

การประเมินวิธีการประมาณภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในสถานะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุลและไม่สมดุล

Load Evaluation of Three-Phase Induction Motor In case of Balanced and Unbalanced Voltage Supplies

สถิลทิพย์ สิ้นธุสนธิชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 โทรศัพท์ 02-9883666 ต่อ 3305
E-mail: salitip@mut.ac.th

Manuscript received November 2, 2019
Revised December 15, 2019

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประเมินวิธีการประมาณภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะแรงดันไฟฟ้าสมดุล และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยอ้างอิงการคำนวณความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459 - 2010 ในการประมาณภาระทางกลใช้การเปรียบเทียบ 4 วิธีด้วยกันคือ วิธีการคำนวณด้วยค่ากำลังไฟฟ้าอินพุท วิธีการคำนวณด้วยค่ากระแสไฟฟ้า วิธีการคำนวณด้วยค่าความเร็วสลลิป และวิธีการคำนวณด้วยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาทั้งในกรณีที่มี และไม่มีค่าตัวประกอบความถูกต้องของแรงดันไฟฟ้า (Voltage correcting factor) เข้ามาร่วมด้วย ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาเลือกวิธีการประมาณภาระทางกลของมอเตอร์ให้มีความใกล้เคียงผลการทดสอบจริงมากที่สุดในทุกสถานะของความสมดุล และไม่สมดุลของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

คำสำคัญ : การประมาณภาระทางกลของมอเตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แรงดันไฟฟ้าสมดุล และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ABSTRACT

This paper proposes load evaluation of three-phase induction motor in case of balanced and unbalanced voltage supplies. The voltage unbalance is based on IEEE 114 - 2010 standard. Four load calculation methods; Input Power Method (IPM), Current Method (CM), Slip Speed Method (SSM), and Power Factor

Method (PFM) are investigated with and without a voltage correcting factor. The calculated results are compared with the experimental results. It is found to be useful for motor load estimation in all cases of voltage source conditions.

Keywords: load evaluation, three-phase induction motor, balanced and unbalanced voltage

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นมอเตอร์ที่ถูกนิยมใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม ตลอดจนอาคารสำนักงานและที่อยู่อาศัย ในอุตสาหกรรมทั่ว ๆ ไป ส่วนใหญ่นิยมนำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาใช้งาน เนื่องจากมีพิภพการใช้งานที่หลากหลายมีพิภพตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ทำให้สามารถเลือกขนาดมอเตอร์ให้ใกล้เคียงเหมาะสมกับขนาด และคุณลักษณะของเครื่องจักรภายในโรงงานอุตสาหกรรมได้

ในการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดพิภพกำลังมอเตอร์ที่ต้องใช้ติดตั้งจริงนั้น ผู้ออกแบบมักจะเลือกขนาดมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดกำลังที่ต้องใช้งานจริง เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับมอเตอร์ โดยทั่วไปมอเตอร์ที่มีขนาดพิภพกำลังมาก มักมีพิสัยช่วงประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์ขนาดเล็ก งานวิจัย [1-3] ยืนยันอย่างชัดเจนว่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์จะมีค่าสูงเมื่อภาระทางกลของมอเตอร์มีค่าประมาณ 75% - 100% ของพิภพกำลัง และเมื่อภาระทางกลมีค่าต่ำกว่า 40% ของพิภพกำลังค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดต่ำลงค่อนข้างมาก ในการศึกษาเพื่อ

คำนวณหาค่าภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะที่มอเตอร์ทำงานอยู่ให้ถูกต้องแม่นยำนั้น เป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้า และประเมินศักยภาพการใช้งานของมอเตอร์ทั้งในแง่ของการพิจารณาความเหมาะสมของขนาดพิกัดมอเตอร์ที่ใช้งานอยู่ และการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน รวมทั้งปัจจุบันมีพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2535 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ.2550) ได้กำหนดให้ต้องมีการประเมินศักยภาพการใช้พลังงานของเครื่องจักรที่มีการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการประเมินภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าจริงของมอเตอร์จึงเป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญ และจำเป็นอย่างยิ่ง

ในการคำนวณเพื่อประมาณค่าภาระทางกลของมอเตอร์ในสภาวะการทำงานจริงมีหลายวิธี [4] – [7] แต่อย่างไรก็ตาม ในระบบไฟฟ้าจริงโดยทั่วไปแล้ว แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสมักมีค่าไม่คงที่ ทำให้ระบบไฟฟ้าสามเฟสมีแรงดันไฟฟ้าจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเนื่องจากภาระไฟฟ้าในระบบมีทั้งภาระไฟฟ้าที่เป็นระบบหนึ่งเฟส และระบบสามเฟส เมื่อผู้ใช้ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสก็จะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทำให้เกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล ดังนั้นการประมาณค่าภาระทางกลของมอเตอร์ให้ได้ค่าตรงกับค่าจริงมากที่สุดจึงเป็นประโยชน์ทั้งในด้านการตรวจสอบการออกแบบระบบ ความเหมาะสมของขนาดมอเตอร์ และการประเมินศักยภาพของระบบไฟฟ้า

