



การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะใช้งานด้วยการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง

In-Service Induction Motor Efficiency Estimation using Adaptive Bacteria Foraging Optimization

ณัฐดนัย เลิศขมภู¹ กิตติพงศ์ ตันเมือง¹ อนุสรณ์ ยอดใจเพชร¹ และวิวัฒน์ ทิพจร^{1*}

Received: December, 2016; Accepted: September, 2017

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานเพื่อทดแทนการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ต้องหยุดหรือถอดมอเตอร์ออกจากระบบบริการ เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเองถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาประสิทธิภาพโดยใช้ข้อมูลจากการวัดแรงดัน กระแส และกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน มอเตอร์ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นทั้งแบบจำลองมอเตอร์ในคอมพิวเตอร์ และมอเตอร์จริง ผลการทดลองพบว่าการประเมินประสิทธิภาพด้วยเทคนิคการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเองมีการลู่เข้าหาคำตอบได้ดีกว่าการหาอาหารของแบคทีเรียแบบเดิม และได้ผลใกล้เคียงกับวิธีวัดแรงบิดที่เพลากว่าวิธีวงจรมุมและวิธีสลิปความผิดพลาดเฉลี่ยจากการทดสอบแบบจำลองมอเตอร์เท่ากับ 1.78 % และมอเตอร์จริงเท่ากับ 3.4 %

คำสำคัญ : เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด; การประเมินประสิทธิภาพ; มอเตอร์ขณะใช้งาน; ขั้นตอนวิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangrai

* Corresponding Author E - mail Address: wiwat@rmutl.ac.th

Abstract

This paper proposes efficiency estimation of in-service induction motor to replace the efficiency estimation that required to stop or remove them from service. Adaptive bacteria foraging optimization technique is applied to estimate the efficiency using data from measuring electrical voltage, current, and power that supply to the induction motor during operation. The selected motors for evaluation are the motor model in computer and the actual motor. The test results showed that the efficiency estimation of the adaptive bacteria foraging optimization technique convergence is better result than original bacteria foraging optimization and this result is close to the shaft torque method than the equivalent circuit method and the slip method. The average error from the test of the motor model is 1.78 % and the actual motor is 3.4 %.

Keywords: Optimization Technique; Efficiency Estimation; In-Service Motor; Bacteria Foraging Algorithm

บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเพราะมีความทนทาน สามารถใช้งานได้นาน ทำให้มอเตอร์เหล่านี้มีสัดส่วนในการใช้พลังงานไฟฟ้าสองในสามของระบบการผลิตไฟฟ้า [1] แต่เมื่อมอเตอร์ติดตั้งใช้งานเป็นเวลานานประสิทธิภาพอาจลดลงทำให้ใช้ไฟฟ้ามากเกินความจำเป็น ดังนั้นต้องมีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์แต่ละตัวเพื่อเป็นข้อกำหนดวิธีการจัดการพลังงานให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

โดยทั่วไปแล้ววิธีการหาค่าประสิทธิภาพที่มีความแม่นยำ จำเป็นต้องกระทำในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบภาระทางกล (Load test) หรือการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล (No-load and blocked-rotor tests) จะเห็นได้ว่าวิธีการเหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้กับมอเตอร์ที่จำเป็นต้องอยู่ในระบบการให้บริการตลอดเวลา [2] ที่ผ่านมามีการสำรวจวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์มากกว่า 20 แบบ โดยแบ่งระดับการรบกวนมอเตอร์และความแม่นยำในการหาประสิทธิภาพมอเตอร์ พบว่าวิธีวัดแรงบิดที่เพลา (Shaft torque method) มีความแม่นยำสูงที่สุด แต่มีการรบกวนมอเตอร์สูง ส่วนวิธีที่เรียบง่าย เช่น การประเมินประสิทธิภาพจากป้ายข้อมูล (Nameplate method) วิธีสลิป (Slip method) วิธีวัดกระแสไฟฟ้า (Current method) มีระดับการรบกวนมอเตอร์ต่ำ แต่ให้ความถูกต้องในระดับต่ำด้วย [3]

วิธีการหาประสิทธิภาพขณะทำงานโดยใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์ (Equivalent circuit method) เป็นวิธีหนึ่งที่นำมาใช้งานมาก [4] หลายปีที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากนำเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดทางวงจรสมมูลและประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน ซึ่งวิธีการที่สะดวกและประหยัด โดยการใช้การพิจารณาข้อมูลทางไฟฟ้าจากการวัดร่วมกับเทคนิคปัญญาเชิงคำนวณ (Computational intelligence)

