

ภาคผนวก

การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะมีโหลดที่สถานะทำงาน

โดยการวิเคราะห์ถดถอยค่ากำลังงานกลจากสัดส่วนค่ากระแสและค่าไถล

On-Service Three-Phase Induction Motor Efficiency Estimation Using Power Output

Regression Analysis From Current and Slip Ratios

วีระ สุทธิสิงห์ และ กิรติ ชยะกุลศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

2410/2 ถนนพหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์ 02-579-1111 ต่อ 2147 E-mail: keerati.ch@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอผลลัพท์การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่ากระแสและค่าไถลของมอเตอร์ในการประมาณค่ากำลังงานกลด้วยการวิเคราะห์ถดถอยทางสถิติเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่สถานะทำงานโดยไม่ต้องปลดโหลด ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้โดยไม่ต้องยกมอเตอร์ไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ในการศึกษาวิจัยได้ใช้ข้อมูลการทดสอบมอเตอร์จำนวน 9 ตัว จากนั้นทำการวิเคราะห์ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของกระแสที่มอเตอร์ใช้กับกระแสพิคกที่มีต่อค่ากำลังงานกลที่มอเตอร์จ่ายออก และความเร็วรอบที่มอเตอร์ใช้กับความเร็วรอบพิคกที่มีต่อค่ากำลังงานกลที่มอเตอร์จ่ายออก โดยวิธีการที่นำเสนอได้เปรียบเทียบกับความแม่นยำกับวิธีดั้งเดิมในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สถานะทำงาน โดยใช้การอ้างอิงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งพบว่าวิธีการที่นำเสนอนี้ให้ผลลัพธ์ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ได้โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม และใช้การคำนวณที่ไม่ซับซ้อน โดยยังคงใช้ตัวแปรในการวิเคราะห์พื้นฐานที่ไม่จำเป็นต้องหยุดเดินเครื่องมอเตอร์

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ประสิทธิภาพ วิธีกระแส วิธีค่าไถล การวิเคราะห์ถดถอย

Abstract

This research paper presents the relation analysis of current and slip to induction motor power output using regression for three-phase induction motor efficiency estimation, without interrupting the motor operation. The method is benefit to the energy conservation program related to the motor efficiency analysis, due to the efficiency

of motor can be estimated without transporting motor to the laboratory.

In this research, the test laboratory test result of *nine* motors is used as reference. The relation between current and power output and between slip and power output had been investigated. The accuracy of the proposed method was compared to the conventional on-service three-phase induction motor efficiency estimations. The results shown that the proposed method provides the lower error in three-phase induction motor efficiency estimation than those of estimated by conventional methods, without interrupting motor operation.

Keywords: Three-phase induction motor, efficiency, current method, slip method, regression

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ โรงงานอุตสาหกรรมและอาคารขนาดใหญ่ได้มีจำนวนมากขึ้นทั้งใหม่และเก่าต่างได้มีการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้งานในหลากหลายรูปแบบ ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์จึงสำคัญมาก เนื่องจากเป็นตัวต้นกำลัง โดยแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเพื่อขับโหลดต่างๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อติดตั้งมอเตอร์ไปแล้ว การตรวจสอบตรวจวัดจึงมีความยุ่งยากมาก ต้องมีการถอดมอเตอร์ออกมาเพื่อวัดซึ่งโดยมากไม่สามารถที่จะทำได้เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมต้องเดินเครื่องการผลิตตลอดเวลา ในปัจจุบันยังไม่ได้มีการศึกษาข้อมูลผลประหยัคจากการปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามมาตรการในการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมาตรการที่สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้สูงและภาครัฐได้ให้ความสำคัญและสนับสนุนซึ่งหากสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่หน้างานจริงโดยใช้เครื่องมือวัดพื้นฐาน ก็จะเป็นประโยชน์ในการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจน ทั้งนี้หากต้องการตรวจ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8

8th ECTI-CARD 2016, Hua Hin, Thailand

วิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้มีความแม่นยำสูงจะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ [1-2] ซึ่งมีความยุ่งยากมากในการเคลื่อนย้ายมอเตอร์ไปทดสอบ ส่วนการทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะการทำงานหนักงานได้มีวิธีการที่ใช้หลายรูปแบบ [3-9] ซึ่งมีความสะดวกและความแม่นยำที่แตกต่างกันในแต่ละวิธี ทั้งนี้วิธีการที่มีความสะดวกมากจะมีความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง ส่วนวิธีการที่มีความแม่นยำที่สูงขึ้นจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการตรวจวิเคราะห์ที่มากขึ้น

งานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สภาวะการทำงานจริง โดย ใช้ความสัมพันธ์ของกระแสและ โดลที่มีต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของมอเตอร์ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงานจริง ทั้งนี้การวิจัยได้ศึกษาวิธีการหาค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ด้วยวิธีกระแสและวิธีค่าโกล และศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสและค่าโกลกับกำลังไฟฟ้าขาออกของมอเตอร์ที่ประกอบด้วยมอเตอร์ขนาด 1.5 kW 11 kW 30 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่ มอเตอร์เก่า และมอเตอร์ที่ผ่านการพันขดลวด รวมจำนวน 9 ตัว นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอยทางสถิติระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและสัดส่วนกระแสของมอเตอร์กับกระแสพิกัด และระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกและสัดส่วนของค่าโกลกับค่าโกลที่พิกัด

ทั้งนี้ บทความนี้ได้รวบรวมและแสดงแนวทางการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสไว้ 5 หัวข้อที่ 2 และได้นำเสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์ถดถอยไว้ในหัวข้อที่ 3 โดยผลการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่นำเสนอได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4 ตามด้วยการสรุปผลการศึกษาวิจัยไว้ในหัวข้อที่ 5

2. การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส

ในปัจจุบัน วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในทางปฏิบัติและที่มีผู้เสนอไว้ประกอบด้วย วิธีการวัดแรงบิดที่เพลลา (Shaft Power Output) วิธีการตามแผ่นป้าย (Name Plat) วิธีการค่าโกล (Slip Method) วิธีการค่ากระแส (Current Method) วิธีการวงจรสมมูล (Equivalent Circuit Method) วิธีการแยกความสูญเสียวิธีการแรงบิดที่ช่องอากาศ (Air gap torque) [3-9]

