

การประมาณค่าภาระโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะ
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลรูปแบบต่าง ๆ โดยใช้วิธีการคำนวณค่าความเร็วรอบที่นำเสนอ

Load Estimation of Three-phase Induction Motor under
Various Types of Unbalanced Voltage Supplies Using the Proposed Speed Calculation Method

สลิลทิพย์ สีนรุสนธิชาติ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

E-mail: salitip@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการคำนวณค่าภาระโหลดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีความไม่สมดุลในรูปแบบต่าง ๆ โดยนำวิธีประมาณโหลดด้วยการคำนวณความเร็วรอบของมอเตอร์แบบดั้งเดิมมาปรับปรุงเพื่อลดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงโหลดเบา และเพื่อพิสูจน์ความถูกต้องเหมาะสมของวิธีการที่นำเสนอ จึงนำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาทดสอบการรับโหลดตั้งแต่ไม่มีภาระโหลดจนถึงรับโหลดเต็มพิกัดกระแสไฟฟ้า ภายใต้สภาวะที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีสภาวะไม่สมดุลในรูปแบบต่าง ๆ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์โหลดด้วยวิธีการต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากข้อมูลที่ได้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธีการที่นำเสนอให้ค่าใกล้เคียงกับผลการรับโหลดจริงของมอเตอร์มากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: การประมาณโหลดมอเตอร์, ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า, วิธีคำนวณความเร็วรอบ

Abstract

This paper presents load estimation of three-phase induction motor under various types of unbalanced voltage supplies using the proposed methods. The conventional speed calculation method was modified to reduce the errors, especially in the light load region taken place from the original methodology. To prove the correctness of the proposed methods, a three-phase induction motor was tested under various unbalanced voltage sources from no-load to full load current. After that, the experimental results of the motor load are compared with the calculation results in terms of the percentage errors. It is obviously found from the given information that the proposed methods provide superior to the conventional method.

Keywords: Load estimation, Voltage unbalance, Speed calculation method

1. บทนำ

งานวิจัย [1-2] ยืนยันอย่างชัดเจนว่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะมีค่าสูงเมื่อมอเตอร์รับโหลดประมาณ 75%-100% ของพิกัดกำลัง และเมื่อโหลดมีค่าต่ำกว่า 30% ของพิกัดกำลัง ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะมีค่าลดต่ำลงค่อนข้างมาก แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสยังขึ้นอยู่กับประเภท และคุณลักษณะของมอเตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่มักมีพิสัยประสิทธิภาพสูงกว้างกว่ามอเตอร์ที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นการหาวิธีประมาณโหลดของมอเตอร์ให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด จึงเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาความเหมาะสมกับการเลือกขนาดพิกัดมอเตอร์ และการประเมินศักยภาพการใช้งานของมอเตอร์ ซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้สำหรับออกแบบระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันต่อไป ดังนั้นการประเมินภาระโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าจริงของมอเตอร์จึงเป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

ในการคำนวณเพื่อประมาณภาระโหลดของมอเตอร์ในสภาวะทำงานจริงมีหลายวิธี [3] ค่าความแม่นยำที่ได้ขึ้นอยู่กับประเภทของข้อมูลที่นำมาใช้ และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ รวมถึงความสะดวกในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติจริง แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการดั้งเดิมเหล่านั้นยังไม่ได้นำผลของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าตลอดย่านการรับโหลดของมอเตอร์เข้ามาพิจารณาร่วมด้วย จึงทำให้ผลการคำนวณที่ได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่มอเตอร์รับโหลดน้อย [4]

และจาก [5-7] แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อมอเตอร์ถูกนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ความสามารถในการรับโหลดของมอเตอร์จะลดลงตามไปด้วย ซึ่งถ้ายังคงให้มอเตอร์รับโหลดเต็มพิกัดตามแผ่นป้ายจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ทั้งในด้านอายุการใช้งาน สมรรถนะ และประสิทธิภาพของมอเตอร์

บทความนี้นำเสนอการประมาณโหลดด้วยวิธีคำนวณค่าความเร็วรอบที่ปรับปรุงจากวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิม เพื่อให้ประเมินค่าภาระโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ วิธีการพัฒนาที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการนำวิธีการประมาณโหลดด้วยการคำนวณความเร็วรอบของมอเตอร์แบบดั้งเดิมมาปรับปรุงในหลายรูปแบบ และในบางรูปแบบได้นำค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต และจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์มาใช้ในการคำนวณร่วมด้วย เพื่อปรับปรุงวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิมให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น รวมทั้งมีการดัดแปลงสมการให้เหมาะสมกับสภาพความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เพื่อลดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดจากวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่านโหลดเบาที่มักจะได้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนจากค่าจริงค่อนข้างมาก และเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของวิธีการที่นำเสนอจึงทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดพิกัด 3.7 kW, 4 pole ตั้งแต่ไม่มีภาระโหลดจนถึงโหลดเต็มพิกัดกระแสไฟฟ้า ภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบ 2 เฟส และ 3 เฟสในรูปแบบต่างๆ ที่มักเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ามาทำการศึกษา หลังจากนั้นนำ

ผลที่ได้จากการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วิธีคำนวณแบบดั้งเดิม และแบบที่นำเสนอในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากผลที่ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวิธีการที่นำเสนอให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงค่อนข้างมากตลอดย่านกว้างการรับโหลดของมอเตอร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้น่าจะเป็นประโยชน์ในแง่ของการเลือกใช้สมการวิธีการประมาณโหลดด้วยความเร็วรอบให้เหมาะสม และสอดคล้องกับคุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ทำให้สามารถประมาณโหลดมอเตอร์ได้ใกล้เคียงค่าจริงในเชิงปฏิบัติมากยิ่งขึ้น

2. นิยามความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

นิยามความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า (Definition of Voltage Unbalance) ที่ใช้อ้างอิงในปัจจุบันมีหลากหลายมาตรฐาน การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในบทความนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE [8] ซึ่งเป็นการคำนวณอัตราส่วนความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส (Phase Voltage Unbalance Ratio; PVUR) ในการคำนวณใช้ค่าส่วนต่างที่มากที่สุดของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสเฉลี่ยหารด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสเฉลี่ย สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังสมการที่ 1

$$\%PVUR = \frac{\text{Maximum phase voltage deviation from average phase}}{\text{Average phase voltage magnitude}} \times 100 \quad (1)$$

ค่าของขนาดแรงดันไฟฟ้าเฟสเฉลี่ย (Average phase voltage magnitude; $V_{avg, phase}$) คำนวณได้จาก

$$V_{avg, phase} = \frac{V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}}{3} \quad (2)$$

ถ้ากำหนดให้

$\%PVUR$ คือ เปอร์เซ็นต์อัตราส่วนความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส

V_{AN}, V_{BN}, V_{CN} คือค่าแรงดันไฟฟ้าเฟส A, B และ C ตามลำดับ

3. ประเภทความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

ประเภทความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส สามารถแบ่งออกได้เป็น 8 ประเภทดังนี้ [9]

1) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าต่ำหนึ่งเฟส (Single-Phase Under Voltage Unbalance) เกิดขึ้นกรณีมีโหลดขนาดใหญ่ในระบบหนึ่งเฟส และไม่สามารถชดเชยขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบให้เพียงพอ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าในเฟสใดเฟสหนึ่งต่ำกว่าอีกสองเฟส

2) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าต่ำสองเฟส (Two-Phase Under Voltage Unbalance) เกิดขึ้นกรณีมีโหลดขนาดใหญ่ต่อในระบบไฟฟ้าอยู่สองเฟส และไม่สามารถชดเชยขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบให้เพียงพอ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกที่ระบบทั้งสองเฟสเป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าทั้งสองเฟสมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าของเฟสที่สาม

3) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าต่ำสามเฟส (Three-Phase Under Voltage Unbalance) ถ้าระบบไฟฟ้ารับโหลดขนาดใหญ่ทั้งสามเฟสมากเกินไปทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าต่ำสามเฟส

4) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินหนึ่งเฟส (Single-Phase Over Voltage Unbalance) เกิดขึ้นเนื่องจากการรั่วระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบให้มีค่าพิกัด ซึ่งโดยปกติจะใช้ตัวเก็บประจุในการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบ แต่ถ้าหากเฟสใดเฟสหนึ่งของระบบไฟฟ้าสามเฟสมีการชดเชยที่มากเกินไปจะทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินที่เฟสนั้น

5) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินสองเฟส (Two-Phase Over Voltage Unbalance) กรณีแรงดันไฟฟ้าสองเฟสจากสามเฟสถูกชดเชยแรงดันไฟฟ้ามากเกินไป จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินที่สองเฟสนั้น

6) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินสามเฟส (Three-Phase Over Voltage Unbalance) กรณีแรงดันไฟฟ้าสามเฟสถูกชดเชยด้วยแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดแรงดันสูงเกินกว่าค่าพิกัดและค่าจะไม่เท่ากัน ถ้ากรณีนี้เกิดขึ้นจะต้องปิดระบบไฟฟ้า และทำการปลดตัวเก็บประจุออกจากระบบ

7) ระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีค่าองศาทางไฟฟ้าไม่เท่ากัน (Unequal Single Phase Angle Displacement) โดยปกติแรงดันไฟฟ้าที่สมดุลจะมีมุมระหว่างเฟส 120 องศาทางไฟฟ้า ถ้าเกิดมีเฟสใดเฟสหนึ่งจากสามเฟสมีค่าองศาทางไฟฟ้าที่หันเหไปจากปกติ ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเกิดมุมที่ไม่เท่ากันหนึ่งเฟส

8) ระบบไฟฟ้าในระบบสองเฟสที่มีค่ามุมไม่เท่ากัน (Unequal Two Phase Angle Displacement) เกิดจากการที่แรงดันไฟฟ้าสมดุลมีมุมหันเหไปจากปกติสองเฟส ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเกิดมุมที่ไม่เท่ากันสองเฟส

4. วิธีคำนวณค่าความเร็วรอบสำหรับคำนวณหาค่าภาระโหลดของมอเตอร์

วิธีการนี้เป็นการวัดความเร็วที่แกนเพลามอเตอร์ขณะใช้งาน เพื่อนำค่าความเร็วสลลิปที่ได้มาคำนวณเปรียบเทียบกับความเร็วสลลิปพิกัดที่ได้ข้อมูลมาจากแผ่นป้ายมอเตอร์ วิธีการคำนวณแบ่งเป็น 2 รูปแบบ

4.1 วิธีการคำนวณแบบดั้งเดิม

การคำนวณแบบดั้งเดิม แยกพิจารณาตามคุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ได้เป็นดังต่อไปนี้

4.1.1 วิธีคำนวณด้วยค่าความเร็วสลลิปพื้นฐาน (Slip Speed Method without Compensation; SMO)