การใช้เทคนิคปัญญาเชิงคำนวณมีหลากหลายวิธี เริ่มแรกนิยมใช้วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) เช่น การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์พัฒนาของอากาศยานในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินโดยใช้การพิจารณาข้อมูลทางไฟฟ้าจากการวัดร่วมกับการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม [2] พบว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่ระบุข้อบกพร่องบางอย่างของวิธีการเชิงพันธุกรรมคือ การกำหนดพารามิเตอร์ และการลู่เข้าก่อนกำหนดทำให้ลดประสิทธิภาพในการค้นหา [5]

ต่อมามีการนำเสนอการใช้วิธีปัญญาเชิงคำนวณหลายวิธี วิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย (Bacteria foraging algorithm) เป็นวิธีการหนึ่งที่มีความสนใจในการประมาณค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยมีรายงานงานวิจัยที่พบว่าวิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle swarm) และวิธีระบบภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ (Artificial immune system) [4] อย่างไรก็ตามวิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย ยังมีข้อบกพร่องบางอย่างและได้มีการนำเสนอการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพ โดยเรียกว่าวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง (Adaptive bacterial foraging) พบว่าสามารถลู่เข้าหาค่าตอบที่แม่นยำขึ้น [6]

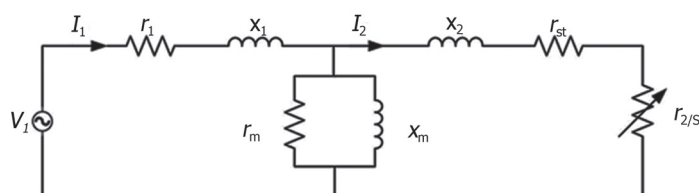
บทความนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าขณะใช้งาน โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง ทดสอบกับแบบจำลองมอเตอร์ในคอมพิวเตอร์และมอเตอร์จริงในห้องทดลอง เปรียบเทียบกับวิธีการประเมินประสิทธิภาพจากวิธีสลิปวิธีวงจรสมมูลของมอเตอร์ และวิธีวัดแรงบิดที่เพล

วิธีดำเนินการ

การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน ใช้วิธีการวัดความเร็วรอบ แรงดัน กระแส และกำลังงานขาเข้าของมอเตอร์ โดยใช้ข้อมูลจากการวัดเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมเพื่อนำมาคำนวณหาลำดับงานขาออก ดังนั้นทำให้ทราบประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยไม่ต้องถอดมอเตอร์ออกจากการใช้งาน ในข้อ 1 - 4 ได้อธิบายถึงรูปแบบวงจรสมมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้และเทคนิคการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีการหาอาหารของเชื้อแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง

1. วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์ คือ พารามิเตอร์ในสภาวะคงตัวต่อเฟสที่มีความต้านทานของการสูญเสียเนื่องจากภาระการใช้รวมอยู่ด้วย [1] แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

โดยที่

- r_1 คือ ความต้านทานขดลวดด้านสเตเตอร์
 x_m คือ ความต้านทานเหนี่ยวนำในแกนเหล็ก
 r_2 คือ ความต้านทานขดลวดด้านโรเตอร์
 r_m คือ ความต้านทานในแกนเหล็ก
 x_1 คือ ความต้านทานเหนี่ยวนำด้านสเตเตอร์
 r_{st} คือ ความต้านทานจากภาระการใช้งาน
 x_2 คือ ความต้านทานเหนี่ยวนำด้านโรเตอร์
 V_1 คือ แรงดันต่อเฟสที่ป้อนเข้ามอเตอร์
 I_1 คือ กระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์
 I_2 คือ กระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์

