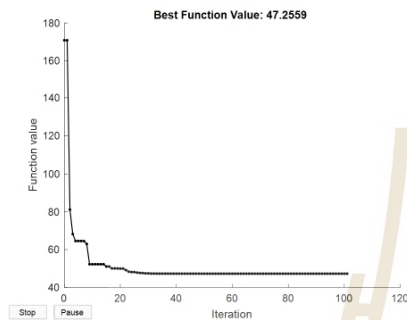


Fig. 2. The convergence plot of the proposed PSO based IMEE

TABLE IV. THE ESTIMATED POWER OUTPUT AND THE ESTIMATED EFFICIENCIES OF THE LABORATORY TEST RESULTS AND THE PROPOSED PSO BASED IMEE

Laboratory Test		PSO based IMEE (Proposed)	
Power Output (kW)	Efficiency (%)	Power Output (kW)	Efficiency (%)
14.79	89.51	14.14	83.96
17.89	89.89	16.57	85.89
21.82	89.89	25.27	89.73
24.13	89.90	26.60	90.09
26.74	89.63	27.77	90.35
29.35	90.06	29.04	90.64

As shown in Table IV, the proposed PSO based IMEE can estimate the power output and the efficiencies of the motor with the results close to the measuring value. The method can be applied for preliminary estimate the motor efficiencies and avoiding in motor interruption for laboratory test.

V. CONCLUSION

In this paper, the non-invasive on-service IMEE using PSO considering multiple operating condition was successfully developed and proposed. The proposed method can effectively be applied for the on-site IMEE during operation due to the input data requirement can be measured during motor operation at different operating points

REFERENCES

- [1] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112-2004, Nov. 2004.
- [2] International Standard, Rotating Electrical Machines, IEC60034, 1999.
- [3] U.S. Department of Energy, "Determining Electric Motor Load and Efficiency," Motor Challenge, DOE/GO-10097-517.
- [4] 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 Transaction on Industry Application, vol. 34, issue:1, pp. 117-125, Jan./Feb. 1998.
- [5] Bin Lu, Student Member, Thomas G. Habetler, and Ronald G. Harley, "A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors," IEEE Transaction on Industry Application, vol. 42, no. 4, July/Aug. 2006, pp. 924-932.
- [6] M. S. Aspalii, S. B. Shetagar, and S. F. Kodad, "Estimation of Induction Motor Field Efficiency for Energy Audit and Management Using Genetic Algorithm," 3rd International Conference on Sensing Technology, Nov. 30 – Dec. 3, 2008, Tainan, Taiwan. pp. 440-445.
- [7] S. Jangjit and P. Laohachai, "Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor by Using Genetic Algorithm," Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 4, no. 3, pp. 360-364, 2009.
- [8] I. Kostov, V. Spasov, and V. Rangelova, "Application of Genetic Algorithms for Determining the Parameters of Induction Motors," Technical Gazette, 16, 2(2009), pp. 49-53.
- [9] H. F. Rashag, S. P. Koh, S. K. Tiong, K. H. Chong1 and A. N. Abdalla, "Investigation of induction motor parameter identification using particle swarm optimization-based RBF neural network (PSORBFNN)," International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(19), 16 September, 2011, pp. 4564-4570.
- [10] K. Chayakulkheeree, V. Hengsitawath, and P. Nantivatana, "Particle Swarm Optimization Based Equivalent Circuit Estimation for On-Service Three-Phase Induction Motor Efficiency Assessment," Engineering Journal, Volume 21 Issue 6, Oct.2017, pp.101-110.
- [11] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", Proceeding IEEE International Conference on Neural Networks, vol.IV, pp.1942-1948, 1995.

BIOGRAPHY



Tempong Srited received his B.Eng. in EE from SPU in 1997. He is currently a graduate student at School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.

The 2022 International Electrical Engineering Congress (IEEECON2022), March 9 - 11, 2022, Khon Kaen, THAILAND



Keerati Chayakulkheeree received his B.Eng. in EE from KMITL in 1995, M.Eng. and D.Eng. degree in Electric Power System Management from AIT, in 1999 and 2004, respectively. He is currently an associate professor at School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.