บทความนี้เป็นการศึกษาเพื่อประเมินวิธีการประมาณภาระทางกลของมอเตอร์ที่แตกต่างกัน 4 วิธี คือ วิธีการคำนวณด้วยค่ากำลังไฟฟ้าอินพุท วิธีการคำนวณด้วยค่ากระแสไฟฟ้า วิธีการคำนวณด้วยค่าสลิป และวิธีการคำนวณด้วยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยนำค่าที่ได้จากการประมาณแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง โดยวิเคราะห์สภาวะการทำงานตั้งแต่มอเตอร์ไม่มีภาระทางกล จนถึงรับภาระทางกลเต็มพิกัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ ภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุล และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในรูปแบบต่าง ๆ โดยอ้างอิงวิธีการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 [7] ซึ่งจะทำให้สามารถประเมินสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสให้ถูกต้อง และแม่นยำเป็นไปตามการใช้งานจริงของมอเตอร์มากที่สุด ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการประเมินความเหมาะสมของขนาดของมอเตอร์ที่นำมาใช้ได้อย่างถูกต้อง

2. ประเภทของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส

ประเภทของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส มี 8 ประเภทดังนี้ [8]

1) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าต่ำหนึ่งเฟส (Single-phase Under Voltage Unbalance) เกิดขึ้นกรณีมีภาระทางกลไฟฟ้า

ขนาดใหญ่ในระบบหนึ่งเฟส และไม่สามารถชดเชยขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบให้เพียงพอทำให้เกิด แรงดันไฟฟ้าในเฟสใดเฟสหนึ่งต่ำกว่าอีกสองเฟส

2) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าต่ำสองเฟส (Two-phase Under Voltage Unbalance) เกิดขึ้นกรณีมีภาระทางกลไฟฟ้าขนาดใหญ่ในระบบสองเฟส และไม่สามารถชดเชยขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบให้เพียงพอ ทำให้เกิด แรงดันไฟฟ้าตกที่ระบบทั้งสองเฟสเป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าทั้งสองเฟสมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าของเฟสที่สาม

3) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าต่ำทั้งสามเฟส (Three-phase Under Voltage Unbalance) ถ้าในระบบปรับภาระทางกลขนาดใหญ่ทั้งสามเฟสมากเกินไป จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าต่ำทั้งสามเฟส

4) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินหนึ่งเฟส (Single-phase Over Voltage Unbalance) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบที่ค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้า โดยปกติจะใช้ตัวเก็บประจุในการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบ แต่ถ้าหากเฟสใดเฟสหนึ่งของระบบไฟฟ้าสามเฟสมีการชดเชยที่มากเกินไปจะทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินที่เฟสนั้น

5) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินสองเฟส (Two-phase Over Voltage Unbalance) กรณี แรงดันไฟฟ้าสองเฟสจากสามเฟสถูกชดเชยแรงดันไฟฟ้ามากเกินไป จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินที่สองเฟสนั้น

6) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินสามเฟส (Three-phase Over Voltage Unbalance) กรณีแรงดันไฟฟ้าสามเฟสถูกชดเชยด้วยแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดแรงดันสูงเกินกว่าค่าพิกัดและค่าจะไม่เท่ากัน ถ้ากรณีนี้เกิดขึ้นจะต้องปิดระบบไฟฟ้า และทำการปลดตัวเก็บประจุออกจากระบบไฟฟ้า

7) ระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีค่าองศาทางไฟฟ้าไม่เท่ากัน (Unequal Single-phase Angle Displacement) โดยปกติแรงดันไฟฟ้าที่สมดุลจะมีมุมระหว่างเฟสต่าง 120 องศาทางไฟฟ้า ถ้าเกิดมีเฟสใดเฟสหนึ่งจากสามเฟสมีค่าองศาทางไฟฟ้าที่หันเหไปจากปกติ ทำให้เกิดมุมที่ไม่เท่ากันหนึ่งเฟส

8) ระบบไฟฟ้าในระบบสองเฟสที่มีค่ามุมไม่เท่ากัน (Unequal Two-phase Angle Displacement) ถ้ามุมทางไฟฟ้าของเฟสมีค่ามุมหันเหไปจากปกติสองเฟสทำให้เกิดมุมที่ไม่เท่ากันสองเฟส

3. วิธีการคำนวณเพื่อประมาณภาระทางกลของมอเตอร์

วิธีการคำนวณเพื่อใช้ทำนายภาระทางกลให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าจริงของมอเตอร์นั้นมีด้วยกันหลายวิธี โดยวิธีการเหล่านั้นมักจะถูกพิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีความ

สมดุล ในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะนำค่าตัวประกอบความถูกต้องของแรงดันไฟฟ้า (Voltage correcting factor) เข้ามาคำนวณร่วมด้วย