จากรูปที่ 1 สามารถหาค่าแอดมิตแตนซ์ส่วนต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (1) - (3)

$$Y_1 = \frac{1}{r_1 + jx_1} \quad (1)$$

$$Y_2 = \frac{1}{r_2 / s + jx_2 + r_{st}} \quad (2)$$

$$Y_m = \frac{1}{r_m} + \frac{1}{jx_m} \quad (3)$$

เมื่อ Y_1 และ Y_2 คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ ตามลำดับ Y_m คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ความสูญเสียที่แกนเหล็ก และ S คือ สลิปของมอเตอร์ จากค่าแอดมิตแตนซ์ต่าง ๆ สามารถหาค่ากระแสสเตเตอร์ I_{e1} จากสมการที่ (4) ตัวอักษรท้อย e หมายถึง ค่าจากการประมาณหรือจากการคำนวณ กระแสโรเตอร์และกระแสความสูญเสียจากแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) - (6)

$$I_{1e} = \frac{V_1 Y_1 (Y_2 + Y_m)}{Y_1 + Y_2 + Y_m} \quad (4)$$

$$I_{2e} = \frac{V_1 Y_1 Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_m} \quad (5)$$

$$I_{me} = \frac{V_1 Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_m} \quad (6)$$

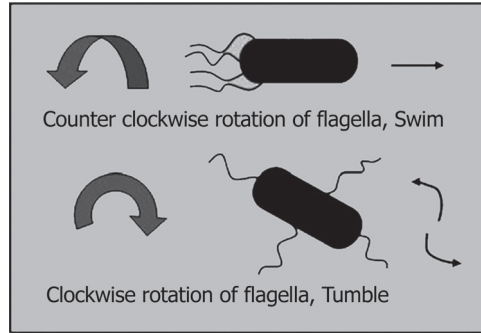
กำลังงานขาเข้า (P_{ine}) และกำลังงานขาออก (P_{out}) คำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η_e) คือ สัดส่วนระหว่างกำลังงานขาเข้าและกำลังงานขาออกคำนวณจากสมการที่ (9)

$$P_{ine} = 3 \left[|I_{1e}|^2 r_1 + |I_{2e}|^2 \left[\frac{r_2}{s} + r_{st} \right] + |I_{me}|^2 r_m \right] \quad (7)$$

$$P_{oute} = 3 |I_{2e}|^2 r_2 \left[\frac{1-s}{s} - P_{fw} \right] \quad (8)$$

$$\eta_e(\%) = \frac{P_{oute}}{P_{ine}} \times 100 \quad (9)$$

2. ขั้นตอนวิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย (Bacteria foraging algorithm)



รูปที่ 2 การหาอาหารของแบคทีเรีย แบบการว่ายน้ำ (Swim) และการหมุน (Tumble) [1]

ขั้นตอนวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียเป็นวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากการหาอาหารของแบคทีเรีย อีโคไล (E. coli) แบคทีเรียชนิดนี้มีการเคลื่อนที่ด้วยการหมุนฟลาเจลลา (Flagella) ที่เป็นเส้นคล้ายหนวดอยู่รอบเซลล์ การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเรียกว่า การว่ายน้ำ (Swim) และการเปลี่ยนทิศทางเรียกว่า การหมุน (Tumble) การว่ายน้ำและการหมุนนี้ทำให้แบคทีเรียสามารถหาอาหารแบบสุ่ม แบคทีเรียเซลล์ที่เข้าใกล้แหล่งอาหารจะแข็งแรงและสามารถแพร่พันธุ์หรือสืบพันธุ์เพื่อเพิ่มประชากรแบคทีเรีย ส่วนเซลล์ที่ไกลจากแหล่งอาหารเป็นเซลล์ที่อ่อนแอทำให้มีโอกาสตายในที่สุด ขั้นตอนการหาอาหารของแบคทีเรียมีขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน [6] คือ

2.1 การคีโมแทกซิส (Chemo taxis)

การเคลื่อนที่ไปในทิศทางแบบสุ่มเรียกว่า การหมุน (Tumble) และการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดิมเรียกว่า การว่ายน้ำ (Swim) ถ้ากำหนดให้ θ^i เป็นแบคทีเรียตัวที่ i ในรอบการคีโมที่ j แบคทีเรียจะเคลื่อนที่ไปด้วยสมการที่ (10)

$$\theta^i(j+1) = \theta^i(j) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \quad (10)$$