วิธีการนี้ใช้อัตราส่วนของค่าความแตกต่างระหว่างความเร็ว ซึ่งโครนส์กับความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์ขณะใช้งาน กับค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วซึ่งโครนส์กับความเร็วโรเตอร์พิกัดที่ได้จากแผ่นป้ายมอเตอร์มาใช้ในการคำนวณ รายละเอียดเป็นดังสมการที่ 3

$$\% \text{ Load of SMO} = \frac{N_s - N_{r, \text{measured}}}{N_s - N_{r, \text{rated}}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ $N_s = \frac{120f}{P}$ โดยที่

N_s คือ ความเร็วซึ่งโครนส์

$N_{r, \text{measured}}$ คือ ความเร็วโรเตอร์ที่วัดได้

$N_{r, \text{rated}}$ คือ ความเร็วโรเตอร์ที่พิกัดได้มาจากแผ่นป้ายมอเตอร์

f คือ ความถี่ไฟฟ้า

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

4.1.2 วิธีคำนวณด้วยค่าความเร็วสลลิปแบบชดเชยแรงดัน (Slip Speed Method with Voltage Compensation; SSM)

วิธีการนี้เป็นการนำวิธีคำนวณด้วยค่าความเร็ว สลลิปพื้นฐานมา ปรับปรุงโดยนำอัตราส่วนระหว่างแรงดันไลน์พิกัดกับแรงดันไลน์เฉลี่ย มาใช้ในการปรับค่าการคำนวณเปอร์เซ็นต์โหลด ถ้ากำหนดให้ V_{AB} , V_{BC} และ V_{CA} เป็นแรงดันไฟฟ้าไลน์ AB, BC และ CA ตามลำดับ จะได้ค่าของ แรงดันไฟฟ้าไลน์เฉลี่ย $V_{L,avg} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{3}$ ดังนั้น

$$\%Load\ of\ SSM = \frac{N_s - N_{r,measured}}{(N_s - N_{r,rated}) \left(\frac{V_{in,rated}}{V_{L,avg}} \right)^2} \times 100 \quad (4)$$

4.2 วิธีการคำนวณที่นำเสนอ

วิธีการที่นำเสนอนี้เป็นการนำการคำนวณแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นวิธีคำนวณด้วยค่าความเร็วสลลิปพื้นฐาน มาดัดแปลงปรับปรุงเพื่อลดค่าความผิดพลาดและทำให้สามารถประมาณค่าเปอร์เซ็นต์โหลดได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงมอเตอร์รับภาระโหลดน้อย ซึ่งมีค่าประมาณ 0-20% ของโหลดเต็มพิกัด ซึ่งเรียกว่าย่านโหลดเบา

4.2.1 วิธีการคำนวณแบบประยุกต์ 1

วิธีการนี้เป็นการดัดแปลงโดยนำค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตรวม ($P_{in,total}$) ซึ่งคำนวณได้จาก $P_{in,total} = P_{in,A} + P_{in,B} + P_{in,C}$ และจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์มาคำนวณร่วมกับสมการที่ 3 ในการคำนวณ ใช้การปรับลดค่าให้สอดคล้องกับรูปแบบของความไม่

สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งพิจารณาออกเป็น 2 ลักษณะคือ

- กรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีสถานะสมดุลเท่ากับพิกัด มีสถานะสมดุลต่ำกว่าพิกัด และมีสถานะไม่สมดุลต่ำกว่าพิกัด ใช้การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โหลดประยุกต์ 1 แบบที่ 1 (SMO_{11}) สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังแสดงในสมการที่ 5

$$\%Load\ of\ SMO_{11} = \left(\frac{N_s - N_{r,measured}}{N_s - N_{r,rated}} \times 100 \right) - \left[173 \times \left(\frac{N_{r,rated} + N_{r,measured}}{N_{r,measured}} \right) \left(\frac{2P}{P_{in,total}} \right) \right] + \left[5 \times \left(\frac{N_{r,rated} + N_{r,measured}}{N_s + N_{r,measured}} \right) \right] \quad (5)$$

- กรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีสถานะสมดุลและ/หรือไม่สมดุล สูงกว่าพิกัด ใช้การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โหลดประยุกต์ 1 แบบที่ 2 (SMO_{12}) สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังแสดงในสมการที่ 6

$$\%Load\ of\ SMO_{12} = 1.2 \times \left(\frac{N_s - N_{r,measured}}{N_s - N_{r,rated}} \times 100 \right) - \left[173 \times \left(\frac{N_{r,rated} + N_{r,measured}}{N_{r,measured}} \right) \left(\frac{2P}{P_{in,total}} \right) \right] + \left[5 \times \left(\frac{N_{r,rated} + N_{r,measured}}{N_s + N_{r,measured}} \right) \right] \quad (6)$$

4.2.2 วิธีการคำนวณแบบประยุกต์ 2

วิธีการนี้ใช้การดัดแปลงสมการที่ 3 โดยนำเฉพาะค่าความเร็วรอบต่างๆ ที่ทราบ มาหาความสัมพันธ์เพื่อปรับปรุงวิธีการคำนวณหา

เปอร์เซ็นต์โหลด ได้สมการที่ใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โหลดแบบประยุกต์ 2 (SMO₂) เป็นดังนี้

$$\% \text{ Load of SMO}_2 = \left[\left(\frac{N_s - N_{r,measured}}{N_s - N_{r,rated}} \times 100 \right) + 2.5 \right] - \left[\left(\frac{N_s - N_{r,rated}}{N_s - N_{r,measured}} \times 0.19 \right) \right] \quad (7)$$

5. ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผล

มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก Class A มีขนาดพิกัด 3.7 kW, 4 pole, 50 Hz, 220/380 V, 13.7/7.9 A, 1420 rpm, PF 0.83