The 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON2022), March 9 - 11, 2022, Khon Kaen, THAILAND

Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Determination Using Particle Swarm Optimization with Multiple Operating Conditions

Termpong Srited¹ Keerati Chayakulkheeree¹ Petch Nantivatana² and Preecha Kochareon³

¹School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

²Faculty of Digital Technology, Chitralada Technology Institute, Thailand

³Faculty of Industrial Technology, Chitralada Technology Institute, Thailand

Abstract

In this paper, a particle swarm optimization (PSO) based method for induction motor equivalent circuit parameters (ECPs) estimation, using multiple operating conditions, is presented. The ECPs of induction motor are estimated by particle swarm optimization (PSO) using the measurement data of voltage, current, real power, and power factor, at multiple operating points. The method was investigated with different number of measurement data and compared to the other optimization technique. The proposed method is found to be applicable for induction motor ECPs determination using measurement data for several operating point.

Keywords: induction motor equivalent circuit, particle swarm optimization

1. Introduction

The induction motor equivalent circuit parameters (ECPs) are the valuable information when analyze the machine performance and characteristic, both in steady-state and dynamic conditions. The induction motor ECPs data of large machines are usually provided by the manufacturer from laboratory test. However, these information is found to be difficult to be obtained for the medium and small induction motors and for the induction motors with long ages of operation. Therefore, the convenience method for determine the induction motor ECPs, especially during on-site operation is an interesting study and development.

In past decade, many researches proposed the method for determining induction motor ECPs using different techniques. For examples, in [1], the induction motor ECPs can be obtained from the manufacturer catalog data. However, the ECPs of the long ageing or re-winding motors may much differ from the manufacturer catalog. Accordingly, many researchers aimed at the ECPs estimation using artificial intelligent (AI) techniques with on-site measurable data [2-11]. For examples, the genetic algorithm (GA) based induction motor ECPs estimation were proposed in [2-4]. Meanwhile, in [5-8], the particle swarm optimization (PSO) based induction motor ECPs identification and its improvement were presented. Consequently, The earlier techniques for induction motor ECPs estimation focuses on using AI optimization techniques, for examples, hybrid GA-PSO

[9], meta-heuristic methods [10], gravitational search algorithm [11]. Therefore, the intelligent optimization techniques are founded to be interesting, convenience, and effective methods for induction motor ECPs determination, and still need improvement on the accuracy and applicability.

In the paper, an induction motor equivalent circuit parameter determination (ECPD) using PSO with multiple operating conditions (MOC) is proposed. The proposed method was tested with the 0.75 kW IM data with several operating condition. The error in ECPD by the proposed method is shown to be minimum comparing to the existing method. Moreover, the investigation on single, two, and three operating conditions are addressed and discussed.

The organization of this paper is as follows. This Section 1 is an introduction. Section 2 presents the IM's ECPs.

2. Induction Motor ECPs

The induction motor five parameters equivalent model, with negating magnetic core resistance, can be illustrated as Fig. 1.

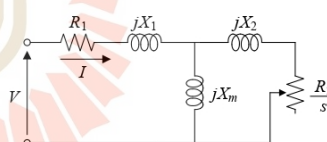


Fig. 1. The induction motor EC

The five ECPs, shown in Fig.1., are as follows:

- R_1 is the motor stator resistance (Ohm),
- X_1 is the motor stator leakage reactance (Ohm),
- X_m is the motor magnetizing reactance (Ohm),
- R_2 is the motor rotor resistance (Ohm),
- X_2 is the motor rotor leakage reactance (Ohm), and
- s is the rotor slip.

3. Induction Motor ECPD with MOC Using PSO Problem Formulation

In the proposed induction motor ECPD with MOC, the five parameters are estimated using PSO [12]. The motor ECPs are searched from values corresponding to the measurable variables, which are as follows,

- I is the motor current (A),
- P is the motor real power (W),
- PF is the motor power factor,
- V is the motor terminal voltage (V), and
- s is the motor slip.

Therefore, the input of the IM-ECPD are I , P , PF , V , s . The initial particle can be defined as [10],

$$\mathbf{P}^{(m)} = [\rho_1^{(m)}, \rho_2^{(m)}, \rho_3^{(m)}, \rho_4^{(m)}, \rho_5^{(m)}], \quad (1)$$

where, $\rho_1^{(m)}, \rho_2^{(m)}, \rho_3^{(m)}, \rho_4^{(m)}, \rho_5^{(m)}$ represent the parameters R_1, X_1, X_m, R_2, X_2 , respectively, for particle i of iteration m .