วิธีการวัดแรงบิดที่เพลลา

การหาค่าประสิทธิภาพด้วยวิธีการวัดแรงบิดที่เพลลานั้นเป็นวิธีที่มีความถูกต้องและแม่นยำที่สุด [1-2] เพราะได้ค่ากำลังงานที่เพลลาจากการวัดโดยตรงและการหาประสิทธิภาพวิธีนี้จำเป็นต้องวัดความเร็วรอบมาด้วย วิธีนี้จะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเนื่องจากต้องใช้เครื่องทดสอบที่สามารถปรับค่าและวัดแรงบิด รวมทั้งความเร็วรอบของมอเตอร์ได้

วิธีการใช้ค่าตามแผ่นป้าย

วิธีการประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีข้อมูลจากแผ่นป้ายนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดสะดวกที่สุดจะใช้ค่าที่ทางผู้ผลิตได้กำหนดมาในแผ่นป้ายเพื่อหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้ [5] แต่วิธีนี้จะมีความคลาดเคลื่อนสูงในกรณีที่มอเตอร์ไม่ได้ทำงานตามพิกัด มอเตอร์ที่ใช้งานมาเป็นเวลานาน และมอเตอร์ที่ถูกพันขดลวดใหม่

วิธีการค่าโกล

วิธีการประเมินประสิทธิภาพจากค่าโกลของมอเตอร์ จะเป็นการเปรียบเทียบสัดส่วนกำลังงานขาออกของมอเตอร์จากค่าโกลที่สามารถคำนวณได้จากความเร็วรอบที่ตรวจวัด เทียบกับค่าโกลในขณะที่มอเตอร์ทำงานที่พิกัด [3-4] ซึ่งวิธีนี้จะสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์จากการวัดความเร็วรอบได้โดยไม่ต้องหยุดเดินเครื่องมอเตอร์ แต่จะมีความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง

วิธีการหาค่ากระแส

วิธีการประเมินประสิทธิภาพจากค่ากระแสของมอเตอร์ จะเป็นวิธีการประเมินกำลังงานขาออกของมอเตอร์โดยใช้หลักว่ากำลังงานขาออกของมอเตอร์จะแปรผันตรงกับค่าของกระแสที่มอเตอร์ใช้ [3-4] ซึ่งวิธีการนี้จะมีค่าคลาดเคลื่อนสูงเช่นกัน

วิธีการวงจรสมมูล

วิธีการวงจรสมมูลสามารถหาค่าจากการทดสอบ คือ การทดสอบแบบไม่มีโหลด การทดสอบแบบชัตโรเตอร์ หรืออาจใช้การหาค่าตัวแปรในวงจรสมมูลจากการวิเคราะห์ทางปัญญาประดิษฐ์ได้ [5-8] ซึ่งในการทดสอบที่หน้างานนั้นจะ ไม่มีความสะดวก ส่วนวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะใช้การคำนวณที่ซับซ้อนและต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

วิธีการแรงบิดที่ช่องอากาศ

วิธีการนี้อาศัยการตรวจวัดค่าแรงดันและกระแสเป็นช่วงเวลารวมถึงจำเป็นต้องทราบค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ แล้วจึงนำมาคำนวณหาค่าแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ [9] ซึ่งจะต้องใช้เครื่องบันทึกค่าทางไฟฟ้าแบบต่อเนื่องและต้องทำการวัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ซึ่งทำให้ต้องทำการหยุดเดินเครื่องมอเตอร์

จากวิธีการที่กล่าวมาแล้วนั้น ในโครงการวิจัยนี้จึงได้เสนอการศึกษาวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะทำงาน โดยไม่จำเป็นต้องหยุดเดินเครื่องมอเตอร์จากความสัมพันธ์ของกำลังงานขาออกกับกระแสที่มอเตอร์ใช้และความสัมพันธ์ของกำลังงานขาออกกับค่าโกลของมอเตอร์

3. วิธีการประเมินประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์ถดถอย

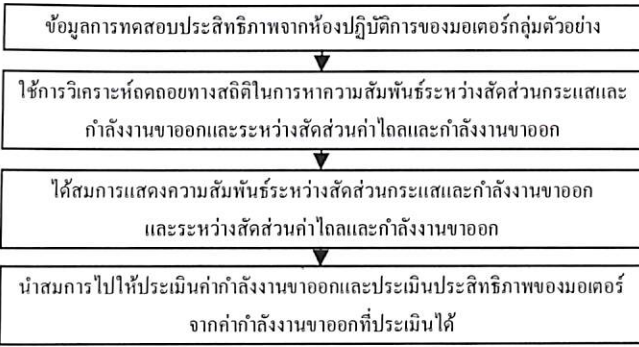
ในการวิเคราะห์ถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนกระแสและกำลังงานขาออก และระหว่างสัดส่วนค่าโกลและกำลังงานขา

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8

8th ECTI-CARD 2016, Hua Hin, Thailand

ออกของมอเตอร์จะใช้ข้อมูลผลการทดสอบเป็นกลุ่มตัวอย่างทางสถิติ ซึ่งจะสามารถแสดงวิธีการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์สำหรับวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย

ทั้งนี้สมการที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้สมการความสัมพันธ์

แบบเชิงเส้น ที่อยู่ในรูปของ

$$\frac{P_{out}}{P_{rated}} = A_I \frac{I}{I_{rated}} + B_I \quad (1)$$

และ

$$\frac{P_{out}}{P_{rated}} = A_S \frac{S}{S_{rated}} + B_S \quad (2)$$

โดยที่

P_{out} คือค่ากำลังงานขาออกของมอเตอร์ (W)

P_{rated} คือค่ากำลังงานพิกัดของมอเตอร์ (W)

I คือค่ากระแสที่มอเตอร์ใช้ (A)

I_{rated} คือค่ากระแสพิกัดมอเตอร์ใช้ (A)

S คือค่าโวลของมอเตอร์

S_{rated} คือค่าโวลของมอเตอร์ที่พิกัด

A_I, B_I, A_S, B_S คือค่าตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยทางสถิติ

จากนั้นสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้จาก

สมการ

$$\%Eff = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

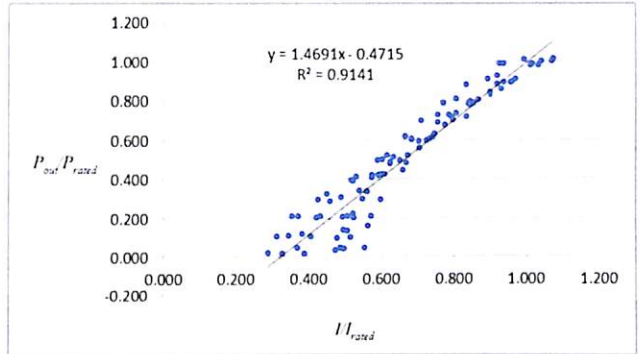
$\%Eff$ คือค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)