3.1 วิธีคำนวณด้วยค่ากำลังไฟฟ้าอินพุท (Input power Method; IPM)

ในการคำนวณหาค่าภาระทางกลด้วยกำลังไฟฟ้าอินพุทมี 2 วิธีคือ

3.1.1 วิธีคำนวณด้วยค่ากำลังไฟฟ้าจริง (IPM_{exact}) ใช้ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของแต่ละเฟสมารวมกัน ($P_{in,total}$) นั่นคือ

$$P_{in,total} = P_{in,A} + P_{in,B} + P_{in,C}$$

หลังจากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ภาระทางกลดังนี้

$$\% Load of IPM_{exact} = \frac{P_{in,total}}{P_{in,nameplate}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

$$P_{in,nameplate} = \sqrt{3} V_{nameplate} I_{nameplate} PF_{nameplate} \quad (2)$$

โดยที่

$P_{in,nameplate}$ คือ กำลังไฟฟ้าอินพุทที่คำนวณได้จากแผ่นป้ายมอเตอร์
 $V_{nameplate}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่พิกัดได้จากแผ่นป้ายมอเตอร์
 $I_{nameplate}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่พิกัดได้จากแผ่นป้ายมอเตอร์
 $PF_{nameplate}$ คือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่พิกัดได้จากแผ่นป้ายมอเตอร์

3.1.2 วิธีคำนวณด้วยค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (IPM_{avg}) วิธีการนี้เป็นการนำค่าแรงดันไฟฟ้าไลน์เฉลี่ย ($V_{L,avg}$) กระแสไฟฟ้าไลน์เฉลี่ย ($I_{L,avg}$) และตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (PF_{avg}) มาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทเฉลี่ย ($P_{in,avg}$) ถ้ากำหนดให้ V_{AB}, V_{BC} และ V_{CA} เป็นแรงดันไฟฟ้าไลน์ AB, BC และ CA ตามลำดับ ค่าของแรงดันไฟฟ้าไลน์เฉลี่ย $V_{L,avg} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{3}$ และ I_A, I_B และ I_C เป็นกระแสไฟฟ้าไลน์ A, B และ C ค่าของ $I_{L,avg} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}$ ส่วน PF_A, PF_B และ PF_C คือตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเฟส A, B และ C จะได้ว่า

$$PF_{avg} = \frac{PF_A + PF_B + PF_C}{3}$$

อินพุทเฉลี่ยได้โดยใช้ดังสมการที่ 3

$$P_{in,avg} = \sqrt{3} V_{L,avg} I_{L,avg} PF_{avg} \quad (3)$$

ดังนั้นการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ภาระทางกลด้วยวิธีการนี้สามารถคำนวณได้เป็นดังสมการที่ 4 นั่นคือ

$$\% Load of IPM_{avg} = \frac{P_{in,avg}}{P_{in,nameplate}} \times 100 \quad (4)$$

3.2 วิธีคำนวณด้วยค่ากระแสไฟฟ้า (Current Method; CM)

วิธีการนี้เป็นการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ขณะใช้งาน เพื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าพิกัดที่ได้จากแผ่นป้ายมอเตอร์ สามารถคำนวณได้ 2 วิธี คือ

3.2.1 วิธีคำนวณด้วยค่ากระแสไฟฟ้าแบบพื้นฐาน (Current Method Without Compensation; CMwo)

วิธีการนี้นำกระแสไฟฟ้าไลน์ที่ได้จากการวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าในไลน์ A, B และ C มาคำนวณหากระแสไฟฟ้าไลน์เฉลี่ย ($I_{L,avg}$) ซึ่งคำนวณได้จาก $I_{L,avg} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}$ หลังจากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ภาระทางกลดังนี้คือ

$$\% Load of CM_{wo} = \frac{I_{L,avg}}{I_{nameplate}} \times 100 \quad (5)$$

3.2.2 วิธีคำนวณด้วยค่ากระแสไฟฟ้าแบบชดเชยแรงดัน (Current method with Voltage Compensation; CMw)

วิธีการนี้เป็นการนำวิธีที่ 3.2.1 มาปรับปรุง เนื่องจากขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดแต่ละขดของมอเตอร์ ดังนั้นจึงนำคุณสมบัติของแรงดันไฟฟ้ามาใช้ในการคำนวณ โดยใช้อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดบนแผ่นป้ายมอเตอร์ ซึ่งถูกเรียกว่าค่าตัวประกอบความถูกต้องของแรงดันไฟฟ้า ($\frac{V_{L,avg}}{V_{nameplate}}$) มาคำนวณร่วมด้วย ได้สมการที่ใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ภาระทางกลมอเตอร์เป็นดังสมการที่ 6

$$\% \text{Load of } CM_w = \left(\frac{I_{L,avg}}{I_{nameplate}} \right) \times \left(\frac{V_{L,avg}}{V_{nameplate}} \right) \times 100 \quad (6)$$