เมื่อ $C(i)$ คือ ความยาวของการเคลื่อนที่ และ $\Delta(i)$ เป็นเวกเตอร์ทิศทางของการคีโม หากแบคทีเรียว่ายน้ำ $\Delta(i)$ จะเท่ากับเวกเตอร์ของการคีโมรอบก่อนหน้า แต่หากแบคทีเรียหมุน $\Delta(i)$ จะเท่ากับเวกเตอร์ที่สุ่มในขอบเขต $[-1, 1]$ ในแต่ละขั้นตอนการว่ายน้ำหรือการหมุนนั้นมีการคำนวณค่าความเหมาะสม (Fitness value) เรียกว่า ความเหมาะสมช่วงก้าว (Fitness step)

2.2 การสืบพันธุ์ (Reproduction)

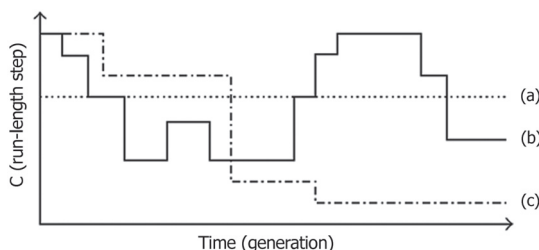
เมื่อผ่านขั้นตอนการคัดเลือกค่าความเหมาะสมช่วงก้าวของแบคทีเรียจะถูกนำมาบวกรวมกันเพื่อระบุค่าความแข็งแรงของแบคทีเรียแต่ละเซลล์ แล้วนำค่าความแข็งแรงมาเรียงลำดับ แบคทีเรียที่อ่อนแอครึ่งหนึ่งของแบคทีเรียทั้งหมดจะถูกกำจัด เหลือเฉพาะเซลล์ที่แข็งแรงซึ่งจะแบ่งตัวออกเป็นสองเซลล์เพื่อให้ได้ประชากรเท่าเดิม

2.3 การกำจัดและการแพร่กระจาย (Elimination and dispersal)

ขั้นตอนการคัดเลือกเป็นการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) และขั้นตอนการสืบพันธุ์ช่วยให้การลู่เข้าหาคำตอบได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียอาจติดอยู่ใกล้ ๆ กับจุดเริ่มต้น หรืออาจได้คำตอบที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง (Local Optimum) ซึ่งไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมโดยรวม (Global Optimum) ดังนั้นเพื่อให้แบคทีเรียกระจายตัวมากขึ้นหลังจากขั้นตอนการสืบพันธุ์ จึงต้องมีการกำจัดแบคทีเรียจำนวนหนึ่งและแทนที่ด้วยแบคทีเรียที่อยู่ตำแหน่งอื่น

3. การหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง (Adaptive bacterial foraging)

ถึงแม้ว่าขั้นตอนวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียถูกนำมาใช้ในงานทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลายแต่ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน วิธีการนี้ยังมีปัญหาในการลู่เข้าคำตอบไม่ดีนักเมื่อเทียบกับวิธีการที่มาจากแรงจูงใจจากธรรมชาติอื่น ๆ ดังนั้น Chen, H. et al. [6] ได้คิดค้นการปรับความยาวของการเคลื่อนที่หรือ $C(i)$ เรียกว่า การหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง (Adaptive bacterial foraging optimization: ABFO)



รูปที่ 3 แนวคิดการปรับความยาวของการเคลื่อนที่ [6]

แนวคิดของ ABFO แสดงในรูปที่ 3 เห็นได้ว่า BFO แบบดั้งเดิมแสดงด้วยเส้น (a) พารามิเตอร์ $C(i)$ ถูกกำหนดโดยค่าเริ่มต้นและใช้ค่านี้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งหากกำหนดค่า $C(i)$ ยาวมีข้อดีคือสามารถหาอาหารได้เร็วแต่อาจข้ามจุดที่ต้องการ แต่หากกำหนดสั้นเกินไปก็ทำให้การลู่เข้าได้ช้า Chen, H. et al. [6] จึงได้เสนอการปรับพารามิเตอร์ 2 แบบ คือ การปรับตัวไดนามิก (Dynamic adaptation: ABFO₀) และการปรับตัวไดนามิกด้วยตัวเอง (Dynamic self-adaptation: ABFO₁)