ในการทดสอบต่อมอเตอร์แบบสตาร์ และใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสสามชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์แต่ละเฟสแยกอิสระจากกัน เพื่อให้สามารถควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในรูปแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลได้ตามที่ต้องการ

แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบต่ำกว่าปกติและสูงกว่าปกติที่ค่าความไม่สมดุล 5% และ 7% โดยเลือกใช้ประเภทความไม่สมดุลแบบ 2 เฟส และ 3 เฟส เนื่องจากเป็นรูปแบบความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่พบบ่อยในทางปฏิบัติ ส่วนสภาวะแรงดันไฟฟ้าแบบสมดุลที่ต่ำ และสูงกว่าปกติได้ถูกนำเสนอและวิเคราะห์ใน [10] คุณลักษณะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น ดังนี้คือ

1) ไม่สมดุลแบบ 2 เฟส โดยแรงดันไฟฟ้าเฟส A มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าเฟส B ส่วนแรงดันไฟฟ้าเฟส C มีค่าเท่ากับพิกัด: 2 (A=B, C)

2) ไม่สมดุลแบบ 2 เฟส โดยแรงดันไฟฟ้าเฟส A มีค่าไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าเฟส B ส่วนแรงดันไฟฟ้าเฟส C มีค่าเท่ากับพิกัด: 2 (A≠B, C)

3) ไม่สมดุลแบบ 3 เฟส โดยแรงดันไฟฟ้าเฟส A มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าเฟส B และไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าเฟส C: 3 (A=B, ≠C)

4) ไม่สมดุลแบบ 3 เฟส โดยที่แรงดันไฟฟ้าเฟส A มีค่าไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าเฟส B และไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าเฟส C: (A≠B≠C)

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์แต่ละเฟสสำหรับใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

Under Voltage Unbalance				
%PVUR	Type	V _{an} (V)	V _{bn} (V)	V _{cn} (V)
5	2 (A=B, C)	204	204	220
	2 (A≠B, C)	200	208	220
	3 [(A=B), ≠C]	199	199	214.5
	3 (A≠B≠C)	200	190	210
7	2 (A=B, C)	198	198	220
	2 (A≠B, C)	200	196	220
	3 [(A=B), ≠C]	196.5	196.5	218
	3 (A≠B≠C)	200	175	190
Over Voltage Unbalance				
%PVUR	Type	V _{an} (V)	V _{bn} (V)	V _{cn} (V)
5	2 (A=B, C)	237.5	237.5	220
	2 (A≠B, C)	240	235	220
	3 [(A=B), ≠C]	230	230	248
	3 (A≠B≠C)	250	227	240
7	2 (A=B, C)	245	245	220
	2 (A≠B, C)	244	246	220
	3 [(A=B), ≠C]	222.5	222.5	247
	3 (A≠B≠C)	221	224	247

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Actual data} - \text{Calculated data}}{\text{Actual data}} \times 100 \quad (8)$$

จากตารางในส่วนแรกเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ (Under Voltage Unbalance) และ

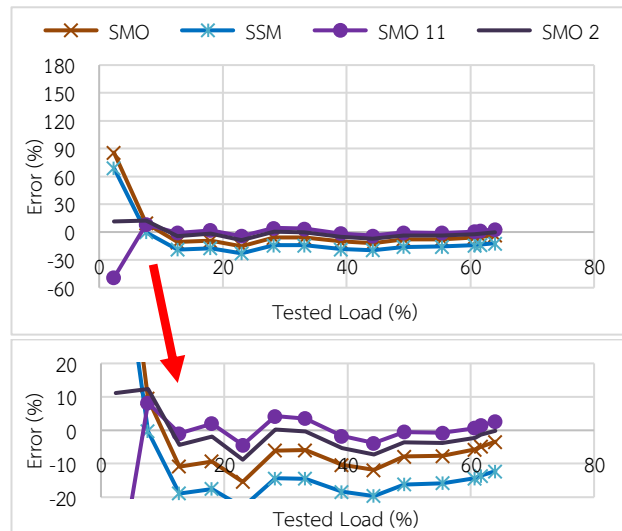
ในส่วนหลังเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ (Over Voltage Unbalance) เมื่อได้ผลการทดสอบมอเตอร์เรียบร้อยแล้ว นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์โหลดด้วยวิธีการคำนวณตามที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4 หลังจากนั้นนำผลคำนวณที่ได้มาพิจารณาเปรียบเทียบเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% Error) โดยใช้การคำนวณดังสมการที่ 8 จากนั้นนำความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับเปอร์เซ็นต์การรับภาระโหลดจริงของมอเตอร์มาพล็อตกราฟ ได้กราฟในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบต่ำกว่าปกติดังรูปที่ 1-8 และในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบสูงกว่าปกติเป็นดังรูปที่ 9-16 จากรูปจะเห็นได้ว่า

- ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบต่ำกว่าปกติ ทั้งกรณีความไม่สมดุลที่ 5% และ 7%