P_{in} คือค่ากำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ (kW)

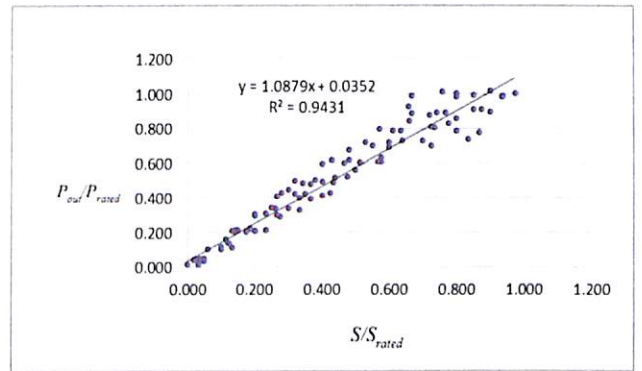
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์

จากผลการทดสอบมอเตอร์จำนวน 9 ตัว ประกอบด้วยมอเตอร์ขนาด 1.5 kW 11 kW และ 30 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่ มอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี และมอเตอร์ที่ผ่านการซ่อมบำรุงโดยพันขดลวดใหม่ โดยมีทดสอบที่สภาวะทำงาน 10 ตำแหน่งคือการจ่ายโวล 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, และ 100%

[4] ซึ่งนำผลการทดสอบมาหาความสัมพันธ์ของมอเตอร์แต่ละขนาดได้ดังรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์และผลการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยระหว่างสัดส่วนกระแสและกำลังงานขาออกของมอเตอร์



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์และผลการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยระหว่างสัดส่วนค่าโวลและกำลังงานขาออกของมอเตอร์

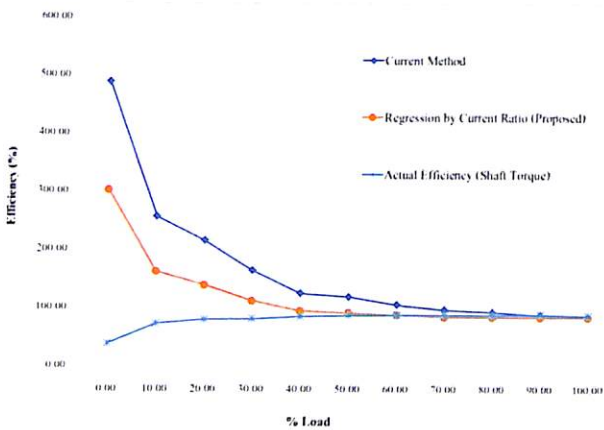
จากรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนกระแสและกำลังงานขาออกของมอเตอร์จะมีความคลาดเคลื่อนสูงในกรณีที่มอเตอร์ทำงานต่ำกว่าพิกัดมาก ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนค่าโวลและกำลังงานขาออกของมอเตอร์จะมีความคลาดเคลื่อนสูงในกรณีที่มอเตอร์ทำงานที่ใกล้พิกัด อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) ของทั้ง 2 วิธีมีค่าที่สูงถึง 0.9141 และ 0.9431 ซึ่งมากพอที่จะใช้ในการประเมินค่ากำลังงานขาออกของมอเตอร์จากการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยทั้ง 2 วิธี

ทั้งนี้เมื่อนำผลการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยที่ได้ไปประเมินโดยใช้กรณีศึกษาของมอเตอร์ขนาด 1.5 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่ สามารถแสดงผลการประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีการค่ากระแสเปรียบเทียบกับวิธีประเมินประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยค่ากำลังงานขาออกจากค่าสัดส่วนกระแส (ตามสมการในรูปที่ 2) ได้ดังรูปที่ 4 และ สามารถแสดงผลการประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีการค่าโวลเปรียบเทียบกับวิธีประเมินประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยค่ากำลังงานขาออกจากค่าสัดส่วนค่าโวล (ตามสมการในรูปที่ 3) ได้ดังรูปที่ 5

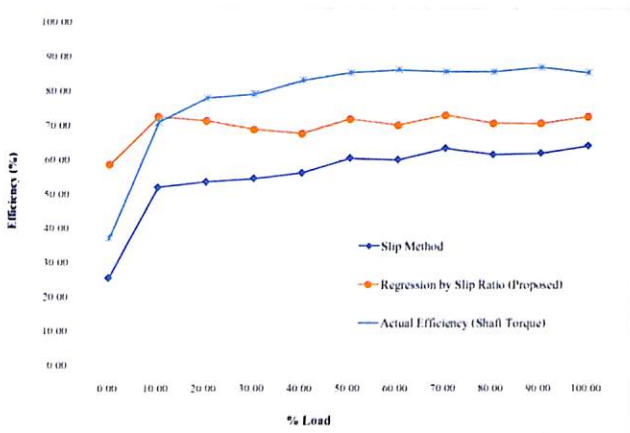
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8

8th ECTI-CARD 2016, Hua Hin, Thailand



รูปที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หาค่ากำลังงานขาออกจากค่าสัดส่วนกระแสของมอเตอร์ใหม่ขนาด 1.5 kW



รูปที่ 5 การประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หาค่ากำลังงานขาออกจากค่าสัดส่วนค่าไถลของมอเตอร์ใหม่ขนาด 1.5 kW

จากผลการศึกษาพบว่าวิธีการวิเคราะห์หาค่ากำลังงานขาออกจากความสัมพันธ์กับสัดส่วนกระแสให้ผลลัพธ์ในการคำนวณใกล้เคียงความจริงกว่าวิธีการกระแสแบบดั้งเดิม ในขณะที่วิธีการวิเคราะห์หาค่ากำลังงานขาออกจากความสัมพันธ์กับสัดส่วนค่าไถลให้ผลลัพธ์ในการคำนวณใกล้เคียงความจริงกว่าวิธีการค่าไถลแบบดั้งเดิม ทั้งนี้ พบว่าวิธีการที่วิเคราะห์จากค่าไถลจะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงกว่าวิธีการวิเคราะห์จากกระแสในกรณีที่มีมอเตอร์ทำงานที่ต่ำกว่าพิกัดมากคือต่ำกว่า 50% ของพิกัด ซึ่งในการใช้งานวิธีการวิเคราะห์หาค่าไถลได้จากเงื่อนไขการทำงานของมอเตอร์ดังกล่าวได้