Therefore, the evaluation function (EV) of each particle can be computed as,

$$EV = \sum_{k=1}^{NC} \left(\frac{I_k^{cal}}{I_k^{meas}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{P_k^{cal}}{P_k^{meas}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{PF_k^{cal}}{PF_k^{meas}} - 1 \right)^2, \quad (2)$$

where, for each particle, I_k^{cal} is the calculated current of motor at the condition k (A), P_k^{cal} is the calculated real power of motor at the condition k (W), PF_k^{cal} is the calculated power factor of motor at the condition k , I_k^{meas} is the measured current of the motor at the condition k (A), P_k^{meas} is the measured real power of the motor at the condition k (W), PF_k^{meas} is the measured power factor of the motor at the condition k , and NC is a number of operating condition.

I_k^{cal} , P_k^{cal} , and PF_k^{cal} can be computed from each particle k and the measured voltage of the condition k (V_k^{meas}) and slip of the condition i (s_k^{meas}). Accordingly, the particle providing best EV represents the particle that most likely to be the actual motor ECPs. Then the velocity for updating each particle is computed by,

$$\mathbf{v}^{(m)} = [v_1^{(m)}, v_2^{(m)}, v_3^{(m)}, v_4^{(m)}, v_5^{(m)}], \quad (3)$$

$$v_j^{(m)} = w \cdot v_j^{(m-1)} + C_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest_j^{(m)} - \rho_j^{(m)}) + \dots + C_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest_j^{(m)} - \rho_j^{(m)}), \quad (4)$$

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \cdot iter, \quad (5)$$

where,

$v_1^{(m)}, v_2^{(m)}, v_3^{(m)}, v_4^{(m)}, v_5^{(m)}$ are the velocity for particle i of iteration m

C_1, C_2 are the constants acceleration factors,

$rand_1$ and $rand_2$ are uniform random numbers.

$pbest_j^{(m)}$ is the particle that provide minimum EV of the particle i .

$gbest_j^{(m)}$ is the particle that provide minimum EV among all particle.

w is the weighting factor,

w_{max} is the maximum value of weighting factor

w_{min} is the minimum value of weighting factor

$iter$ is the iteration number,

$iter_{max}$ is the maximum number of iteration,

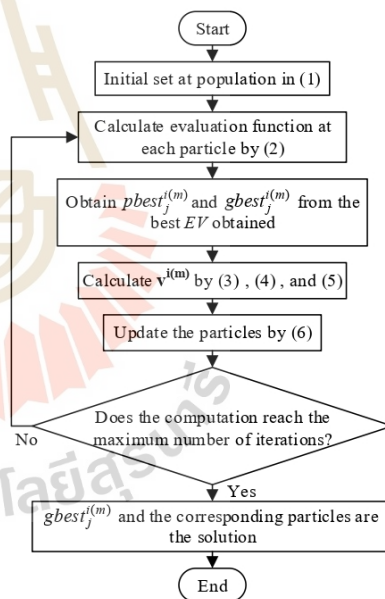


Fig. 2. Computational procedure of induction motor ECPD with MOC Using PSO

Afterwards, the particles are updated by,

$$p^{i(m+1)} = p^{i(m)} + v^{i(m)} \tag{6}$$

The computational procedure can be expressed as in Fig. 2.

4. Simulation Result of ECPE with MOC Using PSO

In this paper, the data of two poles, 380 V, 50 Hz, 0.75 kW, induction motor from [4] is used for testing the proposed method. The actual ECPs of the tested motor are as shown in Table 1. The simulated data with different operating condition are shown in Table 2. The PSO parameter is as follows,

- $C_1 = 2.0$
- $C_2 = 2.0$
- $w_{max} = 0.9$
- $w_{min} = 0.4$
- $iter_{max} = 100$
- Number of Population = 1000

Table 1. The ECPs of the 0.75 kW tested IM [4]

R_1 (Ohm)	X_1 (Ohm)	X_m (Ohm)	R_2 (Ohm)	X_2 (Ohm)
10.2	8.17	143.57	10.52	19.16

Table 2. Operating condition of the tested 0.75 kW IM

Condition	V (V)	s (%)	I (A)	P (W)	PF
1	380	0.06	1.8500	753.767	0.6188
2	380	0.10	2.3780	1152.700	0.7365
3	380	0.15	3.0482	1567.700	0.7814

With two condition data ECPs determination, in Table 4, the ECPs are closer to the actual values in both [4] and the proposed method. The proposed method resulted in the root mean square error of 0.46%, lower than that of GA in [4]. In addition, in Table 5, the result with three condition data is shown to be the minimum root mean square error when using the proposed method.