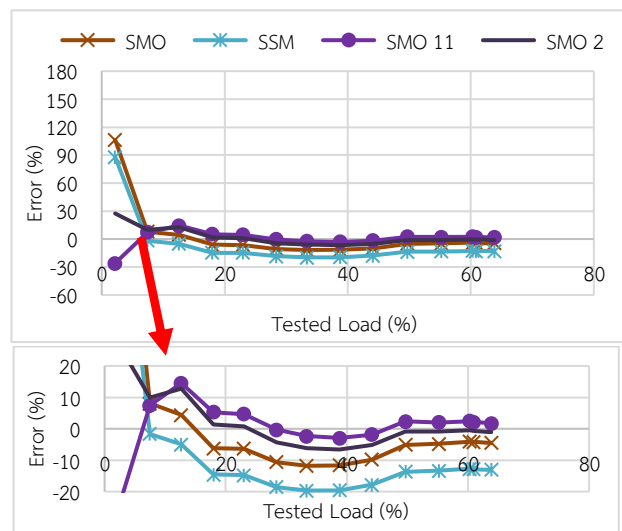
- ที่ประเภทความไม่สมดุลแบบ 2 เฟส การประมาณค่าโหลดของมอเตอร์โดยใช้วิธี SMO₁₁ ให้ค่าใกล้เคียงกับการรับภาระโหลดจริงของมอเตอร์มากที่สุด เมื่อมอเตอร์มีภาระโหลดตั้งแต่ประมาณ $\geq 10\%$ ของภาระโหลดเต็มพิกัด

- ที่ประเภทความไม่สมดุลแบบ 3 เฟส การประมาณค่าโหลดของมอเตอร์โดยใช้วิธี SMO ให้ค่าใกล้เคียงกับการรับภาระโหลดจริงของมอเตอร์มากที่สุด เมื่อมอเตอร์มีภาระโหลดตั้งแต่ประมาณ $\geq 10\%$ ของภาระโหลดเต็มพิกัด

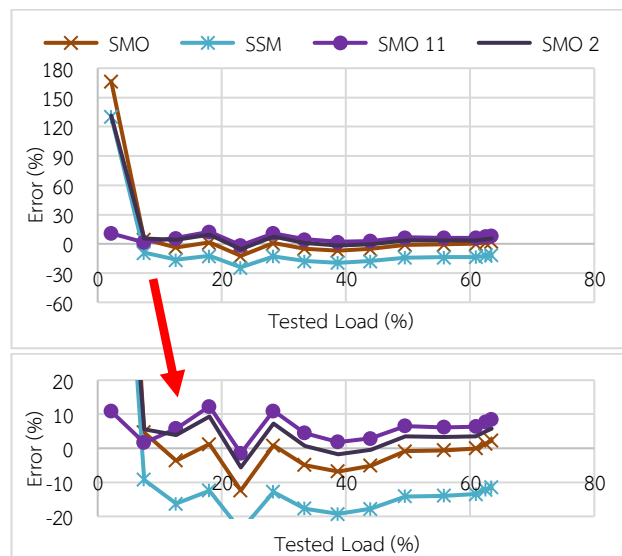
- ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบสูงกว่าปกติ ทั้งกรณีความไม่สมดุลที่ 5% และ 7% ที่ประเภทความไม่สมดุลแบบ 2 เฟส และ 3 เฟส การคำนวณด้วยวิธี SMO₁₂ ให้ค่าให้ค่าใกล้เคียงกับการรับภาระโหลดจริงของมอเตอร์มากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง



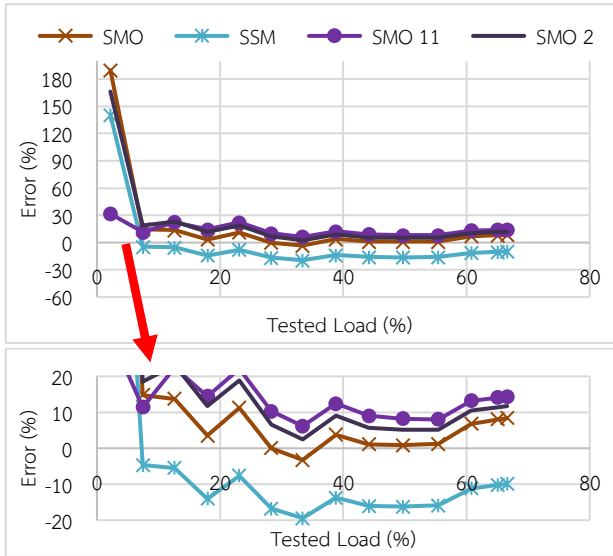
รูปที่ 1 UV 5% กรณี 2(A=B, C)



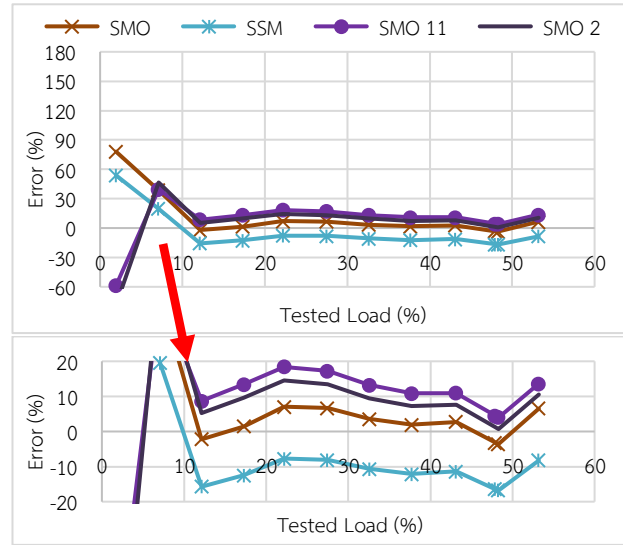
รูปที่ 2 UV 5%กรณี 2(A≠B, C)