5. สรุป

การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบวิธีการวิเคราะห์หาค่ากำลังงานขาออกความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานขาออกกับค่าสัดส่วนกระแสและกำลังงานขาออกกับสัดส่วนค่าไถล เพื่อนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ในขณะที่ทำงาน ซึ่งพบว่ามี

ความแม่นยำกว่าวิธีการกระแสและวิธีการค่าไถลแบบดั้งเดิม ซึ่งจะเป็นแนวทางที่สามารถต่อยอดศึกษาเพิ่มเติมให้เกิดการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส โดยไม่ต้องหยุดเดินเครื่องมอเตอร์ได้สะดวกและมีความแม่นยำที่ยอมรับได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณข้อมูลการทดสอบมอเตอร์จากโครงการวิจัย รหัส RDG57D0004 ของชุดโครงการร่วมสนับสนุนทุนวิจัย กฟผ.-สกว.

เอกสารอ้างอิง

- [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] วีระ สุทธิสิงห์ กิรติ ชยะกุลศิริ วิศวกร เสงศรีรัช และ เพชร นันทิวัฒนา "การศึกษาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะมีโหลดที่หน่วงงานโดยการใช้เครื่องมือวัดพื้นฐาน" การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ครั้งที่ 10 (SPUCON-2015), 22 ธันวาคม 2558.
- [5] 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.
- [6] Bin Lu, Student Member, 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.
- [7] S. Jangjit and P. Laohachai, "Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor by Using Generic Algorithm," Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 4, no. 3, pp. 360-364, 2009.
- [8] 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.
- [9] 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.

**การศึกษาวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะมีโหลดที่
สภาวะการทำงานจริงโดยการใช้เครื่องมือวัดพื้นฐาน**

**The Study Evaluated the Efficiency of Three-Phase Induction Motor as a Load to
the Actual Working Conditions by Using Basic Measuring Tools**

วีระ สุทธิสิงห์ (Veera Suttising)

นักศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: thongw87@gmail.com

กิริติ ชยะกุลคีรี (Keerati Chayakulkheelee)

**รองศาสตราจารย์ ผู้อำนวยการหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
และสิ่งแวดลอม มหาวิทยาลัยศรีปทุม**

E-mail: Keerati.ch@spu.ac.th

วิชชากร เฮงศรีธวัช (Vichakorn Hengsrithawal)

อาจารย์ประจำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: Vichakorn.he@spu.ac.th

เพชร นันทิวัดนา (Petch Nantiwattana)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: Petch.na@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการศึกษาการประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่อยู่ในสภาวะการทำงานจริงซึ่งประกอบด้วย วิธีการประเมินจากค่าโวลต์ และวิธีการประเมินจากค่ากระแส โดยในการประเมินทั้งสองรูปแบบจะใช้เครื่องมือวัดพื้นฐานในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบ ในการศึกษานี้จะใช้การทดสอบขนาดมอเตอร์ 1.5 kW, 11 kW และ 30 kW ในห้องปฏิบัติการที่สามารถวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยวิธีวัดแรงบิดที่เพลลาในการอ้างอิง จากการศึกษาแบบการประเมิน ประสิทธิภาพที่สภาวะการทำงานจริงของมอเตอร์ทั้งสองรูปแบบพบว่าแบบที่มีความเหมาะสมในการใช้ประเมิน ประสิทธิภาพของมอเตอร์ในสภาวะการทำงานที่ค่าตัวประกอบโหลดที่แตกต่างกันไป

คำสำคัญ : มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส, วิธีค่าโกล, วิธีการกระแส, การประเมินประสิทธิภาพที่สภาวะงานจริง

Abstract

This research paper present the study of three-phase induction motor efficiency evaluation during on-site condition induction motor efficiency evaluation. Both methods require only basic electrical measuring equipments, which are, voltage, current, power, and speed. In the study 1.5kW, 11kW and 30kW motors were tested in the laboratory by shaft-torque method for reference. The study shown that both method are suitable for different motor operating condition

Key words: Three-phase induction motor, slip method, current method, on-site condition efficiency evaluation

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ โรงงานอุตสาหกรรมและอาคารขนาดใหญ่ได้มีจำนวนมากขึ้นทั้งใหม่และเก่าต่างได้มีการนำเอามอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้งานในหลากหลายรูปแบบโดยเฉลี่ยแล้วประมาณ 80%-90% ของมอเตอร์ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมปัจจุบันที่ใช้งานเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะหาซื้อง่าย ต้องการการบำรุงรักษาต่ำดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์จึงสำคัญมาก เนื่องจากเป็นตัวต้นกำลัง โดยแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเพื่อขับโหลดต่างๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อติดตั้งมอเตอร์ไปแล้วการตรวจสอบตรวจวัดจึงมีความยุ่งยากมาก ต้องมีการถอดมอเตอร์ออกมาเพื่อวัดซึ่งโดยมากไม่สามารถที่จะทำได้เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมต้องเดินเครื่องการผลิตตลอดเวลา ในปัจจุบันยังไม่ได้มีการศึกษาข้อมูลผลประหยัดจากการปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นตัวเลขที่ชัดเจน แต่อย่างไรก็ตาม มาตรการในการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมาตรการที่สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้สูงและภาครัฐได้ให้ความสำคัญและสนับสนุนซึ่งหากสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่หน้างานจริงโดยใช้เครื่องมือวัดพื้นฐาน และเป็นที่ยอมรับของทุกฝ่าย ก็จะเป็นประโยชน์ในการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจนและเป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณ โดยผู้ประกอบการที่ใช้มอเตอร์จะได้ประโยชน์ในการได้ทราบถึงแนวทางในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนมาตรการอนุรักษ์พลังงานในมอเตอร์ได้ชัดเจน รวมทั้งบริษัทจัดการพลังงาน (Energy Service Company; ESCO) จะได้มีแนวทางในการตรวจประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์แบบ 3 เฟส สำหรับประเมินการสนับสนุนการลงทุนมาตรการอนุรักษ์พลังงานในมอเตอร์ ดังนั้นจึงได้มีการเสนอวิธีในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงาน ที่สามารถที่จะทำได้ขณะที่เครื่องยังทำงานอยู่หลายรูปแบบโดยมีความแม่นยำที่แตกต่างกันออกไปอาทิเช่น ประเมินจากแรงบิดที่ช่องอากาศ วิธีแผ่นป้าย วิธีการค่าโกล วิธีการค่ากระแสและวิธีการตรวจจรสมมูล [1-5]

