

การประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด Energy Saving for Separately Excited DC Motor via Optimization Method

จิรวรรณ หอมจันทร์¹ กองพล อารีรักษ์^{1*} ทิดารัตน์ อารีรักษ์² กองพัน อารีรักษ์¹

¹กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาคณิตศาสตร์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Jeerawan Homjan¹ Kongpol Areerak^{1*} Tidarut Areerak² Kongpan Areerak¹

¹Power electronics, Energy, Machines, and Control Research Group,

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,

Suranaree University of Technology, Nakhon Rachasima, 30000

² School of Mathematics, Institute of Science,

Suranaree University of Technology, Nakhon Rachasima, 30000

*Corresponding author: Email: kongpol@sut.ac.th

(Received: May 19, 2019; Accepted: August 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น (Separately Excited DC Motor) โดยพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม กับวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Method : OM) ซึ่งวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดมีการนำหลักการทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการหาค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด เมื่อกำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยจะส่งผลต่อการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ทำให้การใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งจากผลการทดสอบเปรียบเทียบการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้งสองวิธี พบว่า วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุดให้ผลการประหยัดพลังงาน ได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น กำลังงานสูญเสีย วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด

ABSTRACT

The paper presents the comparison results about the energy saving of separately excited DC motor. The conventional and optimization methods are concerned for this comparison. The optimization method is applied to calculate the appropriate field current for loss minimization or energy

saving. The experimental results show that the drive approach using the optimization method can save the energy consumed by the motor to 85.92% in maximum.

Keyword: Separately excited DC motor, power loss, optimization method, loss minimization.

1. บทนำ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เนื่องมาจากปัจจุบันมีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพิ่มมากขึ้นทั้งในภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นนิยมใช้กับงานขับเคลื่อนที่มีแรงบิดสูง งานยกของ อุตสาหกรรม เป็นต้น และมีความสมบัติที่สำคัญในการควบคุมความเร็วรอบที่ง่าย เพราะสามารถแยกการควบคุมในแต่ละวงจรของมอเตอร์ได้โดยอิสระ [1] ในบทความได้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่พิจารณาเรื่องการลดกำลังงานสูญเสีย โดยการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search : ATS) เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น จะนำค่าดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสสนามด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน ซึ่งในอดีตมีผู้วิจัยเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นกันอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน โดยใช้วิธีการควบคุมกระแสสนามเพื่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การใช้ตัวควบคุมเพื่อคำนวณหาค่ากระแสสนามโดยใช้แบบจำลองแม่เหล็ก [2] การใช้ตัวควบคุมที่สามารถวัดกำลังงานในการขับเคลื่อนและค้นหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสม [3-5] และการใช้วิธีฐานแบบจำลองในการหาค่ากระแสสนามสำหรับการประหยัดพลังงาน [6] เป็นต้น โดยบทความนี้นำเสนอวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อคำนวณหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสมสำหรับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ชนิดแยกกระตุ้น โดยในบทความนี้จะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการหาค่ากระแสสนาม เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การนำเสนอเนื้อหาในบทความ ประกอบด้วยทฤษฎีกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น การใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประหยัดพลังงาน ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม และวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และส่วนสุดท้ายเป็นการอภิปรายผลและสรุปผล

2. กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น [7-9] ประกอบด้วย กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด (copper losses) กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ (friction and windage losses) กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (core losses) กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน (brush losses) และกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (stray losses)

2.1 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดทองแดง เนื่องจากกระแสไหลผ่านความต้านทานของขดลวดทองแดง ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสีย และมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดยกกำลังสอง [1] ซึ่งกำลังงานสูญเสียดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งในขดลวดอาร์เมเจอร์ และขดลวดสนาม แสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$P_a = i_a^2 R_a \quad (1)$$

$$P_f = i_f^2 R_f \quad (2)$$

โดยที่ P_d คือ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (W)

i_d คือ กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (A)

R_d คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)

P_f คือ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสนาม (W)

i_f คือ กระแสไฟฟ้าสนาม (A)

R_f คือ ความต้านทานสนาม (Ω)