3.3 วิธีคำนวณด้วยค่าความเร็วสลลิป (Slip Speed Method : SSM)

วิธีการนี้เป็นการวัดความเร็วที่แกนเพลลามอเตอร์ขณะใช้งาน เพื่อนำค่าสลลิปที่ได้มาคำนวณเปรียบเทียบกับค่าความเร็วสลลิปที่กักได้จากแผ่นป้ายมอเตอร์ สามารถคำนวณได้ 2 วิธีคือ

3.3.1 วิธีคำนวณด้วยค่าความเร็วสลลิปแบบพื้นฐาน (Slip Speed Method Without Compensation; SSMwo)

วิธีการนี้ใช้ผลต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนกับความเร็รรอบของเพลลามอเตอร์ขณะใช้งาน มาเปรียบเทียบกับผลต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนกับความเร็รรอบของมอเตอร์รับภาระทางกลเต็มพิกัดที่ได้จากแผ่นป้ายมอเตอร์ สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังแสดงในสมการที่ 7

$$\% \text{Load of } SSM_{wo} = \frac{N_{syn} - N_{r,measured}}{N_{syn} - N_{r,nameplate}} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ N_{syn} คือ ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนคำนวณได้จาก

$$N_{syn} = \frac{120f}{P} \quad (8)$$

ถ้ากำหนดให้

$N_{r,measured}$	คือ ความเร็วโรเตอร์ที่วัดได้
$N_{r,nameplate}$	คือ ความเร็วโรเตอร์ที่กักได้จากแผ่นป้ายมอเตอร์
f	คือ ความถี่ไฟ
P	คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

3.3.2 วิธีคำนวณด้วยค่าความเร็วสลลิปแบบชดเชยแรงดัน (Slip Speed Method with Voltage Compensation; SSMw)

วิธีการนี้เป็นการนำวิธีที่ 3.3.1 มาปรับปรุง โดยใช้อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่กักบนแผ่นป้ายมอเตอร์ ซึ่งถูกเรียกว่าค่าตัวประกอบความถูกต้องของแรงดันไฟฟ้า $\left(\frac{V_{L,avg}}{V_{nameplate}} \right)$ มาคำนวณร่วมด้วยสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ภาระทางกลมอเตอร์เป็นดังนี้คือ

$$\% \text{Load of } SSM_w = \frac{(N_{syn} - N_{r,measured})}{(N_{syn} - N_{r,nameplate}) \times \left(\frac{V_{nameplate}}{V_{L,avg}} \right)^2} \times 100 \quad (9)$$

3.4 วิธีคำนวณด้วยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor Method; PFM)

การคำนวณจากค่าตัวประกอบกำลังเฉลี่ย เราสามารถคำนวณได้จากการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทั้งสามเฟส และนำค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทั้งสามเฟสที่วัดได้มาเฉลี่ย เพื่อเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่แผ่นป้ายกักมอเตอร์

วิธีการนี้ใช้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัด และค่าพิกัดที่ได้จากแผ่นป้ายมอเตอร์มาใช้ในการคำนวณ มี 2 วิธี คือ

3.4.1 วิธีคำนวณด้วยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบพื้นฐาน (Power Factor Without Voltage Compensation; PFMwo)

วิธีนี้ใช้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวมาคำนวณสมการที่ใช้คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ภาระทางกลคำนวณได้ดังนี้คือ

$$\% \text{Load of } PFM_{wo} = \frac{PF_{avg}}{PF_{nameplate}} \times 100 \quad (10)$$

เมื่อ

$PF_{nameplate}$ คือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่กักได้จากแผ่นป้ายมอเตอร์

PF_{avg} คือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย คำนวณได้จาก

$$PF_{avg} = \frac{PF_A + PF_B + PF_C}{3}$$

3.4.2 วิธีคำนวณด้วยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบชดเชยแรงดัน (Power Factor method with Voltage Compensation; PFMw)

วิธีการนี้เป็นการนำวิธีที่ 3.4.1 มาปรับปรุง โดยใช้อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่กักบนแผ่นป้ายมอเตอร์ ซึ่งถูกเรียกว่าค่าตัวประกอบความถูกต้องของแรงดันไฟฟ้า $\left(\frac{V_{L,avg}}{V_{nameplate}} \right)$ มาคำนวณร่วมด้วยสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ภาระทางกลมอเตอร์ด้วยวิธีการนี้ได้เป็นดังแสดงในสมการที่ 11

$$\% \text{Load of } PFM_w = \left(\frac{PF_{avg}}{PF_{nameplate}} \right) \times \left(\frac{V_{L,avg}}{V_{nameplate}} \right) \times 100 \quad (11)$$