งานวิจัยนี้จึงได้เป็นการศึกษาวิเคราะห์วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่สภาวะการทำงานจริงโดย วิธีการค่าโกล และวิธีการค่ากระแส น่าจะเหมาะสมกับการทำงานของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงานจริง

อย่างไรก็ตาม ควรมีแนวทางในการใช้งานอย่างไรจึงจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งจากการศึกษาทดลองเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า การประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีค่ากระแสจะมีความแม่นยำในกรณีที่มีมอเตอร์ทำงานเกิน 60% ของพิกัดขึ้นไป ส่วนการประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีค่าไถลจะมีความแม่นยำกว่าในกรณีที่มีมอเตอร์ทำงานต่ำกว่า 60% ของพิกัด

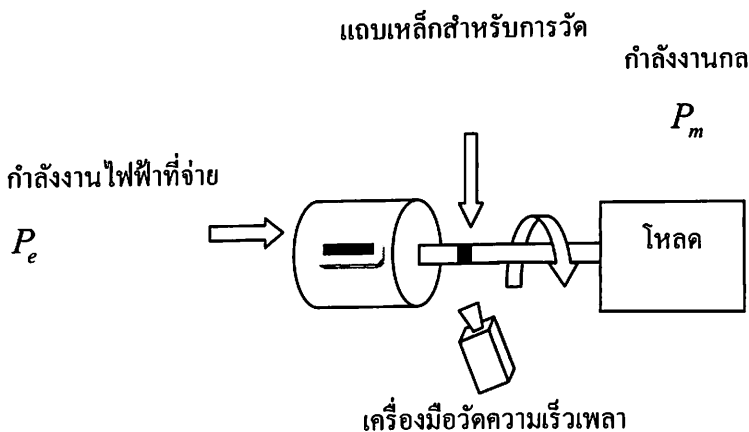
2. การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์

2.1 วิธีการหาค่าตามแผ่นป้าย (Name plate method)

วิธีการประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีข้อมูลจากแผ่นป้ายนี้ เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดสะดวกที่สุดจะใช้ค่าที่ทางผู้ผลิตได้กำหนดมาในแผ่นป้าย เพื่อหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้โดยเป็นการถือว่า ประสิทธิภาพของมอเตอร์มีค่าคงที่ตลอด ตามที่ผู้ผลิตระบุไว้บนแผ่นป้าย ซึ่งวิธีนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง

2.2 วิธีการค่าไถล (Slip method)

เป็นวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์กับความเร็วมอเตอร์ (Rate Speed) ที่มีความแม่นยำกว่าวิธีหาค่าตามแผ่นป้าย โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วรอบจริงและการใช้สมการพื้นฐานในการคำนวณหาความเร็วรอบที่เพลา ดังสมการที่ (1) โดยการตรวจวัดดังแสดงภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 การตรวจวัดความเร็วรอบเพลาเพื่อหาค่าไถลของมอเตอร์

$$P_m = \frac{S}{S_{rated}} \times P_m^{rated} \tag{1}$$

เมื่อ
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

และ
$$S_{rated} = \frac{n_s - n_r^{rated}}{n_s}$$

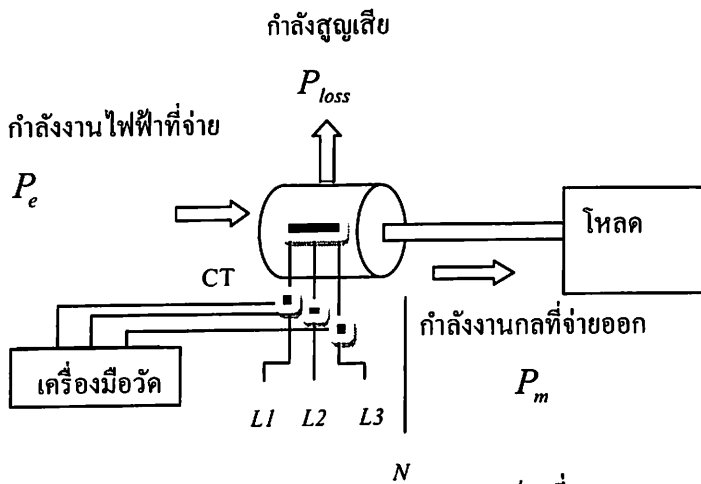
จากนั้นนำค่าที่ได้ประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ตามสมการที่ (2)

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \times 100 \% \tag{2}$$

โดยที่	P_e	คือ กำลังงานไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้ามอเตอร์ (W)
	P_m	คือ กำลังงานกลออกที่เพลของมอเตอร์ (W)
	n_s	คือ ความเร็วซิงโครนัสมอเตอร์ (รอบต่อนาที, rpm)
	n_r	คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ทำงาน (รอบต่อนาที, rpm)
	n_r^{rated}	คือ ความเร็วรอบพิกัดของมอเตอร์ (รอบต่อนาที, rpm)
	S	คือ ค่าไถลที่วัดได้
	S_{rated}	คือ ค่าไถลที่พิกัดของมอเตอร์
	η	คือ ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)

2.3 วิธีการค่ากระแส (Current method)

วิธีการค่ากระแสเป็นวิธีการหาค่ากำลังเอาต์พุตของมอเตอร์ โดยใช้เครื่องมือวัดคล่องขณะที่ยังทำงานอยู่ได้ โดยใช้หลักการที่ว่า กำลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์จ่ายจะแปรผันตรงกับค่าของกระแสที่มอเตอร์โดยหาได้จากสมการที่ (3) และการตรวจวัดจะใช้เครื่องมือที่อ่านค่าได้ ดังแสดงภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 การวัดค่ากระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$P_m = \frac{I}{I_{rated}} \times P_m^{rated} \tag{3}$$

จากนั้น นำค่าที่ได้ประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ตามสมการที่ (2)