2.2 กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้าน

อากาศ

กำลังงานสูญเสียประเภทนี้เป็นกำลังงานสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทานระหว่างตลับลูกปืนกับแกนของมอเตอร์ (bearing friction) ความเสียดทานระหว่างหน้าสัมผัสของแปรงถ่านกับหน้าสัมผัสของคอมมิวเตเตอร์ (brush friction) และความเสียดทานระหว่างอากาศในช่องว่างอากาศ (airgap) ที่อยู่ใตสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วเหนือและขั้วใต้ กับแกนอาร์เมเจอร์ (armature core) กำลังงานสูญเสียนี้ทำให้เกิดความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง และกำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานนี้จะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ [1] ซึ่งสามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียได้ดังสมการที่ (3)

$$P_m = K_m N^3 \quad (3)$$

โดยที่ P_m คือ กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ (W)

K_m คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ

N คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)

2.3 กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses) เป็นกำลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีเส้นแรงแม่เหล็กตัดกับแกน

เหล็ก จะทำให้เกิดกระแสไหลวน (eddy current loss) อยู่ในแกนเหล็กเป็นการสูญเสียที่สูญเสียเปล่า และการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการสูญเสียที่เรียกว่า ฮิสเตอร์รีซิส (hysteresis loss) [11] กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็กแสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$P_i = K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 \quad (4)$$

โดยที่ P_i คือ กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (W)

K_h คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ

K_e คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับความเหนียวของวัสดุ

ω คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (rad/s)

2.4 กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน

กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่านเกิดจากค่าความต้านทานของแปรงถ่าน เมื่อกระแสไหลผ่านแปรงถ่านจะเกิดแรงดันที่แปรงถ่าน เมื่อแรงดันนี้คูณกับกระแสที่ไหลผ่าน จะเกิดกำลังงานสูญเสียที่ตัวแปรงถ่าน กำหนดให้ค่าแรงดันตกคร่อมเท่ากับ 1 โวลต์ ต่อแปรงถ่าน 1 ชุด ในกรณีที่มีแปรงถ่านบวกและลบ จำนวนทั้งหมด 2 ชุด จะได้แรงดันตกคร่อมแปรงถ่านรวมทั้งหมด 2 โวลต์ [9] สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียได้ดังสมการที่ (5)

$$P_{BD} = V_e i_a \quad (5)$$

โดยที่ P_{BD} คือ กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน (W)

V_e คือ แรงดันตกคร่อมแปรงถ่านมีค่าเท่ากับ 2 โวลต์

2.5 กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน

กำลังงานสูญเสียประเภทนี้เป็นผลมาจากการบิดเบี้ยวของฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ และกระแสลัดวงจรในกระบวนการคอมมิวเตชัน [8] ซึ่งกำลังงานสูญเสียนี้มีค่าแปรผันโดยตรงกับขนาดของ

กระแสไหลและความเร็วรอบของมอเตอร์ [1] สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน ได้ดังสมการที่ (6)

$$P_s = K_{st} i_a^2 N^2 \quad (6)$$

โดยที่ P_s คือ กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (W)

K_{st} คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน

จากการอธิบายกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ข้างต้น สามารถพิจารณากำลังงานสูญเสียรวมในมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น แสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + K_m N^3 + K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 + 2i_a + K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \quad (7)$$

ถ้าไม่พิจารณากำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ ที่มีค่าน้อยมากสำหรับมอเตอร์ที่พิจารณาในบทความนี้ เนื่องจากมอเตอร์มีขนาดเล็ก [7] สามารถเขียนสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ได้ใหม่ ดังสมการที่ (8)

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 + 2i_a + K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \quad (8)$$

การคำนวณกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในสมการที่ (8) มีพารามิเตอร์บางตัวที่ไม่ทราบค่า ได้แก่ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียฮิสเตอร์ซิส (K_h) ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับความเหนี่ยวนำของวัสดุจากกำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (K_e) และค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (K_{st}) ในบทความนี้ได้นำวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวในการหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่า เนื่องจากการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้น

จากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่ โดยเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตาบู่ คือ การเดินย้อนรอย (back tracking) และการปรับลดรัศมีการค้นหา เพื่อให้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพมากขึ้น และวิธีการค้นหานี้มีการทดสอบฟังก์ชันมาตรฐาน คือ Bohachevsky, Rastrigin, Shekel's Shubert และ Schwefel [14-19] เพื่อให้มั่นใจได้ว่าจะสามารถเข้าถึงผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดในเวลาที่จำกัด การหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่า ที่ได้จากการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวได้แสดงไว้ใน [20] ซึ่งผลการค้นหาดังกล่าวเป็นดังนี้

$$K_h = 2.9386 \frac{W \cdot s}{rad \cdot T \cdot m^3}$$

$$K_e = 0.0041 \frac{W \cdot s^2}{T \cdot rad^2 \cdot m^5}$$

$$K_{st} = 5.29096 \times 10^{-6} \frac{W \cdot s^2}{rad^2 \cdot A^2}$$

ในกรณีที่มอเตอร์ที่พิจารณามีขนาดใหญ่ จะพิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ ดังสมการที่ (7)

3. การใช้วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับประหยัดพลังงาน

วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Method : OM) สำหรับการประหยัดพลังงาน เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยการหาอนุพันธ์ของสมการกำลังงานสูญเสียเทียบกับกระแสสนามให้เท่ากับศูนย์ เพื่อให้ได้ค่ากระแสสนามที่มีค่าน้อยที่สุด

บทความนี้ใช้สมการกำลังงานสูญเสียสมการที่ (8) ในการหาค่ากระแสสนามที่มีค่าน้อยที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ที่ค่าความเร็วและแรงบิดต่าง ๆ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้มีสองส่วน คือ ส่วนที่ 1 ค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดฝั่งอาร์เมเจอร์ 8.8 โอห์ม และฝั่งสนาม 654 โอห์ม ส่วนที่ 2 คือ

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว มี
ค่าดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการกำลังงานสูญเสีย

พารามิเตอร์	ค่า
R_a	8.8 Ω
R_f	654 Ω
K_h	2.9386 $\frac{W \cdot s}{rad \cdot T \cdot m^3}$
K_e	0.0041 $\frac{W \cdot s^2}{T \cdot rad^2 \cdot m^5}$
K_{st}	$5.29096 \times 10^{-6} \frac{W \cdot s^2}{rad^2 \cdot A^2}$

จากการศึกษาของ Kusko and Galler [21] ได้
กำหนดว่ากระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์สามารถคำนวณ
ได้ดังสมการที่ (9) ดังนี้

$$i_a = \frac{T}{K'_e K_f i_f} \quad (9)$$

แทนค่าสมการที่ (9) ลงในสมการที่ (8) และทำการจัดรูป
สมการใหม่ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (10)

$$P_{loss} = \left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K'_e K_f i_f} \right)^2 + \frac{2T}{K'_e K_f i_f} + (R_f + K_h \omega + K_e \omega^2) i_f^2 \quad (10)$$

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ ต้องการคำนวณ
ค่ากระแสสนามที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด
ดังนั้น จึงดำเนินการหาอนุพันธ์ของกำลังงานสูญเสีย ใน
สมการที่ (10) เทียบกับกระแสสนามให้เท่ากับศูนย์ ดัง
สมการที่ (11)

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial i_f} = \frac{\partial}{\partial i_f} \left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K'_e K_f i_f} \right)^2 + \frac{2T}{K'_e K_f i_f} + (R_f + K_h \omega + K_e \omega^2) i_f^2 = 0$$

จะได้

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial i_f} = -2 \left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K'_e K_f} \right) \cdot \frac{1}{i_f^3} - \frac{2T}{K'_e K_f i_f^2} + 2(R_f + K_h \omega + K_e \omega^2) i_f = 0 \quad (14)$$

จัดรูปสมการที่ (11) ได้ดังสมการที่ (12)

$$(R_f + K_h \omega + K_e \omega^2) i_f^4 - \frac{T}{K'_e K_f} i_f - \left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K'_e K_f} \right)^2 = 0 \quad (12)$$