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก มีขนาดพิกัด 5 HP (3.7 kW), 220/380 V, 13.7/7.9 A, 50 Hz, 1420 rpm, 4 pole, PF 0.83 ต่อแบบสตาร์โดยมีสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 สภาวะ คือ สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุลเท่ากับพิกัดต่ำกว่าพิกัด และสูงกว่าพิกัด ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 5% และ 7% ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 5% และ 7% วิธีการคำนวณความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE ซึ่งเป็นการหาอัตราส่วนความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส (Phase Voltage Unbalance Ratio; %PVUR) คำนวณโดยใช้ค่าส่วนต่างที่มากที่สุดของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเฟสเฉลี่ยดังนี้

$$\%PVUR = \text{Max} \left[\frac{V_{AN} - V_{phase,avg} \cdot V_{BN} - V_{phase,avg} \cdot V_{CN} - V_{phase,avg}}{V_{phase,avg}} \right] \times 100$$

โดยสามารถหาค่าของแรงดันเฟสเฉลี่ย ($V_{phase,avg}$) ได้จาก

$$V_{phase,avg} = \frac{V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}}{3}$$

แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังตารางที่ 1 จากตารางเป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟส การจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุลแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด (BL), จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าพิกัด (UBL) และจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าพิกัด (OBL) ส่วนการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ (UV) และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ (OV) โดยพิจารณาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าแต่ละลักษณะเป็น 3 แบบ คือแบบ 1-phase, 2-phase และ 3-phase

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ภาระทางกลของมอเตอร์กับผลการทดสอบจริง และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับแยกตามสภาวะของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ได้ข้อมูลสำหรับแรงดันไฟฟ้าสมดุลเป็นดังรูปที่ 1-3 ข้อมูลสำหรับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติเป็นดังรูปที่ 4-9 และข้อมูลสำหรับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติเป็นดังรูปที่ 10-15 จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า

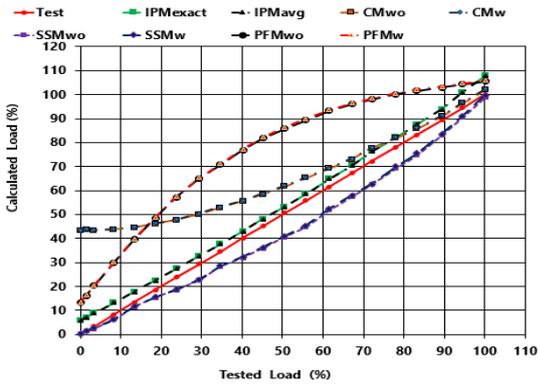
- การคำนวณด้วยค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตสามารถทำการประมาณภาระทางกลได้ใกล้เคียงมากที่สุดในช่วงภาระภาระทางกลตลอดย่านการใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทั้งหมดที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ และการประมาณภาระทางกลด้วยค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ยให้ค่าใกล้เคียงผลการทดสอบจริงมากที่สุด ในทุกสภาวะของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า
- การคำนวณด้วยค่ากระแสไฟฟ้าสามารถนำมาใช้ประมาณภาระทางกลได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงเฉพาะในช่วงภาระทางกลหนัก ส่วนในช่วงภาระทางกลเบาการประมาณภาระทางกลจะมีค่าความผิดพลาดมากทั้งในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล และ

แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

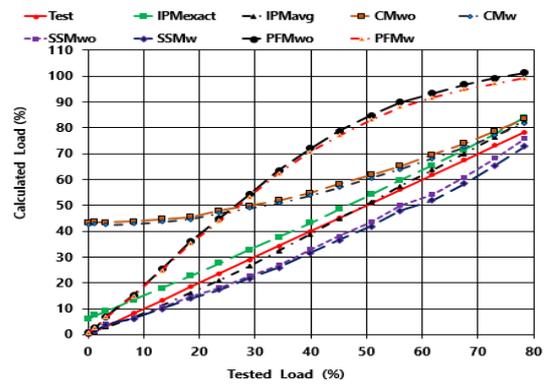
ตารางที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

Voltage Balance (BL)				
Type	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	
BL	220	220	220	
UBL	209	209	209	
OBL	231	231	231	
Under Voltage Unbalance (UV)				
Unbalance	Phase	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)
5%	1	220	220	203
	2	220	204	204
	3	210	207	193
7%	1	220	220	197
	2	220	207	191
	3	210	209	188
Over Voltage Unbalance (OV)				
Unbalance	Phase	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)
5%	1	220	220	237
	2	220	235	240
	3	225	230	245
7%	1	220	220	244
	2	220	244	246
	3	221	245	247