โดยที่	I_{rated}	คือ กระแสพิกัดมอเตอร์ (A)
	I	คือ กระแสที่วัดได้ (A)
	P_m^{rated}	คือ พิกัดกำลังงานกลของมอเตอร์ (W)

จากสมการนี้ จะมีค่าคาคดเคลื่อนสูงมากเนื่องจากที่สมการคำนวณเป็นสมการเส้นตรง แต่ในความเป็นจริงกระแสกับกำลังเอาต์พุตไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน จึงมีการปรับปรุงสมการให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยนำกระแส No-load เข้ามาพิจารณา ดังสมการที่ (4)

$$P_m = \frac{I - I_{nl}}{I_{rated} - I_{nl}} \times P_m^{rated} \quad (4)$$

โดยที่ I_{nl} คือ กระแสขณะไม่มีโหลด(A)
 P_m^{rated} คือ พิกัดกำลังงานกลของมอเตอร์ (W)

2.4 วิธีการวัดกำลังงานที่เพล่า ในห้องปฏิบัติการ

การหาค่าประสิทธิภาพด้วยวิธีการวัดแรงบิดที่เพล่า นี้เป็นวิธีที่มีความถูกต้องและแม่นยำที่สุด เพราะได้ค่ากำลังงานที่เพล่าจากการวัดโดยตรง และการหาประสิทธิภาพวิธีนี้จำเป็นต้องวัดความเร็วรอบมาด้วยวิธีนี้ นิยมทำในห้องปฏิบัติการ ดังสมการที่ (5)

$$P_m = T \times \omega \quad (5)$$

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times N}{60} \quad (6)$$

โดยที่ ω คือ ความเร็วรอบเชิงมุม (rad. / sec)
 T คือ แรงบิดที่เพล่า (N-m)

จากนั้นนำค่า P_m ไปประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ตามสมการที่ (2)

จากวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.1-2.4 นั้นจะเห็นว่า วิธีการในหัวข้อที่ 2.4 เป็นวิธีหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่แม่นยำที่สุด แต่ต้องนำมอเตอร์ไปทดสอบในห้องปฏิบัติการและนอกจากนี้การใช้งานของมอเตอร์อาจจะต่างจากสถานะในห้องปฏิบัติการได้ และโดยมากจะไม่ทราบค่ากำลังงานกลที่มอเตอร์จ่ายแก่โหลดในสถานะจริง

ดังนั้น วิธีการในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3 จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการใช้ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ เหนี่ยวนำที่สถานะการทำงานจริง อย่างไรก็ตาม วิธีการทั้ง 2 นี้ยังไม่ได้มีการศึกษาในเชิงลึกเพื่อให้เกิดข้อแนะนำในการใช้งานที่เหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการมุ่งเน้นการศึกษาวิเคราะห์แนวทางการนำวิธีทั้ง 2 วิธีมาประยุกต์ใช้งานในการตรวจวิเคราะห์ ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สถานะการทำงานจริง

3. การเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูลนี้ได้ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่หน่วยงานจริง ในการเก็บข้อมูลจะใช้มอเตอร์อยู่ 3 ขนาดคือ 1.5 kW, 11 kW และ 30 kW เนื่องจากห้องทดสอบที่ใช้สามารถทดสอบมอเตอร์ได้ขนาดสูงสุดได้ 30kW และในมอเตอร์ขนาดเล็กกว่า 1.5 kW โดยมากจะเป็นมอเตอร์ที่ติดตั้งมาพร้อมอุปกรณ์จึงไม่ได้

นำมาศึกษา โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้ห้องปฏิบัติการทดสอบมอเตอร์ของ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล ด้วยวิธีการวัดกำลังงานกลที่มอเตอร์จ่าย จากการวัดแรงบิดที่เพลลา (Shaft Torque) ที่สภาวะการทำงานต่างๆเพื่อเป็นค่าใช้อ้างอิง โดยแสดงข้อมูลได้ดังตาราง 1-6 ในการทดสอบ ประสิทธิภาพมอเตอร์ได้ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน IEEE-112 และ IEC60034 ซึ่งผลลัพธ์ค่าประสิทธิภาพที่ได้ถือว่าเชื่อถือได้และใช้ในการอ้างอิงวิธีการที่ศึกษา

ตาราง 1 ข้อมูลคุณลักษณะของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบขนาด 1.5 kW

Information	Value	Unit	Name plate figure
Rated Voltage	380	V	
Rated Current	3.4	A	
Rated Power Output	1.5	kW	
Power Factor	0.82	Lagging	
Speed at Rated	1430	Rpm	
Number of pole	4	Pole	
Efficiency	81.74	%	
			Maximum Torque
			10.02 N-m

ตาราง 2 แสดงข้อมูลคุณลักษณะของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบขนาด 11 kW

Information	Value	Unit	Name plate figure
Rated Voltage	380	V	
Rated Current	21.73	A	
Rated Power Output	11	kW	
Power Factor	-	Lagging	
Speed at Rated	1460	Rpm	
Number of pole	4	Pole	
			Maximum Torque
Efficiency	NA	%	72 N-m

ตาราง 3 แสดงข้อมูลคุณลักษณะของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบขนาด 30 kW

Information	Value	Unit	Name plate figure
Rated Voltage	400	V	
Rated Current	56	A	
Rated Power Output	30	kW	
Power Factor	0.85	Lagging	
Speed at Rated	1470	RPM	
Number of pole	4	Pole	
			Maximum Torque
Efficiency	90.97	%	195 N-m

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบมอเตอร์ในหัวข้อที่ 3 ได้นำมาวิเคราะห์ตามวิธีในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3 สามารถแสดงได้ดังตาราง 4-6 และแสดงค่าประสิทธิภาพที่สภาวะการทำงานต่างๆ ของมอเตอร์ ดังภาพประกอบ 3-5

ตาราง 4 แสดงข้อมูลการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้วิธีการค่าโถงและค่ากระแสมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1.5 kW