ทำการกำหนดตัวแปรใหม่ ดังนี้

$$A = R_f + K_h \omega + K_e \omega^2$$

$$D = -\frac{T}{K'_e K_f}$$

$$E = -\left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K'_e K_f} \right)^2$$

ดังนั้น สมการที่ (12) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการ
ที่ (13)

$$A i_f^4 + D i_f + E = 0 \quad (13)$$

จากสมการที่ (13) เป็นสมการพหุนามกำลังสี่ สามารถแก้สมการด้วยวิธีการของ Lodovico Ferrari [22] วิธีการแก้สมการที่ (13) อธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1:

$$\text{คำนวณ } \beta \text{ จาก } \beta = \frac{D}{A} \text{ และ } \gamma \text{ จาก } \gamma = \frac{E}{A}$$

ขั้นตอนที่ 2:

$$\text{ใช้สมการ } P = -\gamma \text{ และ } Q = -\frac{\beta^2}{8} \text{ คำนวณค่า } P \text{ และ } Q$$

ขั้นตอนที่ 3:

$$\text{คำนวณค่า } R \text{ จาก } R = -\frac{Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{2} + \frac{P^3}{27}}$$

ขั้นตอนที่ 4:

$$\text{ใช้ค่า } R \text{ จากขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า } U \text{ จาก } U = \sqrt[3]{R}$$

ขั้นตอนที่ 5:

$$\text{คำนวณค่า } y \text{ จากสมการที่ (14)}$$

$$y = \begin{cases} U - \frac{P}{3U}, & \text{if } U \neq 0 \\ U - \sqrt[3]{Q}, & \text{if } U = 0 \end{cases} \quad (14)$$

ขั้นตอนที่ 6:

$$\text{คำนวณค่า } W \text{ โดยใช้สมการ } W = 2y$$

ขั้นตอนที่ 7:

คำนวณค่า i_f ที่ทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ (15)

$$i_f = \frac{\pm_s W \mp \sqrt{-\left(2y \pm_s \frac{2\beta}{W}\right)}}{2} \quad (15)$$

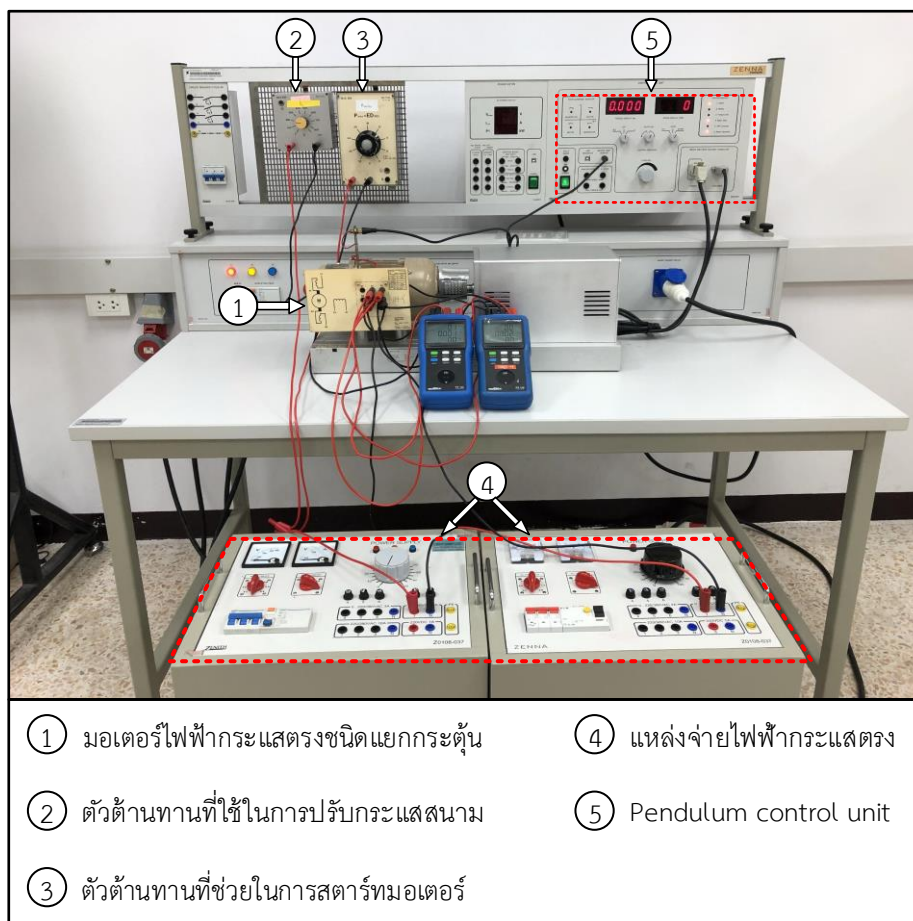
จากการคำนวณทั้ง 7 ขั้นตอน จะได้ค่ากระแสสนามที่ทำให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ค่ากระแสสนามที่ได้จากสมการที่ (15) จะได้คำตอบออกมาทั้งหมด 4 ค่า ซึ่งค่าจากกระแสสนามทั้ง 4 ค่าจะต้องเลือกเพียง 1 ค่า ที่นำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสีย โดยเกณฑ์การเลือกคำตอบที่เหมาะสมคือ ค่ากระแสสนามต้องไม่ติดลบ ค่ากระแสสนามต้องไม่มีค่าเป็นศูนย์ และค่ากระแสสนามต้องมีค่าไม่เกินพิกัดหลังจากได้ค่ากระแสสนามแล้วจะต้องนำค่าที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ (13) ถ้าค่ากระแสสนามดังกล่าวทำให้สมการเป็นจริง จึงสรุปได้ว่า ค่ากระแสสนามนั้นให้ค่ากำลังงานสูญเสียที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน

4. ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม และวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

4.1 วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีดั้งเดิม จะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 ชุด ป้อนให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ และวงจรสนาม โดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ที่ค่าความเร็วรอบตั้งแต่ศูนย์ถึงความเร็วพิกัด จะควบคุมค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ และคงค่ากระแสสนามไว้ที่พิกัด กรณีที่ 2 ที่ค่าความเร็วรอบตั้งแต่พิกัดขึ้นไป จะปรับค่ากระแสสนาม และคงค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ไว้ที่พิกัด

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยการขับเคลื่อนวิธีดั้งเดิม ได้ทำการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยมอเตอร์



รูปที่ 1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าพิกัด โดยฝั่งอาร์เมเจอร์มีแรงดัน 220 โวลต์ กระแส 2.2 แอมแปร์ ฝั่งสนามมีแรงดัน 220 โวลต์ กระแส 0.3 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้า 370 วัตต์ ความเร็วรอบ 2,360 รอบต่อนาที โดยทำการทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำกว่าพิกัด (80% ของพิกัด) เท่ากับพิกัด และสูงกว่าพิกัด (120% ของพิกัด) ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกำลังงานอินพุตของวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 2

ค่ากำลังงานอินพุต และกำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16) และ (17) ตามลำดับ

$$P_{in} = v_a i_a + v_f i_f \quad (16)$$

$$P_{out} = T_L \omega \quad (17)$$

4.2 วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด จะนำค่ากระแสสนามที่ได้จากการคำนวณมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ ที่ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าพิกัด เท่ากับพิกัด และมากกว่าพิกัด

การทดสอบมอเตอร์จะเริ่มต้นจากการกำหนดค่ากระแสสนามของมอเตอร์ให้ได้ค่าตามการคำนวณ จากนั้น ปรับค่าแรงดันอาร์เมเจอร์เพื่อทำการปรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ค่าตามที่ต้องการ โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แสดงได้ดังรูปที่ 1