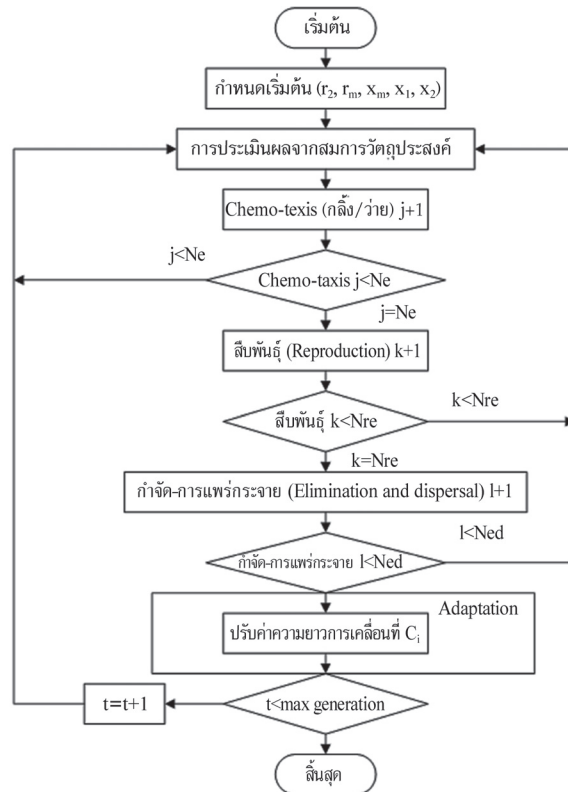
การปรับตัวแบบ ABFO₀ แสดงด้วยเส้น (c) แบคทีเรียจะปรับความยาวของการเคลื่อนที่ลดลงในแต่ละช่วงของการคำนวณเพื่อการค้นหาเฉพาะที่ดีขึ้น ดังนั้นวิธีนี้ทำให้หาคำตอบได้แม่นยำขึ้น ส่วนการปรับปรุงตัวเอง ABFO₁ แสดงด้วยเส้น (b) แบคทีเรียจะปรับความยาวของการเคลื่อนที่ลดลงคล้ายกับ ABFO₀ แต่จะปรับความยาวเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเหมาะสมไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากการทดสอบของ Chen, H. et al. [6] พบว่า ABFO₀ มีประสิทธิภาพการทำงานดีกว่า ABFO₁ และ BFO แบบดั้งเดิม

ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เลือกวิธีการ $ABFO_0$ ประยุกต์ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ โดยเรียกชื่อย่อเป็น ABFO

4. การประยุกต์ใช้วิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์

$$\text{Minimize } F = \left[\frac{I_{le}}{I_{lm}} - 1 \right]^2 + \left[\frac{P_{ine}}{P_{inm}} - 1 \right]^2 \quad (11)$$

วิธีการหาค่าประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำที่น่าเสนอนี้ ใช้การวัดความต้านทานของสเตเตอร์ และวัดแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า ความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะใช้งาน เพื่อนำมาคำนวณเปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (Error) ของข้อมูลที่ได้จากการวัดและการคำนวณด้วยวงจรสมมูลดังแสดงในข้อ 1 โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (11) กระบวนการทำงานของแบคทีเรียแบบปรับตัวเองแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กระบวนการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง

ขั้นตอนการคำนวณด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ด้วยวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเองมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้นของการคำนวณ เช่น จำนวนแบคทีเรีย จำนวนรอบของการเคลื่อนที่ การสืบพันธุ์ การกำจัด และการแพร่กระจาย ค่าเริ่มต้นของความยาวในการเคลื่อนที่ ข้อมูลที่ได้จากการวัด เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า

- ขั้นตอนที่ 2 สุ่มแบคทีเรียเริ่มต้นตามจำนวนประชากร โดยแบคทีเรียแต่ละเซลล์ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลคือ r_2, x_1, x_2, r_m, x_m
- ขั้นตอนที่ 3 หาค่าเหมาะสมของแบคทีเรียในแต่ละตัวโดยคำนวณจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์สมการที่ (11)
- ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการคีโมแทกซิส (Chemo Taxis) เป็นการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของแบคทีเรียแต่ละตัวหรือปรับค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลด้วยวิธีการกลิ้ง (Tumble) และการว่ายน้ำ (Swimming) ดังสมการที่ (10)
- ขั้นตอนที่ 5 ขั้นตอนการสืบพันธุ์ เรียงลำดับค่าความเหมาะสม เลือกเก็บแบคทีเรียที่แข็งแรงมากที่สุดครึ่งหนึ่งของประชากร และทำการสำเนาหรือสืบพันธุ์ให้ได้ประชากรเท่าเดิม
- ขั้นตอนที่ 6 ขั้นตอนการกำจัด-กระจายโดยสุ่มแบคทีเรียจำนวนหนึ่งเพื่อแทนที่ด้วยแบคทีเรียตัวใหม่
- ขั้นตอนที่ 7 ปรับความยาวการเคลื่อนที่ $C(i)$
- ขั้นตอนที่ 8 คำนวณประสิทธิภาพมอเตอร์จากแบคทีเรียที่มีค่าความเหมาะสมต่ำที่สุด