Actual Load (%)	Loading Point (%)	Eff. Test Conditions (%)	Slip Method สมการที่ (1) และ(2)		Current Method สมการที่ (3) และ(2)		Modified Current Method สมการที่ (4) และ(2)	
			Eff. (%)	Error (%)	Eff. (%)	Error (%)	Eff. (%)	Error (%)
4.20	1	36.90	25.21	11.69	487.89	-450.99	504.58	-467.68
15.60	2	71.00	51.95	19.05	255.35	-184.35	264.76	-193.76
20.80	3	78.00	53.57	24.43	213.97	-135.97	221.85	-143.85
29.07	4	79.20	54.55	24.65	162.83	-83.63	169.26	-90.06
44.40	5	83.20	56.25	26.95	123.53	-40.33	127.43	-44.23
48.40	6	85.50	60.50	25.00	117.82	-32.32	121.85	-36.35
61.60	7	86.30	60.08	26.22	103.90	-17.60	107.46	-21.16
71.47	8	85.80	63.43	22.37	95.29	-9.49	98.80	-13.00
79.53	9	85.80	61.66	24.14	91.09	-5.29	94.69	-8.89
92.40	10	87.10	61.99	25.11	86.57	0.53	90.22	-3.12
101.00	11	85.60	64.16	21.44	84.00	1.60	87.76	-2.16

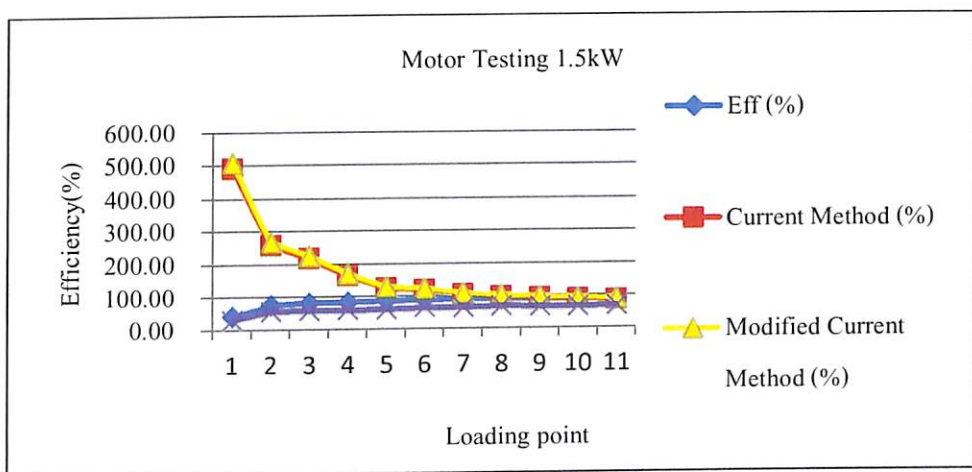
ตาราง 5 แสดงข้อมูลการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้วิธีการค่าโถงและค่ากระแสมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 11 kW

Actual Load (%)	Loading point (%)	Eff. Test Conditions (%)	Slip Method สมการที่ (1) และ(2)		Current Method สมการที่ (3) และ(2)		Modified Current Method สมการที่ (4) และ(2)	
			Eff. (%)	Error (%)	Eff. (%)	Error (%)	Eff. (%)	Error (%)
3.27	1	26.32	40.15	-13.83	380.58	-354.26	391.60	-365.28
9.64	2	54.53	56.41	-1.88	269.98	-215.45	277.08	-222.55
20.45	3	71.10	69.62	1.48	171.41	-100.31	175.02	-103.92
33.45	4	78.61	70.51	8.10	131.96	-53.35	134.39	-55.78
42.27	5	82.88	83.19	-0.31	118.90	-36.02	120.15	-37.27
51.82	6	85.32	78.10	7.22	110.47	-25.15	111.35	-26.03
62.91	7	88.44	80.78	7.66	104.73	-16.29	105.01	-16.57
70.00	8	89.15	92.41	-3.26	101.48	-12.33	101.21	-12.06
82.55	9	91.29	85.68	5.61	99.21	-7.92	98.69	-7.40
85.82	10	91.38	85.11	6.27	98.89	-7.51	97.85	-6.47
101.36	11	91.45	81.15	10.30	96.68	-5.23	95.66	-4.21

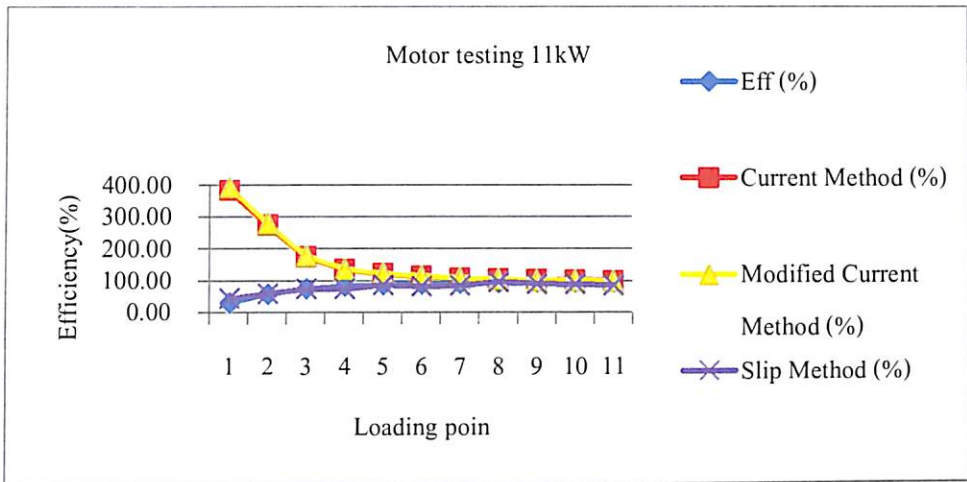
ตาราง 6 แสดงข้อมูลการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้วิธีการค่าโกลและค่ากระแสมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW

Actual Load (%)	Loading point (%)	Eff. Test Conditions (%)	Slip Method สมการที่ (1) และ(2)		Current Method สมการที่ (3) และ(2)		Modified Current Method สมการที่ (4) และ(2)	
			Eff. (%)	Error (%)	Eff. (%)	Error (%)	Eff. (%)	Error (%)
1.47	1	20.57	0.00	20.57	543.99	-523.42	531.75	-511.18
10.23	2	63.13	61.66	1.47	249.96	-186.83	242.46	-179.33
20.60	3	86.87	56.19	30.68	182.11	-95.24	174.82	-87.95
30.30	4	87.11	67.05	20.06	140.09	-52.98	133.08	-45.97
40.70	5	87.83	57.54	30.29	123.68	-35.85	117.50	-29.67
47.80	6	89.37	68.56	20.81	116.53	-27.16	110.71	-21.34
55.97	7	90.10	80.52	9.58	113.30	-23.20	107.63	-17.53
71.87	8	90.27	75.36	14.91	104.52	-14.25	97.99	-7.72
78.53	9	90.18	72.72	17.46	97.81	-7.63	91.69	-1.51
88.30	10	90.38	68.24	22.14	93.95	-3.57	88.08	2.30
98.63	11	90.56	61.21	29.35	93.13	-2.57	87.08	3.48