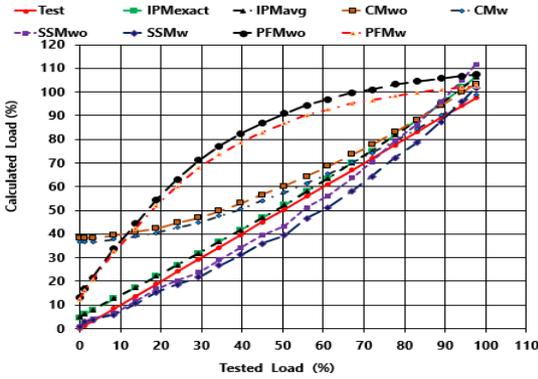
- การคำนวณด้วยค่าสลิปแบบพื้นฐานสามารถทำการประมาณภาระทางกลได้ทุกช่วงภาระภาระทางกลเช่นกัน โดยเฉพาะภาระทางกลเบาจะมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบจริง โดยค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจริง และวิธีการคำนวณด้วยค่าสลิปแบบชดเชยแรงดันสามารถทำการประมาณภาระทางกลได้แม่นยำกว่าการคำนวณด้วยค่าสลิปแบบพื้นฐานเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอยู่ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ
- การคำนวณด้วยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสามารถทำการประมาณภาระทางกลได้ใกล้เคียงที่สุดในช่วงภาระทางกลเบา แต่จากข้อมูลจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการประมาณภาระทางกลมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างมาก ดังนั้นวิธีการคำนวณภาระทางกลด้วยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้คำนวณเพื่อทำนายเปอร์เซ็นต์ภาระทางกลของมอเตอร์ในทุกช่วงการทำงานตลอดย่านการรับภาระภาระทางกลของมอเตอร์



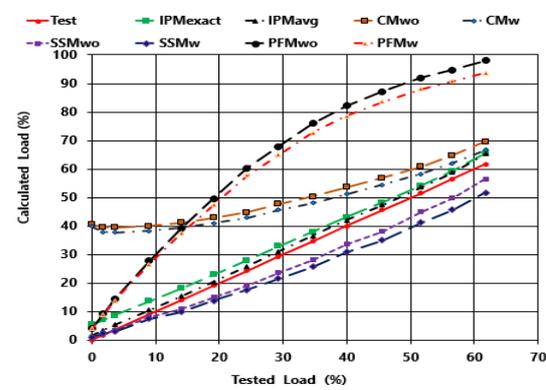
รูปที่ 1 เปรอ์เซ็นต์ภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่แรงดัน BL



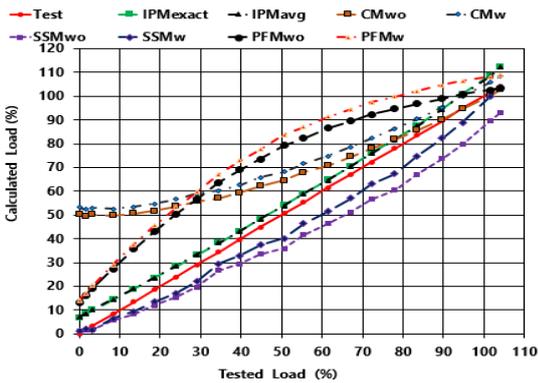
รูปที่ 4 เปรอ์เซ็นต์ภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ UV 5%, 1-phase



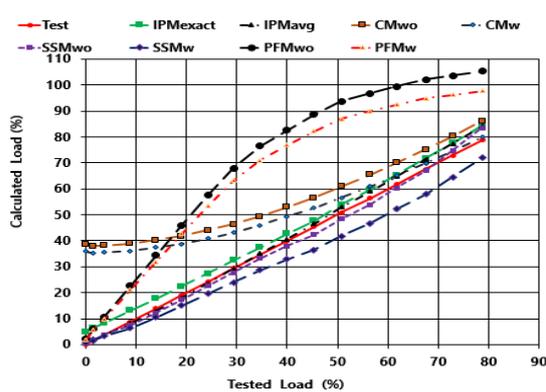
รูปที่ 2 เปรอ์เซ็นต์ภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่แรงดัน UBL



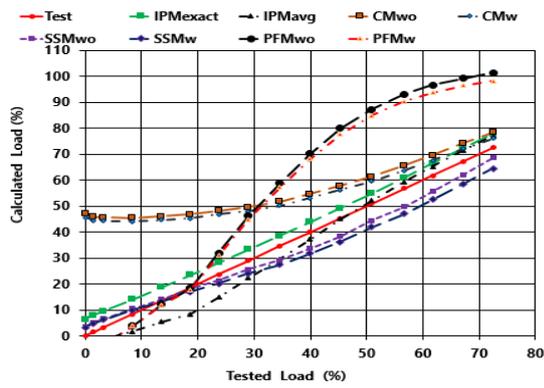
รูปที่ 5 เปรอ์เซ็นต์ภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ UV 5% , 2-phase



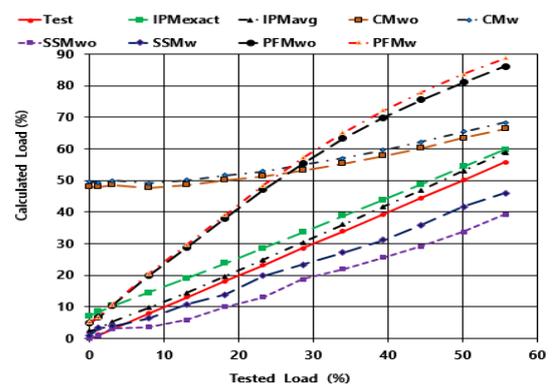
รูปที่ 3 เปรอ์เซ็นต์ภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่แรงดัน OBL