ผลการทดลอง

การทดสอบวิธีการหาประสิทธิภาพมอเตอร์โดยประยุกต์ใช้วิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง ทดสอบโดยการจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์โดยแบ่งเป็นช่วงต่าง ๆ เพื่อวัดค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์ จากนั้นใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดคำนวณหาค่าประสิทธิภาพมอเตอร์โดยใช้สมการวัตถุประสงค์ เปรียบเทียบกับวิธีหาค่าประสิทธิภาพอีกสามวิธี คือ

1. วัดแรงบิดที่เพลา (Shaft Torque Method: STM) โดยใช้เครื่องวัดแรงบิดในห้องทดลอง
2. วิธีวงจรสมมูลของมอเตอร์ (Equivalent Circuit Method: ECM) ซึ่งทำได้จากการทดสอบภาวะไร้อะไหล่และลอคโรเตอร์

3. วิธีสลิป (Slip Method: SM) โดยตัวอย่างผลการทดลองที่นำมาแสดงนี้มีสองกรณี คือมอเตอร์แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ขนาด 7.5 kW และมอเตอร์จริงขนาด 1.5 kW โดยรายละเอียดข้อมูลแผ่นป้ายที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในตารางที่ 1 ซึ่งกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสมมูลแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 รายละเอียดของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ

มอเตอร์	กำลังวัตต์ ขาออก	แรงดัน Δ/V (V)	ความถี่ (Hz)	กระแส Δ/Y (A)	ความเร็วรอบ (rpm)	ตัวประกอบ กำลังไฟฟ้า
กรณีที่ 1	7.5 kW	230/400	50	22.8/13.2	1,440	N/A
กรณีที่ 2	1.5 kW	220/380	50	6.4/3.7	1,400	0.8

ตารางที่ 2 ค่าขอบเขตของวงจรมูลที่ใช้คำนวณ

พารามิเตอร์	r_2	x_1, x_2	r_m	x_m
ขอบเขต	0.5 - 5	0.12 - 1.2	36 - 360	30 - 300

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของ BFO

พารามิเตอร์	BFO	ABFO
จำนวนแบคทีเรีย (s)	100	100
รอบของการคีโมแทกซิส (Nc)	20	20
จำนวนการว่ายน้ำ (Ns)	4	4
จำนวนรอบของการสืบพันธุ์ (Nre)	5	5
จำนวนรอบของการกำจัด (Ned)	10	10
ความน่าจะเป็นของการกำจัด (Ped)	0.25	0.25
ค่าเริ่มต้นความยาวการว่ายน้ำ $C(i)$	0.2	0.2
α	-	10
β	-	10
n	-	10
$\mathcal{E}_{initial}$		100

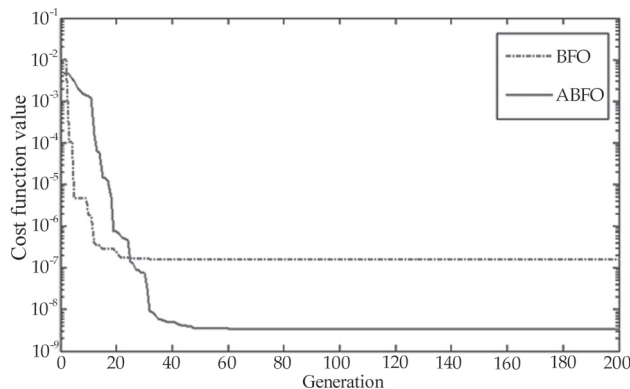
รายละเอียดพารามิเตอร์ของวิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย BFO และแบคทีเรียแบบปรับตัว ABFO แสดงในตารางที่ 3 กำหนดค่าเริ่มต้นความยาวการเคลื่อนที่ $C(i)$ เท่ากับ 0.2 แบคทีเรียมีประชากร (s) จำนวน 100 เซลล์ ขั้นตอนคีโมแทกซิส (Nc) 20 รอบ ขั้นตอนของการสืบพันธุ์ (Nre) 5 รอบ ขั้นตอนการกำจัด (Ned) 10 รอบ ดังนั้นการคำนวณทั้งหมดแบคทีเรียจะผ่านการคีโมแทกซิส 1,000 ครั้ง คำนวณซ้ำ 25 รอบ แล้วนำผลประสิทธิภาพมาหาค่าเฉลี่ย ตารางที่ 4 และ 5 แสดงผล แรงดัน กระแส กำลังงานขาเข้า ความเร็วรอบ และตัวประกอบกำลังที่ได้จากการวัด