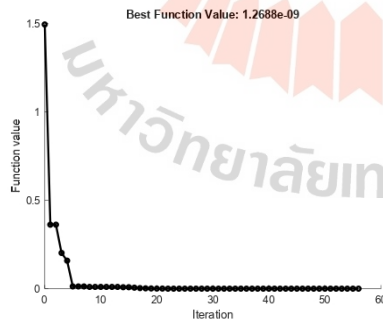


Fig.3. The PSO convergence of the proposed ECPD

The convergence characteristic of the ECPD using PSO can be illustrated in Fig.3. The induction motor ECPD results of the proposed method are shown in Table 3-5. In Table 3, the proposed MOC based ECPD using PSO resulted in the high error of ECPs, similarly to [4]. Even through the results of the proposed method provides the lower root mean square error, the obtained ECPs are not applicable due to the high value of errors.

Table 3. The Induction Motor ECPD results Using Single Condition Data

Actual Values (Ohm)	Single Condition				
	GA [4]		Proposed ECPD		%
	Ohm	%Error	Ohm	%Error	
R1	10.20	62.56	-513.33	63.9088	-526.56
X1	8.17	43.49	-432.31	7.2860	10.82
Xm	143.57	58.77	59.07	155.4168	-8.25
R2	10.52	11.02	-4.75	10.9593	-4.18
X2	19.16	101.98	-432.25	20.5440	-7.22
Root Mean Square Error			357.98		235.59

Table 4. The Induction Motor ECPD results Using Two Conditions Data

Actual Values (Ohm)	Two Conditions				
	GA [4]		Proposed ECPD		%
	Ohm	%Error	Ohm	%Error	
R1	10.20	10.54	-3.33	10.2000	0.00
X1	8.17	8.24	-0.86	8.2443	-0.91
Xm	143.57	142.73	0.59	143.4905	0.06
R2	10.52	10.47	0.48	10.5092	0.10
X2	19.16	19.32	-0.84	19.0676	0.48
Root Mean Square Error			1.62		0.46

Table 5. The Induction Motor ECPD results Using Three Conditions Data

Actual Values (Ohm)	Three Conditions				
	GA [4]		Proposed ECPD		%
	Ohm	%Error	Ohm	%Error	
R1	10.20	10.28	-0.78	10.2000	0.00
X1	8.17	8.19	-0.24	8.1785	-0.10
Xm	143.57	143.17	0.28	143.5553	0.01
R2	10.52	10.48	0.38	10.5189	0.01
X2	19.16	19.21	-0.26	19.1449	0.08
Root Mean Square Error			0.44		0.06

5. Conclusion

In this paper, a ECPD for induction motor with MOC using PSO was successfully determine the induction motor ECPs with the minimum root mean square error. The proposed method can effectively be applied for the

on-site motor ECPD during operation due to the data requirement for ECPD are the measurement of voltage, slip, current, real power, and power factor, at different operating points.