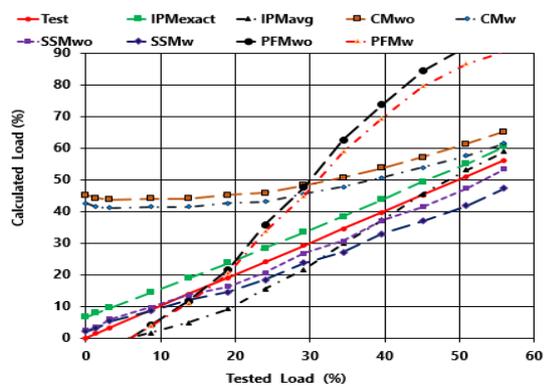
รูปที่ 6 เปรอ์เซ็นต์ภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ UV 5%, 3-phase



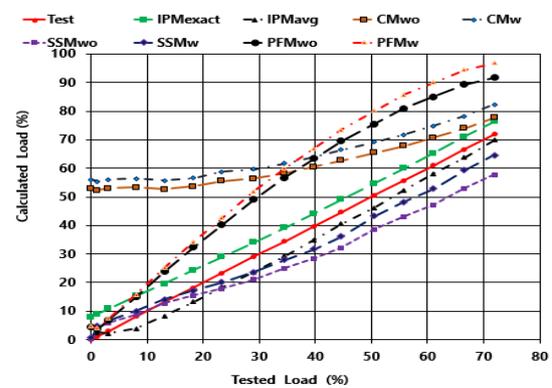
รูปที่ 7 เปรียบเทียบภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ UV 7%, 1-phase



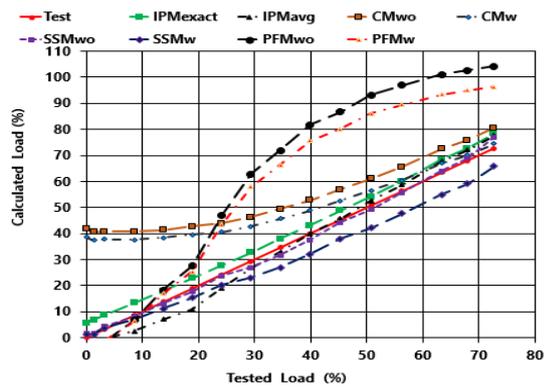
รูปที่ 10 เปรียบเทียบภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ OV 5%, 1-phase



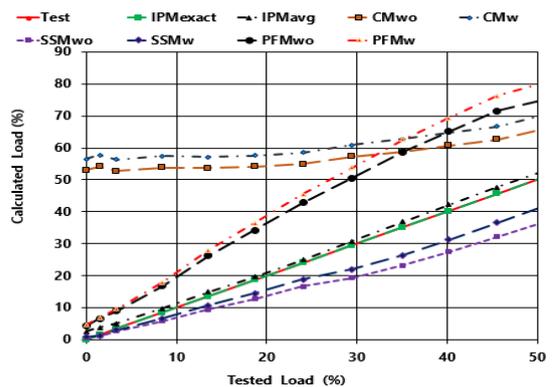
รูปที่ 8 เปรียบเทียบภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ UV 7%, 2-phase



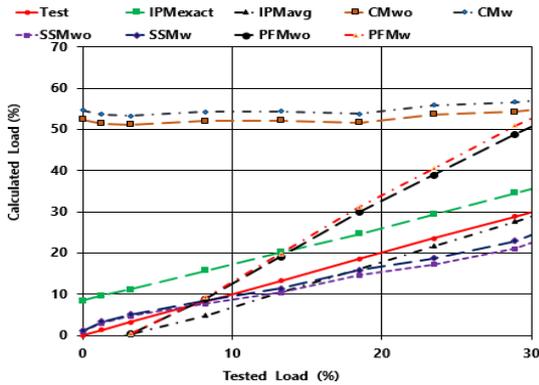
รูปที่ 11 เปรียบเทียบภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ OV 5%, 2-phase



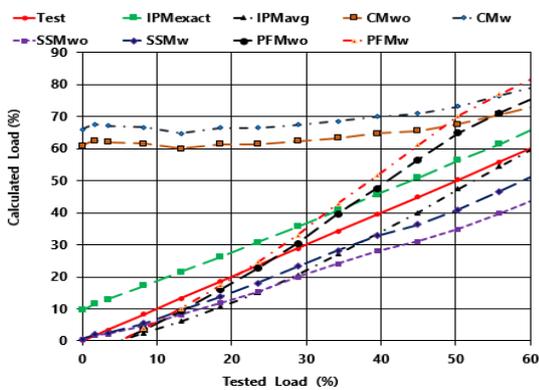
รูปที่ 9 เปรียบเทียบภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ UV 7%, 3-phase