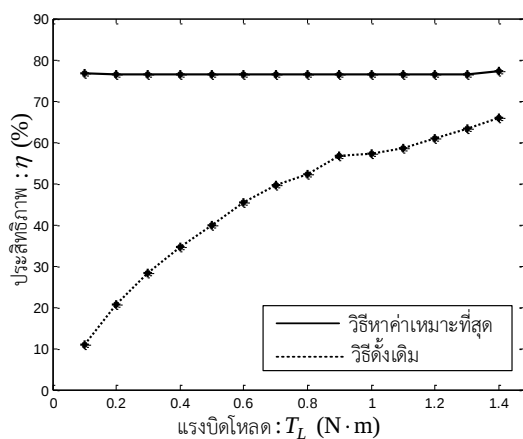
ตารางที่ 2 ผลการคำนวณเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

speed		T_L (N·m)	P_{out} (W)	วิธีดั้งเดิม				วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด				เปอร์เซ็นต์การ ประหยัด พลังงาน
%	rpm			i_f (A)	v_a (V)	P_m (W)	η (%)	i_f (A)	v_a (V)	P_m (W)	η (%)	
80	1880	0.1	19.69	0.30	161.40	174.30	11.03	0.08	45.55	25.70	76.61	85.25
100	2360		24.71	0.30	202.60	217.95	11.34	0.08	57.88	30.68	80.54	85.92
120	2832		29.66	0.20	220.00	222.46	11.33	0.09	70.93	35.62	83.27	83.99
80	1880	0.2	39.37	0.30	163.50	190.91	20.62	0.11	64.63	51.43	76.55	73.06
100	2360		49.43	0.30	205.10	239.10	20.67	0.11	82.13	61.39	80.52	74.33
120	2832		59.31	0.19	220.00	253.47	23.40	0.12	100.63	71.27	83.22	71.88
80	1880	0.3	59.06	0.30	165.90	208.18	28.37	0.13	79.29	77.16	76.54	62.94
100	2360		74.14	0.30	207.30	261.90	28.31	0.14	100.69	92.09	80.51	64.84
120	2832		88.97	0.16	220.00	304.76	29.19	0.15	123.40	106.93	83.20	64.91
80	1880	0.4	78.75	0.30	167.80	227.42	34.63	0.16	91.66	102.89	76.54	54.76
100	2360		98.86	0.30	209.60	286.50	34.51	0.16	116.38	122.81	80.50	57.13
120	2832		118.63	0.15	220.00	358.24	33.11	0.17	142.57	142.58	83.20	60.20
80	1880	0.5	98.44	0.30	169.20	246.87	39.88	0.17	102.51	128.62	76.54	47.90
100	2360		123.57	0.30	211.80	311.26	39.70	0.18	130.22	153.53	80.49	50.68
120	2832		148.28	0.17	220.00	362.53	40.90	0.19	159.47	178.24	83.19	50.83
80	1880	0.6	118.12	0.30	168.90	260.57	45.33	0.19	112.39	154.36	76.52	40.76
100	2360		148.28	0.30	210.40	321.43	46.13	0.20	142.65	184.23	80.49	42.68
120	2832		177.94	0.18	220.00	377.54	47.13	0.21	174.71	213.89	83.19	43.35
80	1880	0.7	137.81	0.30	170.50	278.10	49.55	0.21	121.41	180.08	76.53	35.24
100	2360		173.00	0.30	212.60	350.67	49.33	0.22	154.14	214.59	80.62	38.70
120	2832		207.60	0.16	220.00	457.11	45.42	0.23	188.77	249.56	83.19	45.41
80	1880	0.8	157.50	0.30	171.60	301.44	52.25	0.22	130.71	205.99	76.46	31.66
100	2360		197.71	0.30	212.00	368.95	53.59	0.23	164.84	245.67	80.48	33.41
120	2832		237.25	0.17	220.00	467.24	50.78	0.24	201.83	285.21	83.18	38.96
80	1880	0.9	177.19	0.30	171.40	312.82	56.64	0.23	137.77	231.56	76.52	25.98
100	2360		222.42	0.30	212.10	386.91	57.49	0.24	174.89	276.39	80.47	28.56
80	1880	1.0	196.87	0.30	174.90	343.74	57.27	0.25	145.26	257.29	76.52	25.15
100	2360		247.14	0.30	218.20	441.09	56.03	0.26	184.38	307.11	80.47	30.37
80	1880	1.1	216.56	0.30	177.30	370.42	58.46	0.26	152.33	283.02	76.52	23.59
100	2360		271.85	0.30	219.60	467.65	58.13	0.27	193.38	337.82	80.47	27.76
80	1880	1.2	236.25	0.30	177.10	387.61	60.95	0.27	159.16	308.76	76.52	20.34
100	2360		296.57	0.30	218.80	493.10	60.14	0.28	220.02	396.72	74.76	19.55
80	1880	1.3	255.94	0.30	177.00	404.78	63.23	0.28	165.69	334.50	76.51	17.36
100	2360		321.28	0.30	217.80	505.72	63.53	0.29	210.29	399.26	80.47	21.05
80	1880	1.4	275.62	0.30	176.20	418.40	65.87	0.29	171.94	357.44	77.11	14.57

ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สามารถหาได้จากสมการที่ (18) แสดงได้ดังตารางที่ 2 โดยผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ระหว่างวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดและวิธีดั้งเดิม พบว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีดั้งเดิมในทุกสภาวะการทำงาน สามารถแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,880 rpm ได้ดังรูปที่ 2

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (18)$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,880 rpm

เมื่อพิจารณาการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้น สามารถคำนวณกำลังงานอินพุตเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม โดยการเปรียบเทียบจะดำเนินการหาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจากสมการที่ (19) สำหรับผลการคำนวณเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแสดงได้ดังตารางที่ 2

เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน

$$= \frac{P_{in,conventional} - P_{in,OM}}{P_{in,conventional}} \times 100\% \quad (19)$$

โดยที่ $P_{in,conventional}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม

$P_{in,OM}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด

จากผลการทดสอบมอเตอร์ในตารางที่ 2 พบว่า การทดสอบด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด เป็นการทดสอบที่สภาวะแรงบิดโหลด และความเร็วรอบต่าง ๆ ที่มีค่าเท่ากัน ส่งผลให้กำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์จากทั้ง 2 วิธีมีค่าเท่ากัน ในส่วนของกำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะสมที่สุด มีค่าน้อยกว่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม ซึ่งค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนทั้งสองวิธีมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะสมที่สุด ให้ผลการประหยัดพลังงานได้ดีในสภาวะแรงบิดโหลดต่ำ ๆ และที่แรงบิดโหลดมีค่าเท่ากับ 0.1 N·m (ที่สภาวะ 7.14 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด) ให้ค่าการประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์ และการประหยัดพลังงานจะมีเปอร์เซ็นต์ลดลงเมื่อแรงบิดโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ค่าแรงบิดโหลดตั้งแต่ 0.9-1.4 N·m ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานที่ค่าความเร็วรอบ 120 เปอร์เซ็นต์ ของพิกัด เนื่องจากในการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม ที่สภาวะข้างต้นมีกระแสอาร์เมเจอร์เกินพิกัด นอกจากนี้ สังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานลดลงเมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่ากระแสสนามมีค่ามากขึ้นเพราะต้องการแรงบิดของมอเตอร์ที่สูงขึ้น จึงทำให้ค่ากำลังงานอินพุตของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การประหยัดพลังงานลดลง โดยที่สภาวะแรงบิดโหลดเต็มพิกัดสามารถประหยัดพลังงานได้เพียง 14.57 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะสมที่สุด

สามารถลดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีย่าน้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยทำการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม กับวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการหาค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด ได้ทำการเปรียบเทียบที่ค่ากำลังงานอินพุตของมอเตอร์ ซึ่งพบว่า วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้ผลการประหยัดพลังงาน ได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์ และในช่วงที่มีแรงบิดโหลดต่ำกว่าปกติจะให้การประหยัดพลังงานที่ดีกว่าช่วงที่แรงบิดโหลดสูงกว่าปกติ จากการนำเสนอในบทความนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำลังงานอินพุตมีค่าน้อยลง จะทำให้กำลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นมีค่าน้อยลง ในขณะที่กำลังงานเอาต์พุตมีค่าเท่าเดิม ด้วยเหตุผลนี้ จึงทำให้เกิดการประหยัดพลังงานในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทู่นการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก กองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. I. Hameed, and K. A. Mohamad, "Speed Control of Separately Excited DC Motor using Fuzzy Neural Model Reference Controller," *International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS)*, Vol.2, No.4, pp. 27-39, 2012.
- [2] C. De Angelo, G. Bossio, and G. Garcia, "Loss Minimization in DC Motor Drives," *IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99.*, Vol. 4, No. 2, pp. 701-703, 9-12 May. 1999.
- [3] S. C. Hong, and M. H. Park, "Microprocessor – based optimal efficiency drive of separately excited dc motor," *Proc. 1984 IEEE TENCON.*, pp. 126-128, 1984.
- [4] N. Margaris, and T. Goutas, Z. Doulgeri, and A. Paschali, "Loss Minimization in DC Drives," *IEEE Transaction on Industrial Electronics.*, Vol. 38, No. 5, pp. 328-336, 1991.
- [5] E. S. Sergaki, G. S. Stavrakakis, and A. D. Pouliezios, "Optimal Robot Speed Trajectory by Minimization of the Actuator Motor Electromechanical Losses," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 33, pp. 187-207, 2002.
- [6] S. Udomsuk, K-L. Areerak, and K-N. Areerak, "The Energy Saving for Separately Excited DC Motor Drive via Model Based Method," *J Electr Eng Technol (JEET)*, Vol. 11, pp. 470-479, 2015.
- [7] P. F. Ryff, "ELECTRIC MACHINERY," Prentice Hall, New Jersey, 1994.
- [8] S. A. Nasar, "Electric Machine and Power Systems," McGraw-Hill, New York, 1995.
- [9] S. J. Chapman, "ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS," McGraw-Hill, Boston, 1999.
- [10] Toro, V. D., "Basic Machines," NJ : Prentice-Hill, 1990

- [11] G. Bertotti, “*Hysteresis in magnetism : for physicists, materials scientists, and engineers,*” Academic Press, 1998.
- [12] S. A. Nasar, “*Electric Machine and Power Systems,*” New York: McGraw-Hill, 1995.
- [13] A. Kusko, and M. T. Thompson, “*Power quality in electrical systems,*” McGraw-Hill, 2007.
- [14] D. Puangdownreong, T. Kulworawanichpong and S. Sujitjorn, “Finite convergence and performance evaluation of adptive tabu search,” in *knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, Vol. 3215 of Lecture Notes in Computer Science, M.G. Negoita, R.J. Howlett and L.C. Jain, Ed. Heidelberg: Springer, pp. 710-717, 2004.
- [15] T. Kulworawanichpong, D. Puangdownreong and S. Sujitjorn, “Finite convergence of adaptive tabu search,” *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, Vol. 21, No. 2-3, pp. 103-115, 2004
- [16] D. Puangdownreong, S. Sujitjorn and T. Kulworawanichpong, “convergence analysis of adaptive tabu search,” *Science Asia Journal of the Science Society of Thailand*, Vol. 30, No. 2, pp. 183-190, 2004.
- [17] S. Sujitjorn, T. Kulworawanichpong, D. Puangdownreong and K-N. Areerak, “Adaptive Tabu Search and Applications in Engineering Design,” in *Integrated Intelligent Systems for Engineering Design*, Zha and R.J. Howlett, Ed. Amsterdam, The Netherlands: ISO Press, pp. 233-257, 2006.
- [18] S. Sujitjorn, J. Kluabwang, D. Puangdownreong and N. narasiri “Adaptive tabu search management agent,” *The ECTI Trans. on Electrical Engineering, Electronics, and Communications.*, Vol. 7, No. 2, pp. 1-10, 2009.
- [19] J. Kluabwang, D. Puangdownreong and S. Sujitjorn, “Multipath adaptive tabu search for a vehicle control problem,” *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2012, pp.1-20, 2012.
- [20] จีรวรรณ หอมจันทร์, กองพล อารีรักษ์, จิตรัตน์ อารีรักษ์ และกองพัน อารีรักษ์. การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40*, ชลบุรี, 15 - 17 พฤศจิกายน 2560, ฉบับที่ 2, หน้า 447 - 450.
- [21] A. Kusko, and D. Galler, “Control Means for Minimization of Losses in AC and DC Motor Drives,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-19, No. 4, pp. 561-570, 1983.
- [22] S. Jean, and P. Tignol, “*Galois’ Theory of algebraic Equations,*” World Scientific, 2001.