References

- [1] C. A. C. Wengerkievicz, R. de A Elias, N. J. Batistela, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, S. C. Lima, P. A. da Silva Jr., and A. Y. Beltrame, "Estimation of Three-Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters from Manufacturer Catalog Data," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 16, No. 1, March, pp. 90-107, 2017.
- [2] F. Alonge, F. D'Ippolito, G. Ferrante, and F. M. Raimondi, "Parameter Identification of Induction Motor Model Using Genetic Algorithm," *IEE Proc-Control Theory Appl.*, Vol. 145, No. 6, November, pp. 587-593, 1998.
- [3] S. Jangjit and P. Laohachai, "Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor by Using Genetic Algorithm," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 360-364, 2009.
- [4] I. Kostov, V. Spasov and V. Rangelova "Application of Genetic Algorithms for Determining the Parameters of Induction Motors," *Technical Gazette*, Vol.16, 2, pp. 49-53, 2009.
- [5] M. E. Hassan, E. Wesam, and A. Bahgat, "Parameter identification of induction motor using modified Particle Swarm Optimization algorithm," *Proceeding of IEEE Industrial Electronics International Symposium (ISIE)*, June, pp. 841-847, 2008.
- [6] H. F. Rashag, S. P. Koh, S. K. Tiong, K. H. Chong, and A. N. Abdalla, "Investigation of induction motor parameter identification using particle swarm optimization-based RBF neural network (PSORBFNN)," *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6(19), 16 September, pp. 4564-4570, 2011.
- [7] V.P. Sakthivel, R. Bhuvaneswari and S. Subramanian, "An Improved Particle Swarm Optimization for Induction Motor Parameter Determination", *International Journal of Computer Application*, vol. 1, no. 2, pp. 62-67. doi.org/10.5120/44-150, 2010.
- [8] C. Picardi and N. Rogano, "Parameter Identification of Induction Motor Based on Particle Swarm Optimization", *Proceeding of IEEE Power Electronic, Electrical Drives, Automation and Motion International Symposium (SPEEDAM)*, May, pp. 968-973, 2006.
- [9] H. Reza Mohammadi and A. Akhavan, "Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor Using Hybrid of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization," *Journal of Engineering*, pp.1-6, 2014.
- [10] A. I. Canakoglu, A. G. Yetgin, H. Temurtas and M. Turan, "Induction motor parameter estimation using metaheuristic methods," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 22, pp. 1177-1192, 2014.
- [11] O. Avalos, E. Cuevas and J. Gálvez, "Induction Motor Parameter Identification Using a Gravitational Search Algorithm," *Computer*, Vol.5 (6), pp.1-12, 2016.
- [12] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," *Proceeding IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. IV, pp. 1942-1948, 1995.

Biography



Termpong Srited received his B.Eng. in EE from SPU in 1997. He is currently a graduate student at School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.



Keerati Chayakulkheeree received his B.Eng. in EE from KMITL in 1995, M.Eng. and D.Eng. degree in Electric Power System Management from AIT, in 1999 and 2004, respectively. He is currently an associate professor at School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.



Petch Nantivatana received his B.Eng. in Electrical Engineering from SPU in 2001, and M.Eng. in Electronic Engineering from KMITL in 2006. He is currently an assistant professor at Faculty of Digital Technology, Chitralada Technology Institute, Thailand.



Preecha Kocharean received his B.Eng. in Electrical Engineering from SPU in 1997, M.Sc. in Communication Engineering from UMIST in 1999 and D.Eng. in Telecommunication AIT in 2005. He is currently an associate professor at Faculty of Industrial Technology, Chitralada Technology Institute, Thailand.

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบวิธีการในวิทยานิพนธ์กับมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ



ผลการทดสอบวิธีการในวิทยานิพนธ์กับมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 25%

R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
2.1306	2.1306	1.4604	4.1234	67.6786
2.3422	2.3422	1.4637	4.5953	67.5104
2.2321	2.2321	1.4616	3.0604	67.2643
2.2687	2.2687	1.4578	4.2861	67.4528
2.1677	2.6147	1.4577	3.5403	67.4245
2.2908	2.4582	1.4685	4.0567	67.5360
2.1398	2.2968	1.4708	3.4231	67.6574
2.2562	2.6349	1.4596	3.9199	67.4102
2.2802	2.3524	1.4729	3.9716	67.6036
2.2785	2.5334	1.4650	3.7571	67.7352
2.1479	2.4759	1.4626	4.3109	67.7352
2.1873	2.3876	1.4682	3.8775	67.6520
2.2321	2.3514	1.4712	4.1161	67.6895
2.1962	2.3765	1.4689	4.0012	67.6808
2.1941	2.3837	1.4685	4.0035	67.6784
2.4662	2.1824	1.4873	3.5961	67.4471
2.3256	2.6654	1.4609	3.5682	67.2301
2.3049	2.3450	1.4741	3.9064	67.5676
2.3791	2.3535	1.4760	4.5285	67.6383
2.2693	2.6685	1.4588	3.5720	67.2872
2.2130	2.3592	1.4704	3.7599	67.6174
2.3293	2.7924	1.4555	3.4670	67.1087
2.1729	2.5096	1.4620	4.3280	67.6886
2.2187	2.5594	1.4613	4.4981	67.6461
2.2876	2.7208	1.4565	4.5908	67.4796

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 25% (ต่อ)

R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
2.1910	2.4892	1.4638	3.8364	67.5641
2.1701	2.3684	1.4680	3.7450	67.6516
2.3294	2.6460	1.4617	3.9083	67.3229
2.0785	2.3989	1.4638	4.0182	67.7920
2.3418	2.5203	1.4673	4.3970	67.5200