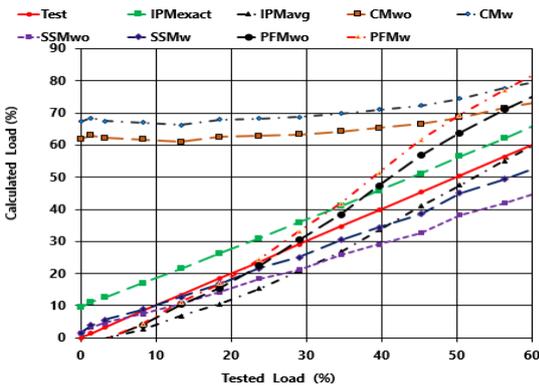
รูปที่ 12 เปรียบเทียบภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ OV 5%, 3-phase



รูปที่ 13 เปรียบเทียบภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ OV 7%, 1-phase



รูปที่ 14 เปรียบเทียบภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ OV 7%, 2-phase



รูปที่ 15 เปรียบเทียบภาระทางกลจากการวัด และการคำนวณที่ OV 7%, 3-phase

4. สรุป

การประเมินวิธีการประมาณภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุล และไม่สมดุล โดยใช้การคำนวณความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส (%PVUR) ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE ด้วยการนำข้อมูลที่ได้จากผลการวัดจริง มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการต่าง ๆ 4 วิธี คือ วิธีการคำนวณด้วยค่ากำลังไฟฟ้าอินพุท วิธีการคำนวณด้วยค่ากระแสไฟฟ้า วิธีการคำนวณด้วยค่าความเร็วสลิป และวิธีการคำนวณด้วยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยทำการทดสอบมอเตอร์ตั้งแต่สถานะที่ไม่มีภาระทางกลจนถึงสถานะที่รับภาระทางกลถึงพิกัดกระแสไฟฟ้าที่สถานะแรงดันไฟฟ้าสมดุล และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ 5% และ 7% ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 1-phase, 2-phase และ 3-phase จากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวิธีการคำนวณโดยใช้ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทเฉลี่ยสามารถประมาณภาระทางกลได้ใกล้เคียงผลการทดสอบจริงมากที่สุดในทุกสถานะแรงดันไฟฟ้าตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ ดังนั้นวิธีการประเมินโดยใช้ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทเฉลี่ยจึงทำให้ได้ค่าถูกต้อง และแม่นยำตามการใช้งานจริงของมอเตอร์มากที่สุด ในขณะที่วิธีการประเมินโดยใช้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงมีความถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม ในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าพิกัดมาก ๆ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าความแม่นยำมีค่าน้อยกว่า ซึ่งน่าจะเนื่องมาจากการที่แหล่งจ่ายมีแรงดันไฟฟ้าเกินพิกัดเป็นผลให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ทำให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเพิ่มมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณโสภณ เพ็งสุข คุณวรยุทธ กมลสุวรรณคุณจักรรัตน์ อัครชาติ และคุณบัญชา ไทยพิมพ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการทดสอบ และบันทึกผลการทดสอบ คุณกมลวิช บุรุษเวศน์ และคุณธีระ นิรมย์ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการดำเนินการวิจัย และวิเคราะห์ข้อมูลเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] The energy savings network. "DETERMINING ELECTRIC MOTOR LOAD AND EFFICIENCY" a Program of the U.S. Department of Energy.
- [2] Edson da Costa Bortoni, "Are my motors oversized?," Energy Conversion and Management, vol. 50, pp. 2282-2287, 2009.
- [3] Gilbert A. McCoy, Todd Litman, and John G. Douglass, "Energy-Efficient Electric Motor Selection Handbook" Washington State Energy Office, Olympia, Washington, Revision 3, January 1993, DOE/CE - 0384.
- [4] กมลวิช บุรุษเวศน์, สลิลทิพย์ สินธุสนธิชาติ และ นนทวัฒน์ จุลเดชะ

- (2557). การเปรียบเทียบวิธีการประมาณภาระทางกลมอเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ ต่ำกว่าปกติ และไม่สมดุล, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37, หน้า 165-168, 2557.
- [5] อีระ นิรรมย์ และสลลิตทิพย์ ลินธุสนธิชาติ “การเปรียบเทียบวิธีการประมาณภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้วิธีการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ในสภาวะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุลและไม่สมดุล” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 โรงแรมโนโวเทล ระยอง หน้า 399-405, 2561.
- [6] อีระ นิรรมย์ และสลลิตทิพย์ ลินธุสนธิชาติ “การปรับปรุงวิธีการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อประมาณภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุลและไม่สมดุล” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 (E-NETT 14) การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 โรงแรมโนโวเทล ระยอง หน้า 484-491, 2561.
- [7] IEEE 1459-2010: IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2010
- [8] R. F. Woll, “Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors” IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: IA-11, Issue: 1, pp. 38 – 42, Jan. 1975.



สลลิตทิพย์ ลินธุสนธิชาติ จบการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และได้รับตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า