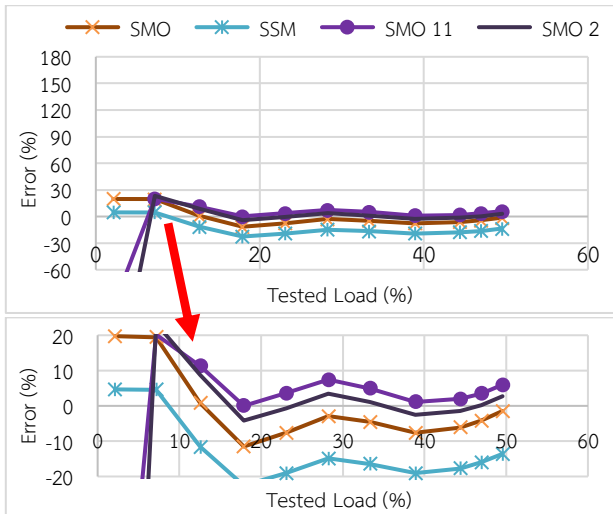
รูปที่ 3 UV 5%กรณี 3[(A=B)≠C]



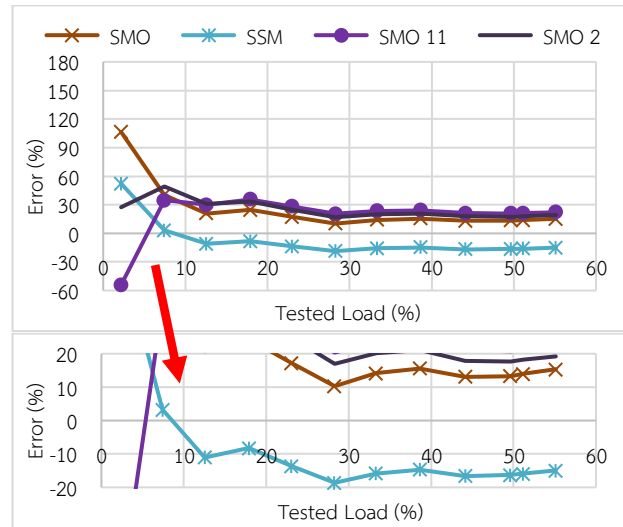
รูปที่ 4 UV 5%กรณี 3(A≠B≠C)



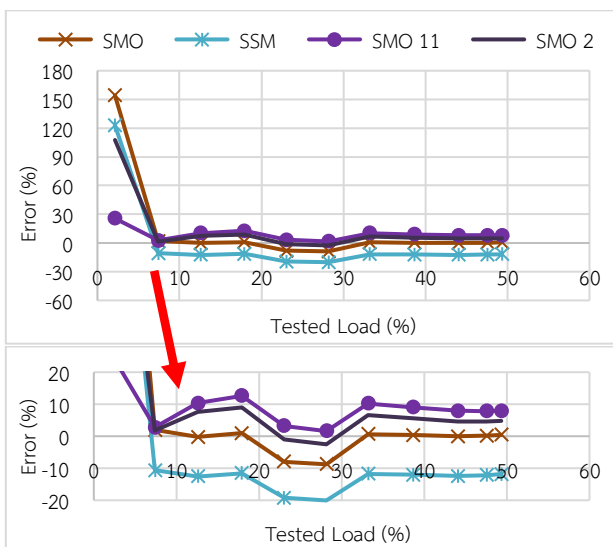
รูปที่ 7 UV 7% กรณี 3(A=B, ≠C)



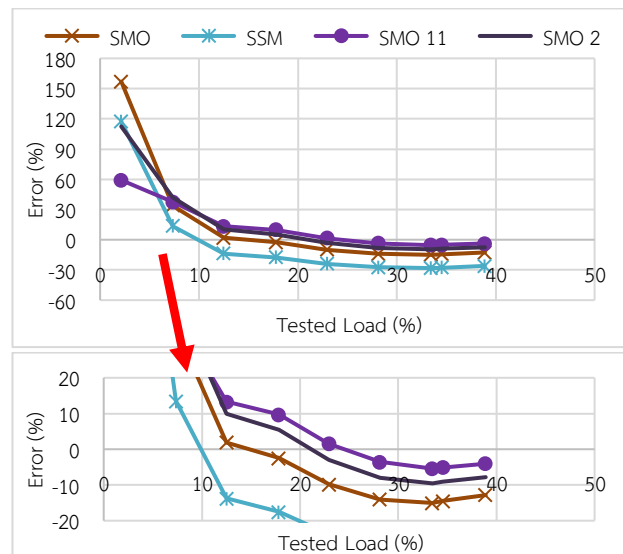
รูปที่ 5 UV 7%กรณี 2(A=B, C)



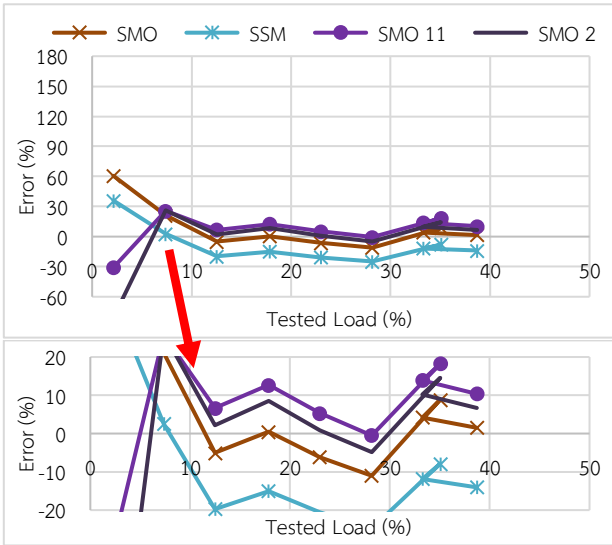
รูปที่ 8 UV 7% กรณี 3(A≠B≠C)