ตารางที่ 4 ข้อมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 7.5 kW

ภาระโหลด/ ข้อมูลทางไฟฟ้า	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังงานขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	ตัวประกอบ กำลังไฟฟ้า
100 %	400	13.21	7,970	1,440	0.87
75 %	400	10.51	5,936	1,456	0.81
50 %	400	8.14	3,931	1,471	0.70
25 %	400	6.42	1,997	1,486	0.45

ตารางที่ 5 ข้อมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 1.5 kW

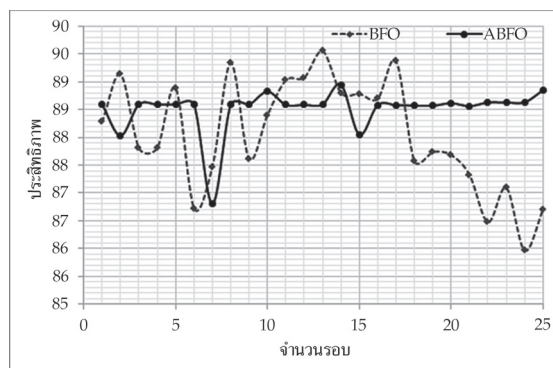
ภาระโหลด/ ข้อมูลทางไฟฟ้า	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังงานขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	ตัวประกอบ กำลังไฟฟ้า
100 %	380	3.351	1,680	1,433	0.76
75 %	380	2.734	1,200	1,453	0.66
50 %	380	2.328	800	1,473	0.53
25 %	380	2.109	440	1,487	0.31



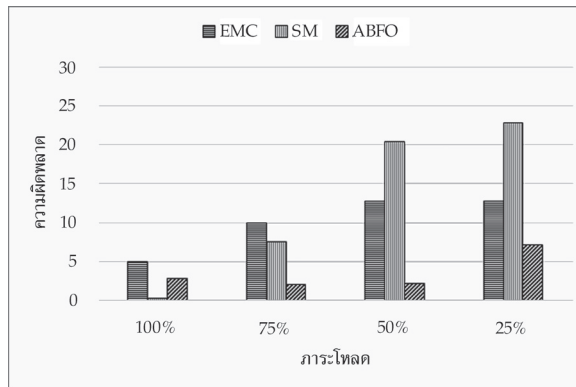
รูปที่ 5 การลู่เข้าหาค่าตอบของวิธี BFO และ ABFO

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการลู่เข้าหาค่าตอบที่คำนวณจากสมการวัตถุประสงค์ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ จากรูปวิธีการ BFO มีการลู่เข้าค่าตอบเร็วกว่า แต่วิธี ABFO หาค่าตอบของสมการวัตถุประสงค์ได้ต่ำกว่า

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นตัวอย่างการกระจายของค่าตอบในการคำนวณประสิทธิภาพมอเตอร์ด้วยวิธี BFO และ ABFO จากรูปจะเห็นว่าวิธี BFO มีความแปรปรวนหรือกระจายตัวมากกว่าวิธี ABFO โดยวิธี BFO ได้ค่าเฉลี่ย 87.81 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.01 และวิธี ABFO ได้ค่าเฉลี่ย 88.59 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.04



รูปที่ 6 การกระจายของค่าตอบในการคำนวณด้วยวิธี BFO และ ABFO



รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกรณีมอเตอร์ 1.5 kW

ตารางที่ 6 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขนาด 7.5 kW

โหลดมอเตอร์	ประสิทธิภาพ (%)				ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์		
	STM	ECM	SM	ABFO	ECM	SM	ABFO
100 %	90.16	88.62	93.60	88.59	1.71	3.81	1.74
75 %	91.88	90.79	91.11	90.26	1.18	0.84	1.77
50 %	93.24	91.55	90.14	91.56	1.81	3.32	1.80
25 %	93.33	91.56	84.05	91.64	1.89	9.94	1.80