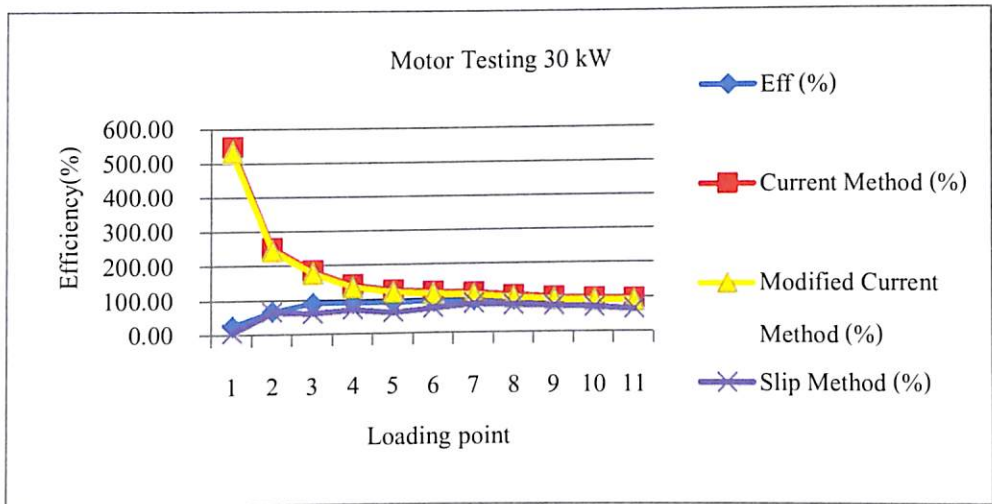
จากข้อมูลการบันทึกในตารางที่ 4-6 นำมาพล็อตกราฟเพื่อหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ดังกล่าวประกอบ 3-5



ภาพประกอบ 3 กราฟแสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1.5 kW



ภาพประกอบ 4 กราฟแสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 11 kW



ภาพประกอบ 5 กราฟแสดงประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 30 kW

จากข้อมูลที่ศึกษามาจะเห็นได้ว่าเมื่อนำค่าที่ได้จากการบันทึกข้อมูลจากหน้างานนำมาพล็อตกราฟดังภาพประกอบ 3-5 แล้วในช่วงไม่เกิน 60% สามารถใช้วิธีการประเมินโหลดหาประสิทธิภาพมอเตอร์ได้ใกล้เคียงกว่าวิธีการประเมินค่ากระแส ส่วนกรณีมอเตอร์ทำงานเกินกว่า 60% ขึ้นไป วิธีการเสจะใกล้เคียงกว่าวิธีการประเมินค่าโหลดและวิธีการกระแสที่มีการปรับปรุงตามสมการที่ (4) จะให้ผลการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ดีกว่าวิธีการกระแส

ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่สภาวะการทำงานจริง ด้วยวิธีการค่าโหลด และวิธีการค่ากระแส จึงขึ้นอยู่กับ โหลด (Load Factor) ที่มอเตอร์ทำงานอยู่โดยสามารถใช้นี้แนวทางดังต่อไปนี้

1) ทำการตรวจวัดค่ากระแส, แรงดัน, ความเร็วรอบและกำลังไฟฟ้าจริงของมอเตอร์

2) ประเมินค่าตัวประกอบโหลดของมอเตอร์ว่าอยู่ในช่วงใดจากค่ากระแสคือ

$$LF = \frac{I}{I_{rated}} \times 100\%$$

เมื่อ LF คือค่าตัวประกอบโหลดของมอเตอร์ (%)

3) ถ้า $LF > 60\%$ ให้ประเมินประสิทธิภาพตามวิธีการในสมการที่ (3) และสมการที่ (2)

4) ถ้า $LF \leq 60\%$ ให้ประเมินประสิทธิภาพตามวิธีการในสมการที่ (1) และสมการที่ (2)

5. สรุปการทดลอง

การทดสอบ จะเห็นว่าเมื่อสตาร์ทมอเตอร์วิธีการค่าโหลดในช่วง 10%-60% จะมีค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ เนื่องจากวิธีค่าโหลดกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทจะแปรผันตามกับค่าความเร็วที่เพลาหมุน ส่วนวิธีการค่ากระแสในช่วงสตาร์ทประสิทธิภาพจะกระโดดควบคุมไม่ได้และหลังจาก 60% ขึ้นไปเมื่อมอเตอร์อยู่ในสถานะคงที่ประสิทธิภาพจะมีค่าใกล้เคียงค่ากับค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ เป็นเพราะว่าวิธีการค่ากระแสกำลังเอาท์พุทแปรผันตรงกับค่ากระแส จากผลการทดสอบจะใช้เป็นแนวทางในการตรวจสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ได้ติดตั้งใช้งานไปแล้ว เพื่อที่จะได้ใช้พลังงานให้คุ้มค่าและประหยัดมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบมอเตอร์ จากโครงการวิจัยเรื่องการพัฒนา รูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส สภาวะทำงานจริงสำหรับการวิเคราะห์ มาตรการอนุรักษ์พลังงาน ชุดโครงการร่วมสนับสนุนทุนวิจัย กฝภ. - สกว.

7. เอกสารอ้างอิง

- Phumiphak. T. and Chat - uthai. C. 2002, Oct. "Estimation of Induction Motor Parameters Based on Field Test Coupled with Genetic Algorithm." Proceedings of 2002 International Conference on Power System Technology, Power Con 2002. (2), 1199-1203. Kunming, China.
- Hsu. J. S. and Scoggins. B. P. 1995, September, "Field test of motor efficiency and load changes through air-gap torque." IEEE Trans. Energy Conversion, 10(3), 471-477.
- Falkner. H. 2000, November, "Promoting High Efficiency Motors in Europe: The role of the Copper Industry." ETSU. European Copper Institute, 13.
- The U.S. Department of Energy. n.d. "Electric Motor Determining Load and Efficiency." Fact Sheet, Available Online: www.motor.doe.gov.
- Gastli. A. 1999, March. "Identification of Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Using the Single-Phase test." IEEE Transactions on Energy Conv. 14(1), 51-56.