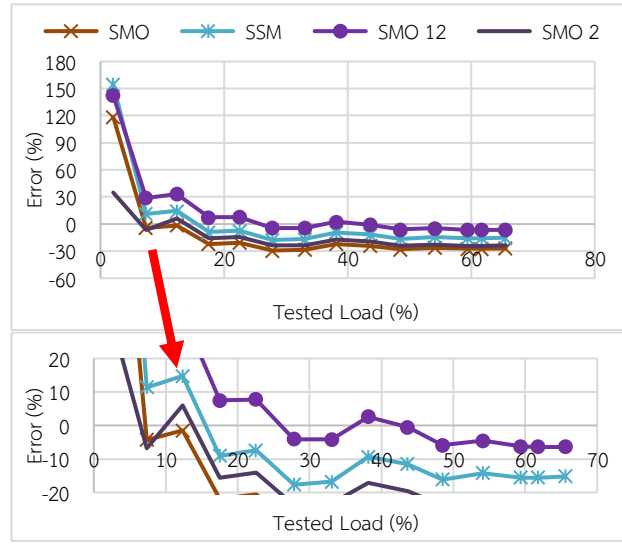
รูปที่ 6 UV 7% กรณี 2(A≠B, C)



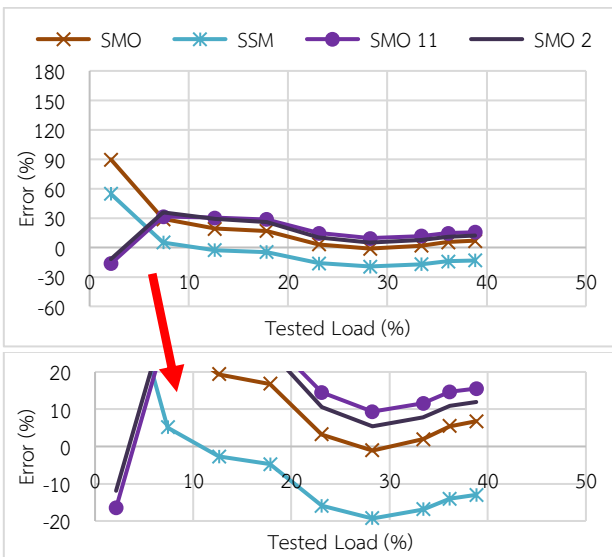
รูปที่ 9 OV 5% กรณี 2(A=B, C)



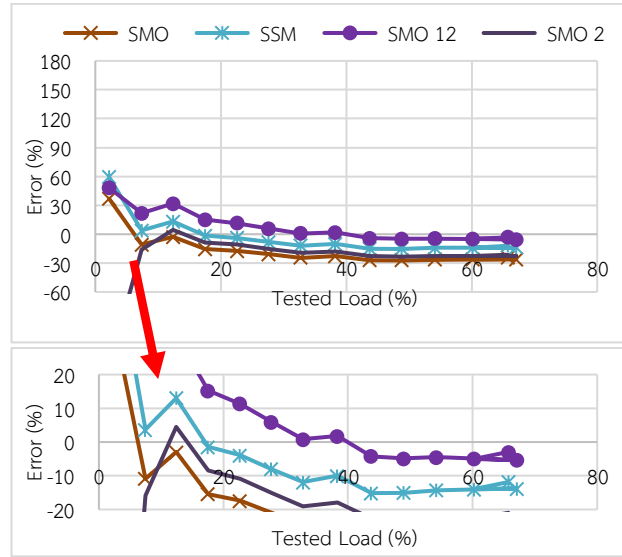
รูปที่ 10 OV 5% ทกรณี 2(A≠B, C)



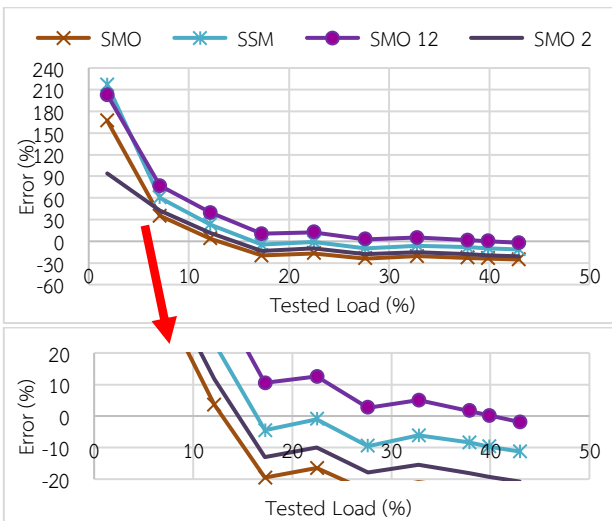
รูปที่ 13 OV 7% ทกรณี 2(A=B, C)