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 50%

R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
2.1765	2.4797	1.4942	3.9359	69.1238
2.3129	2.9590	1.4745	3.3492	68.3419
2.1332	2.5607	1.4890	4.4924	69.6488
2.2780	2.7235	1.4839	3.8863	68.8655
2.2977	2.3479	1.5007	4.1342	69.0672
2.1154	2.4757	1.4931	4.3142	69.5450
2.2542	2.5990	1.4890	4.0778	69.0776
2.1576	2.3872	1.4977	4.2190	69.3961
2.2455	2.5378	1.4909	4.4707	69.4170
2.1189	2.5085	1.4925	3.8880	69.1914
2.2801	2.6838	1.4869	3.2388	68.3509
2.1790	2.2942	1.5012	4.5957	69.6667
2.0359	2.5724	1.4881	4.3607	69.7276
2.3096	2.1879	1.5087	3.8494	68.8414
2.1467	2.7699	1.4801	4.3102	69.4575
2.2288	2.5653	1.4911	3.7066	68.8324
2.1710	2.2757	1.5050	3.2699	68.5507
2.0826	2.3789	1.4975	4.2176	69.5386
2.2968	2.3301	1.5014	4.1751	69.1034
2.3201	2.5487	1.4915	4.222	69.0732

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 50% (ต่อ)

R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
2.3234	2.4275	1.4967	4.4082	69.2279
2.3843	2.5229	1.4929	4.3349	69.0438
2.1474	2.3706	1.4990	3.9085	69.1692
2.2389	2.5836	1.4903	3.7479	68.8442
2.1055	2.6198	1.4869	4.1422	69.4115
2.3275	2.6111	1.4891	4.0157	68.8873
2.1961	2.2581	1.5044	3.9236	69.1029
2.3457	2.7582	1.4824	4.1229	68.9239
2.1891	2.4117	1.4957	4.6926	69.7159
2.1602	2.3596	1.4991	4.1317	69.3241

ตารางที่ ข.3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 75%

R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
2.2826	2.5575	1.5410	3.4905	68.8454
2.1742	2.6640	1.5328	4.3960	70.8437
2.2957	3	1.5197	3.4176	69.0814
2.2854	2.4323	1.5477	3.3420	68.4818
2.2129	2.4384	1.5486	3.1647	68.3886
2.2571	2.8463	1.5235	4.3315	70.6791
2.3123	2.4918	1.5418	4.0257	69.6227
2.2232	2.4667	1.5444	3.8781	69.5920
2.2425	2.3045	1.5503	4.3132	70.1411
2.2852	2.3012	1.5498	4.3639	70.1063
2.2527	2.5687	1.5381	4.1072	70.0063
2.0793	2.4652	1.5438	4.3134	70.7618
2.2444	2.5417	1.5386	4.3101	70.3629
2.3063	2.5129	1.5405	4.0842	69.7611
2.2781	2.1931	1.5605	3.0785	67.8814

ตารางที่ ข.3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 75% (ต่อ)

R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
2.2569	2.6573	1.5367	3.3974	68.8444
2.2186	2.1981	1.5574	3.9529	69.4898
2.4267	2.6584	1.5329	3.9635	69.3509
2.2273	2.8981	1.5211	4.3673	70.8868
2.3683	2.6630	1.5313	4.3583	70.2185
2.3774	2.4970	1.5402	4.1955	69.7406
2.2420	2.5372	1.5367	4.7281	71.1198
2.0556	2.2775	1.5551	3.8892	69.9037
2.2456	2.3102	1.5525	3.7329	69.1422
2.2720	2.268	1.5520	4.2842	69.9732
2.2151	2.3617	1.5480	4.2509	70.1644
2.2362	2.5892	1.5374	4.0684	70.0042
2.1547	2.666	1.5369	3.4803	69.2763
2.2984	2.153	1.5588	4.0031	69.3149
2.2177	2.1875	1.5575	4.0526	69.6523

ตารางที่ ข.4 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 100%

R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
2.1103	2.1693	1.5885	3.5875	68.9130
2.3403	2.4417	1.5660	3.9547	69.8366
2.3434	2.2163	1.5787	3.8820	69.0509
2.1891	2.7604	1.5532	3.8676	70.9554
2.3236	2.6819	1.5533	3.9848	70.6153
2.1712	2.5540	1.5609	4.3016	71.9120
2.1576	2.4849	1.5616	4.6638	73.0087
2.1955	2.2725	1.5709	4.7958	72.6987
2.2702	2.5177	1.5616	4.1821	71.0315
2.2050	2.3383	1.5738	4.0446	70.3709