ตารางที่ 7 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขนาด 1.5 kW

โหลดมอเตอร์	ประสิทธิภาพ (%)				ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์		
	STM	ECM	SM	ABFO	ECM	SM	ABFO
100 %	88.87	84.56	88.81	91.33	4.84	0.07	2.7
75 %	94.59	85.28	87.59	92.69	9.84	7.40	2.00
50 %	95.82	83.68	76.29	93.84	12.66	20.38	2.06
25 %	87.76	76.62	67.81	94.01	12.69	22.73	7.1

ตารางที่ 6 และ 7 แสดงผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธี ABFO เปรียบเทียบกับวิธีวัดแรงบิดที่เพลา (STM) วิธีคำนวณจากวงจรสมมูล (ECM) และวิธีสลิป (SM) ของมอเตอร์ขนาด 7.5 kW และ 1.5 kW รูปที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการจากผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง (ABFO) สามารถประเมินประสิทธิภาพได้ใกล้เคียงกับการวัดแรงบิดที่เพลามากที่สุด และมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าวิธีการแบบอื่น โดยค่าความผิดพลาดของมอเตอร์ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์มีความผิดพลาดเฉลี่ย 1.78 % และมอเตอร์จริงมีความผิดพลาดเฉลี่ย 3.47 %

สรุป

บทความนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบการเสาะหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง (ABFO) ลู่เข้าคำตอบได้ช้ากว่า แต่ถูกต้องกว่าเพราะวิธีการ ABFO มีการปรับค่าความยาวของการเคลื่อนที่หรือการว่ายน้ำของแบคทีเรียให้ลดลงจากค่าเริ่มต้น จึงทำให้เคลื่อนที่หรือเจอคำตอบได้ช้าลงแต่สามารถค้นหาคำตอบได้ละเอียดมากกว่าเดิม และเป็นผลให้คำตอบที่ได้แต่ละการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบเดิม (BFO) เมื่อเปรียบเทียบการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์จากวิธีที่นำเสนอเทียบกับวิธีสลิป และวิธีคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบในสภาวะไร้โหลดและล็อกโรเตอร์ พบว่าที่โหลด 50, 75 และ 100 % วิธี ABFO สามารถหาได้ใกล้เคียงกับวิธีวัดแรงบิดโดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 3 % ส่วนที่โหลด 25 % มีความผิดพลาดสูงคือ 7.1 % แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีสลิปและวิธีคำนวณด้วยพารามิเตอร์ถือว่าผิดพลาดต่ำกว่า ดังนั้นวิธีการหาประสิทธิภาพด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถใช้งานได้สะดวก สามารถประเมินประสิทธิภาพได้โดยไม่หยุดการทำงานของมอเตอร์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนวิจัยภายใต้โครงการส่งเสริมการผลิตผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงรายทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำที่ดีและเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

References

- [1] Sakthivel, V. P., Bhuvaneswari, R., and Subramanian, S. (2010). Non-Intrusive Efficiency Estimation Method for Energy Auditing and Management of In-Service Induction Motor using Bacterial Foraging Algorithm. **IET Electric Power Applications**. Vol. 4, No. 8, pp. 579-590
- [2] Wangsupapon, A., Phumiphak, P., and Chat-Uthai, C. (2007). Economical On-Site Efficiency Estimation Technique of Subway Tunnel Ventilation Fan Motor. **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol. 24, No. 1, pp. 7-12
- [3] Lu, B., Habetler, T. G., and Harley, R. G. (2006). A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**. Vol. 42, Issue 4, pp. 924-933

- [4] Santos, V. S., Felipe, P. V., and Sarduy, J. G. (2013). Bacterial Foraging Algorithm Application for Induction Motor Field Efficiency Estimation Under Unbalanced Voltages. **Measurement**. Vol. 46, Issue 7, pp. 2232-2237. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.03.019
- [5] Fogel, D. B. (2000). **Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence**. Second ed. Piscataway, N. J. : IEEE Press.
- [6] Chen, H., Zhu, Y., and Hu, K. (2011). Adaptive Bacterial Foraging Optimization. **Abstract and Applied Analysis**. Vol. 2011, Article ID 108269. p. 27. DOI: 10.1155/2011/108269