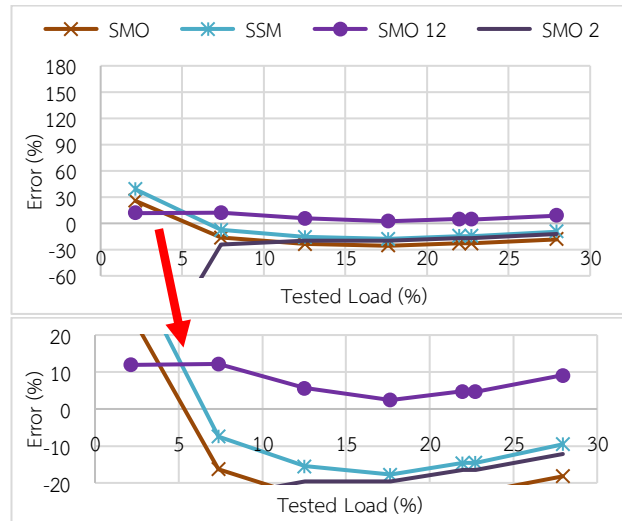
รูปที่ 11 OV 5% ทกรณี 3(A=B) ≠C



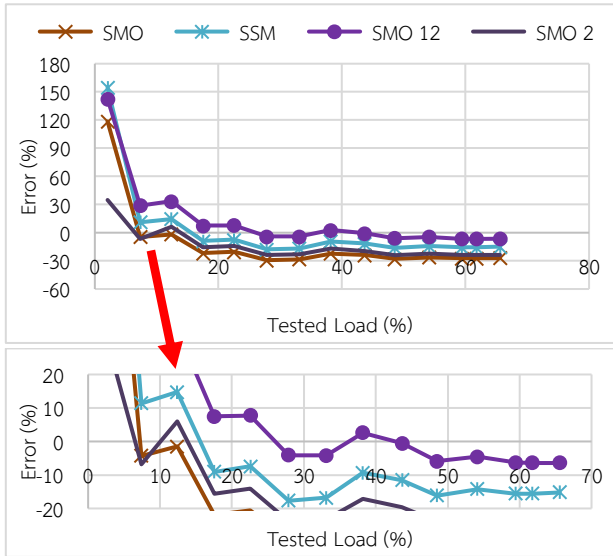
รูปที่ 14 OV 7% ทกรณี 2(A≠B, C)



รูปที่ 12 OV 5% ทกรณี 3(A≠B≠C)



รูปที่ 15 OV 7% ทกรณี 3(A=B, ≠C)



รูปที่ 16 OV 7% กรณี 3(A≠B≠C)

เมื่อค่าความไม่สมดุลของแรงดันเกินมีค่ามาก แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าในกรณีที่ไม่สะดวก หรือไม่มีเครื่องวัดค่ากำลังไฟฟ้า และ/หรือต้องการให้ง่ายต่อการคำนวณ ยังสามารถเลือกการคำนวณโหลดของมอเตอร์ด้วยวิธีการ SSM นำมาใช้ประเมินค่าโหลดแทนได้ เพียงแต่จะมีค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้นจากวิธี SMO₁₂ เล็กน้อย

6. สรุป

จากวิธีการคำนวณภาระโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีสถานะไม่สมดุลแบบต่ำกว่าปกติ และสูงกว่าปกติที่ความไม่สมดุล 5% และ 7% และมีประเภทความไม่สมดุลเป็นแบบ 2 เฟส และ 3 เฟส ในรูปแบบต่าง ๆ ด้วยวิธีการคำนวณความเร็วรอบที่ได้ทำการปรับปรุงและนำเสนอในบทความนี้ ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวิธีการที่นำเสนอทำให้เกิดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงโหลดเบา โดยวิธี SMO₁₁ ที่นำเสนอเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ประเมินค่าโหลดมอเตอร์ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบต่ำกว่าปกติ ในขณะที่วิธี SMO₁₂ ที่นำเสนอเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ประเมินค่าโหลดมอเตอร์ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบสูงกว่าปกติ

อนึ่ง เนื่องด้วยงานวิจัยนี้ทำการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3.7 kW เพียงพิกัดเดียว ดังนั้นถ้าต้องการยืนยันเพื่อหาข้อสรุปเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละย่านการทำงานของมอเตอร์ ควรทำการเก็บข้อมูลของมอเตอร์ที่หลากหลายพิกัด และหลากหลายจำนวนขั้วแม่เหล็ก และนำผลของข้อมูลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณศุภกฤต พูลธัญกิจ คุณเอกพล มีทอง คุณพชรวัฒน์ เพชรจรัส และคุณธราธิป หนูวิไล ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการทดสอบ การดำเนินการวิจัย และการคำนวณเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Edson da Costa Bortoni, "Are my motors oversized?", Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 2282-2287, 2009.
- [2] The energy savings network, "DETERMINING ELECTRIC MOTOR LOAD AND EFFICIENCY" a Program of the U.S. Department of Energy.

- [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] กมลวิษ บุรุษเวศน์, สลิลทิพย์ สีนรุสนธิชาติ และ นนทวัฒน์ จุลเดชะ (2557). "การเปรียบเทียบวิธีการประมาณโหลดมอเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ ต่ำกว่าปกติ และไม่สมดุล", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37, โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชาออคิต จังหวัดขอนแก่น
- [5] Pragasen Pillay, Peter Hofmann, and Marubini Manyage, "Derating of Induction Motors Operating With a Combination of Unbalanced Voltages and Over or Under voltages", IEEE TRANSACTIONS on ENERGY CONVERSION, VOL. 17, NO. 4, December 2002, pp. 485-491.
- [6] A. Wallace, A. R. von Jouanne, E. J. Wiedenbrüg, and P. S. Andrews, "The measured effects of under-voltage, over-voltage and unbalanced voltage on the efficiency and power factor of induction motors over wide ranges of load," in PEVD Conf. Proc., 1997.
- [7] R. F. Woll, "Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: IA-11, Issue: 1, Jan. 1975, pp. 38-42.
- [8] IEEE 1459-2010: IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2010.
- [9] The Motor Challenge, Fact Sheet, Determining Electric Motor Load and Efficiency, a Program of the U.S. Department of Energy, pp. 1-10.
- [10] สลิลทิพย์ สีนรุสนธิชาติ (2566). การดัดแปลงวิธีการคำนวณโหลดด้วยค่าความเร็วสลลิปเพื่อใช้ประมาณค่าโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46, ณ ติวาน่า พลาซ่า กระบี่ อ่าวนาง จังหวัดกระบี่