ตารางที่ ข.4 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ จุดการทำงาน 100% (ต่อ)

R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
2.1564	2.5461	1.5588	4.6140	73.0190
2.3894	2.4316	1.5652	3.9931	69.7469
2.4054	2.3989	1.5605	4.6835	71.8464
2.1508	2.4833	1.5704	3.6425	69.6719
2.1948	2.5597	1.5628	3.9777	70.7648
2.2273	2.7154	1.5523	4.1549	71.6450
2.2859	2.4843	1.5646	3.9992	70.2915
2.2051	2.7110	1.5562	3.7657	70.4309
2.2459	2.2879	1.5786	3.6607	68.9099
2.2918	2.4503	1.5733	3	67.1622
2.2984	2.5381	1.5586	4.3370	71.4900
2.2078	2.2833	1.5805	3.5496	68.7053
2.3668	2.6143	1.5533	4.3018	71.3153
2.3729	2.3338	1.5693	4.1739	70.1331
2.2792	2.3596	1.5767	3.2789	67.8189
2.3033	2.6593	1.5555	3.9215	70.4275
2.2408	2.5399	1.5562	4.7202	73.0341
2.3119	2.3364	1.5679	4.4741	71.3427
2.2088	2.7533	1.5519	4.0181	71.3610
2.3443	2.3929	1.5725	3.4267	68.0925

ตารางที่ ข.5 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ 4 จุดการทำงาน
(25%, 50%, 75% และ 100%)

R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
2.5	2.7177	1.5082	3.4368	67.9495
2.5	2.6743	1.5101	3.4847	67.9930
2.5	2.5903	1.5138	3.5773	68.0769
2.5	2.1468	1.5336	4.0706	68.5205

ตารางที่ ข.5 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ 4 จุดการทำงาน
(25%, 50%, 75% และ 100%)

R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
2.5	2.6028	1.5133	3.5636	68.0645
2.5	2.1204	1.5348	4.1001	68.5468
2.5	2.6038	1.5133	3.5625	68.0634
2.5	2.4098	1.5219	3.7773	68.2574
2.5	2.3032	1.5266	3.8959	68.3641
2.5	2.3168	1.5260	3.8808	68.3505
2.5	2.5812	1.5143	3.5875	68.0861
2.5	2.8512	1.5023	3.2901	67.8160
2.5	2.3263	1.5256	3.8702	68.3410
2.5	2.5801	1.5143	3.5886	68.0871
2.5	2.7951	1.5048	3.3517	67.8722
2.5	2.3094	1.5264	3.8890	68.3579
2.5	2.1595	1.5331	4.0563	68.5078
2.5	2.4665	1.5194	3.7145	68.2008
2.5	2.2638	1.5284	3.9398	68.4034
2.5	2.5023	1.5178	3.6747	68.1649
2.5	2.5116	1.5174	3.6644	68.1556
2.5	2.5721	1.5147	3.5975	68.0951
2.5	2.4318	1.5209	3.7530	68.2355
2.5	2.4751	1.5190	3.7049	68.1922
2.5	2.2188	1.5344	4.0907	68.5385
2.5	2.4029	1.5222	3.7850	68.2644
2.5	2.3362	1.5252	3.8592	68.3311
2.5	2.6203	1.5125	3.5443	68.0470
2.5	2.4687	1.5193	3.7119	68.1985
2.5	2.7134	1.5084	3.4416	67.9539

ประวัติผู้เขียน

นายเต็มพงษ์ ศรีเทศ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม เมื่อ พ.ศ. 2540 และบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาการบริหารลอจิสติกส์และโซ่อุปทาน เมื่อ พ.ศ. 2552 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม มีความสนใจงานวิจัยทางด้านมอเตอร์เหนี่ยวนำ การพัฒนาระบบสมองกลฝังตัว อุปกรณ์เครือข่ายที่สามารถเชื่อมโยงข้อมูล การเก็บบันทึกข้อมูล วิเคราะห์ผล การเฝ้าระวัง และแจ้งเตือนเหตุต่างๆ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี