

# การปรับปรุงวิธีการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตสำหรับการประมาณค่าภาระโหลดของมอเตอร์ เหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในรูปแบบต่าง ๆ

## Input Power Calculation Method Improvement for Load Estimation of Three-phase Induction Motor under Various Types of Unbalanced Voltage Supplies

สลิลทิพย์ สิ้นธุสนธิชาติ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

E-mail: saliltip@mut.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงวิธีการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตที่ใช้สำหรับการประมาณค่าภาระโหลดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีความไม่สมดุลในรูปแบบต่าง ๆ โดยนำค่าความสูญเสียของมอเตอร์ อัตราส่วนความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส และจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์มาใช้ปรับปรุงสมการคำนวณแบบดั้งเดิม เพื่อลดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดจากวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิม เพื่อยืนยันความถูกต้องเหมาะสมของสมการที่นำเสนอ จึงทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตั้งแต่ไม่มีภาระโหลดจนรับโหลดเต็มพิกัดกระแสไฟฟ้า ในสถานะที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีสถานะไม่สมดุลในรูปแบบต่าง ๆ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้อ่านคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์โหลดด้วยวิธีการต่าง ๆ และนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงจากข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแต่ละวิธีการมีขอบเขตความเหมาะสมต่อการทำนายโหลด

ของมอเตอร์ในแต่ละย่านการรับโหลด และในแต่ละสถานะแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

### Abstract

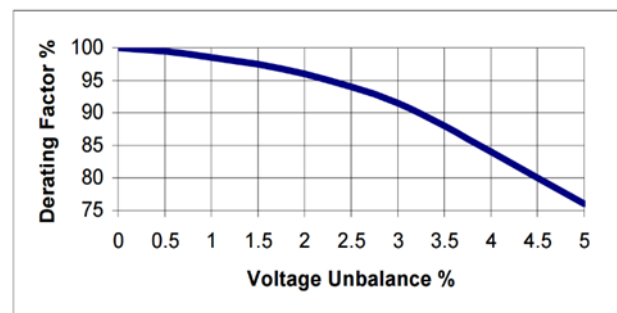
This paper presents an improvement of input power calculation method for load estimation of three-phase induction motor under various types unbalanced voltage supplies. Three parameters comprising of motor losses, phase voltage unbalance ratio, and the number of pole are added in the conventional method to reduce an error. To verify the correctness of the proposed methods, three-phase induction motors are tested from no-load to full load current in cases of various unbalanced voltage supplies. After that, motor load values from the experimental results are compared with the calculation results in terms of the percentage error. It is evidently clear from the given results that each method provides the suitable scope limitation for predicting each range of motor load

operation depended on the unbalance voltage characteristics.

## 1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นมอเตอร์ที่ถูกใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีพิบัติการใช้งานที่หลากหลาย ทำให้สามารถเลือกพิบัติมอเตอร์ให้เหมาะสมกับขนาด และลักษณะการใช้งานสำหรับเครื่องจักรภายในโรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งเป็นมอเตอร์ที่ต้องการการบำรุงรักษาไม่มากนัก แต่เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมมักจะประสบปัญหาในเรื่องของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งมีสาเหตุมาจากโหลดหนึ่งเฟสในระบบไฟฟ้า ที่ส่งผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลที่พิบัติคุณสมบัติและสมรรถนะของมอเตอร์จะเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งแสดงอยู่บนแผ่นป้ายพิบัติ แต่ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีค่าแตกต่างจากพิบัติแรงดันไฟฟ้า และ/หรือมีสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะส่งผลต่อการทำงานของมอเตอร์ ทั้งในเรื่องของพฤติกรรม คุณสมบัติ และสมรรถนะต่าง ๆ เนื่องจากความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสของขดลวดโรเตอร์ และสเตเตอร์มีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปอาจมีค่าสูงประมาณ 6-10 เท่าของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ค่าของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูงจะส่งผลทำให้ความสูญเสียเนื่องจากขดลวด  $I^2R$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดความร้อนของฉนวน ซึ่งมีผลต่ออายุการใช้งานของ

มอเตอร์โดยตรง รวมทั้งมอเตอร์ยังมีความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าลำดับลบ (Negative sequence current) ไหลเข้ามอเตอร์เป็นจำนวนมาก กระแสไฟฟ้าลำดับลบนี้อาจสร้างสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดกำลังงาน มีผลทำให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลง เอกสารอ้างอิง [1] ได้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้ากับค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบลดพิบัติของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์ถูกนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลดังแสดงในรูปที่ 1 จากรูปจะเห็นว่าในสถานะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลประมาณ 5% ค่าตัวประกอบลดมีค่าประมาณ 75% ทำให้ในสถานะนี้มอเตอร์สามารถรับโหลดได้ลดลงเหลือเพียงประมาณ 75% ของพิบัติมอเตอร์ที่แสดงบนแผ่นป้าย ซึ่งถ้ามอเตอร์รับโหลดมากกว่าค่าที่แนะนำจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ทั้งในด้านสมรรถนะ และประสิทธิภาพของมอเตอร์ [2-4]



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้ากับค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบลดพิบัติของมอเตอร์

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงสมการประมาณโหลดด้วยวิธีคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต เพื่อให้ประเมินค่าภาระโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สามเฟสในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส มีความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในลักษณะต่าง ๆ วิธีการพัฒนาที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการนำค่าของความสูญเสียของมอเตอร์ อัตราส่วนความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส และจำนวนชั่วโมงเฉลี่ยของมอเตอร์มาใช้ปรับปรุงวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิม เพื่อลดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดจากวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิม โดยทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดพิกัด 5 HP 4 pole ตั้งแต่ไม่มีภาระโหลด จนถึงโหลดเต็มพิกัดกระแสไฟฟ้า ในสภาวะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบ 2 เฟส และ 3 เฟสในรูปแบบต่างๆ ที่มักเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า หลังจากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วิธีคำนวณแบบดั้งเดิม และแบบที่นำเสนอในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากข้อมูลแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวิธีการที่นำเสนอให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงค่อนข้างมากตลอดย่านกว้างการรับโหลดของมอเตอร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้น่าจะเป็นประโยชน์ในแง่ของการเลือกใช้สมการวิธีการประมาณโหลดด้วยกำลังไฟฟ้า อินพุตให้เหมาะสม และสอดคล้องกับคุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ทำให้สามารถประมาณโหลดมอเตอร์ได้ใกล้เคียงค่าจริงในเชิงปฏิบัติมากยิ่งขึ้น

## 2. นิยามความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

นิยามความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า (Definition of Voltage Unbalance) ที่ใช้อ้างอิงในปัจจุบันมีหลากหลายมาตรฐาน การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในบทความ

นี้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE [5] 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 [6]

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

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

3) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าต่ำสามเฟส (Three-Phase Under Voltage Unbalance) ถ้าระบบไฟฟ้ารับโหลดขนาดใหญ่ทั้งสามเฟสมากเกินไป ทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าต่ำสามเฟส

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

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

6) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินสามเฟส (Three-Phase Over Voltage Unbalance) กรณีแรงดันไฟฟ้าสามเฟสถูกชดเชยด้วยแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดแรงดันสูงเกินกว่าค่าพิกัด และค่าจะไม่เท่ากัน ถ้ากรณีนี้เกิดขึ้นจะต้องปิดระบบ

ไฟฟ้า และทำการปลดตัวเก็บประจุออกจากระบบไฟฟ้า

7) ระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีค่าองศาทางไฟฟ้าไม่เท่ากัน (Unequal Single Phase Angle Displacement) โดยปกติแรงดันไฟฟ้าที่สมดุลจะมีมุมระหว่างเฟสต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ถ้าเกิดมีเฟสใดเฟสหนึ่งจากสามเฟสมีค่า องศาทางไฟฟ้าที่หันเหไปจากปกติ ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเกิดมุมที่ไม่เท่ากันหนึ่งเฟส

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

#### 4. วิธีคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตสำหรับคำนวณหาค่าภาระโหลดของมอเตอร์

การคำนวณหาค่าโหลดด้วยกำลังไฟฟ้าอินพุตแบ่งตามรูปแบบการคำนวณออกเป็น 2 วิธี คือ

##### 4.1 วิธีการคำนวณแบบดั้งเดิม

##### 4.1.1 การคำนวณด้วยค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตรวม

วิธีการนี้เป็นการนำค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตของแต่ละเฟสมาบวกกันได้เป็นค่าของกำลังไฟฟ้าอินพุตรวม ( $P_{in,total}$ ) หลังจากนั้นนำค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตรวมที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โหลด ( $IPM_{exact}$ ) ได้ดังสมการ

$$\% Load \ of \ IPM_{exact} = \frac{P_{in,total}}{P_{in,rated}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ  $P_{in,total} = P_{in,A} + P_{in,B} + P_{in,C}$  (4)

$$\text{และ } P_{in, rated} = \sqrt{3}V_{in, rated}I_{in, rated}PF_{in, rated} \quad (5)$$

ถ้ากำหนดให้

$P_{in, rated}$  คือ กำลังไฟฟ้าอินพุตพิกัดที่แผ่นป้ายมอเตอร์

$V_{in, rated}$  คือ แรงดันไฟฟ้าพิกัดที่แผ่นป้ายมอเตอร์

$I_{in, rated}$  คือ กระแสไฟฟ้าพิกัดที่แผ่นป้ายมอเตอร์

$PF_{in, rated}$  คือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าพิกัดที่แผ่นป้ายมอเตอร์

#### 4.1.2 การคำนวณด้วยค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ย

วิธีการนี้เป็นการนำค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ( $V_{L, avg}$ ) กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ( $I_{L, avg}$ ) และตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ( $PF_{avg}$ ) มาใช้ในการคำนวณ ถ้ากำหนดให้  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  และ  $V_{CA}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าไลน์ AB, BC และ CA ตามลำดับ  $I_A$ ,  $I_B$  และ  $I_C$  เป็นกระแสไฟฟ้าไลน์ A, B และ C ส่วน  $PF_A$ ,  $PF_B$  และ  $PF_C$  คือตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเฟส A, B และ C สามารถคำนวณหาค่าของ  $V_{L, avg} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{3}$ ,  $I_{L, avg} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}$  และ  $PF_{avg} = \frac{PF_A + PF_B + PF_C}{3}$  ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ย ( $P_{in, avg}$ ) คำนวณจาก

$$P_{in, avg} = \sqrt{3}V_{L, avg}I_{L, avg}PF_{avg} \quad (6)$$

ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์โหลดที่คำนวณด้วยค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ย ( $IPM_{avg}$ ) คำนวณได้ดังนี้คือ

$$\% Load of IPM_{avg} = \frac{P_{in, avg}}{P_{in, rated}} \times 100 \quad (7)$$

#### 4.2 วิธีการคำนวณแบบที่นำเสนอ

วิธีการที่นำเสนอนี้เป็นการนำค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตรวมมาดัดแปลง เนื่องจากต้องการปรับปรุงค่า

ความผิดพลาดของการคำนวณแบบดั้งเดิม เพื่อให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์โหลดใกล้เคียงกับค่าจริงมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงมอเตอร์ไม่มีภาระโหลดจนถึงประมาณ 30% ของโหลดเต็มพิกัด ซึ่งเป็นช่วงที่มีโหลดน้อย หรือเรียกว่าย่านโหลดเบา ในย่านโหลดเบา นี้การคำนวณแบบดั้งเดิมมีค่าผิดพลาดสูงมาก

#### 4.2.1 วิธีการการคำนวณแบบประยุกต์ 1

วิธีการนี้เป็นการนำวิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โหลดโดยใช้ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตรวม ( $IPM_{exact}$ ) มาพัฒนา โดยนำค่ากำลังสูญเสียต่างๆ เช่น ค่าสูญเสียคงที่ของมอเตอร์ (Fix Loss) ในกรณีมอเตอร์ไม่มีโหลด และปรับค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตที่นำมาใช้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์โหลดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังเอาต์พุตของมอเตอร์มากที่สุด ได้สมการที่ใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โหลดแบบประยุกต์ 1 ( $IPM_{exact, 1}$ ) เป็นดังนี้

$$\% Load of IPM_{exact, 1} = \left[ \left( \frac{98}{100} \right) \times \left( \frac{P_{in, total}}{P_{in, rated}} \times 100 \right) \right] - \left( \frac{0.44P_{in, rated}}{P_{in, total}} \right) \quad (8)$$

#### 4.2.2 วิธีการการคำนวณแบบประยุกต์ 2

วิธีการคำนวณแบบประยุกต์ 2 ( $IPM_{exact, 2}$ ) เป็นการนำสมการที่ (8) มาพัฒนาโดยนำค่าของ  $\%PVUR$  มาคำนวณร่วมด้วย ได้สมการที่ใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โหลดเป็นดังนี้

$$\% Load of IPM_{exact, 2} = \left( \frac{A \times P_{in, total}}{P_{in, rated}} \times 100 \right) - \left( \frac{0.44P_{in, rated}}{B \times P_{in, total}} \right) \quad (9)$$

$$\text{ค่า } A = \frac{100 - \left( \frac{\%PVUR}{2} \right)}{100} \text{ และ } B = \frac{100 - (3 \times \%PVUR)}{100}$$

### 4.2.3 วิธีการการคำนวณแบบประยุกต์ 3

การคำนวณเปอร์เซ็นต์โหลดแบบประยุกต์ 3 ( $IPM_{exact,3}$ ) เป็นการนำสมการที่ (8) มาพัฒนาโดยนำค่าของ %PVUR และจำนวนชั่วโมงเฉลี่ยของมอเตอร์ ( $P$ ) มาคำนวณร่วมด้วย สมการที่ใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โหลดนี้ ใช้เฉพาะกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติเท่านั้น สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์โหลดมีรายละเอียดเป็นดังนี้

$$\% \text{Load of } IPM_{exact,3} = \left( \frac{C \times P_{in,total}}{P_{in,rated}} \times 100 \right) - \left( \frac{0.44 P_{in,rated}}{D \times P_{in,total}} \right) \quad (10)$$

โดยที่

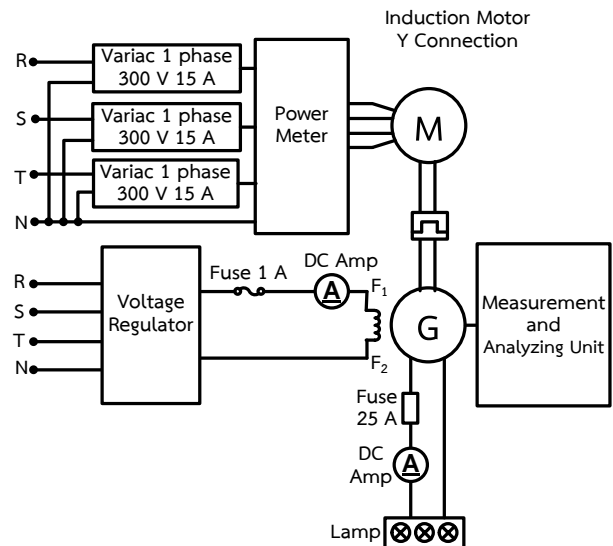
$$C = \frac{100 - \left( \frac{\%PVUR \times P}{4} \right)}{100} \text{ และ } D = \frac{100 - \left( \frac{3 \times \%PVUR \times P}{2} \right)}{100}$$

## 5. ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผล

มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก Class A มีขนาดพิกัด 5 HP (3.7 kW), 4 pole, 50 Hz, 220/380 V, 13.7/7.9 A, 1,420 rpm, PF 0.83

วงจรการทดสอบเป็นดังรูปที่ 2 จากรูปใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติสามชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสให้กับมอเตอร์ทดสอบ โดยต่อขดลวดมอเตอร์แบบสตาร์ ใช้การจ่ายแรงดันไฟฟ้าแยกทีละเฟสเพื่อทำให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ได้แยกอิสระจากกัน ใช้ Power meter วัดค่าแรงดันไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ใช้ Measurement and analyzing unit บันทึกค่าทางกล ได้แก่แรงบิด ความเร็วรอบ และกำลังเอาต์พุตของมอเตอร์



รูปที่ 2 วงจรการทดสอบ

ในการทดสอบ จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบต่ำกว่าปกติ และสูงกว่าปกติที่ค่าความไม่สมดุล 5% และ 7% โดยเลือกใช้ประเภทความไม่สมดุลแบบ 2 เฟส และ 3 เฟส เนื่องจากเป็นรูปแบบความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่พบบ่อยในทางปฏิบัติ ส่วนสถานะแรงดันไฟฟ้าแบบสมดุลที่ต่ำ และสูงกว่าปกติได้ถูกนำเสนอและวิเคราะห์ใน [7] 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 ( $A \neq B, C$ )
- 3) ไม่สมดุลแบบ 3 เฟส โดยแรงดันไฟฟ้าเฟส A มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าเฟส B และไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าเฟส C: 3 ( $A=B, \neq C$ )
- 4) ไม่สมดุลแบบ 3 เฟส โดยที่แรงดันไฟฟ้าเฟส A มีค่าไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าเฟส B และไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าเฟส C: ( $A \neq B \neq C$ )

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์แต่ละเฟสสำหรับใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นดังแสดงในตารางที่ 1 จากตารางในส่วนแรกเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ (Under Voltage Unbalance) และในส่วนหลังเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ (Over Voltage Unbalance)

ตารางที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

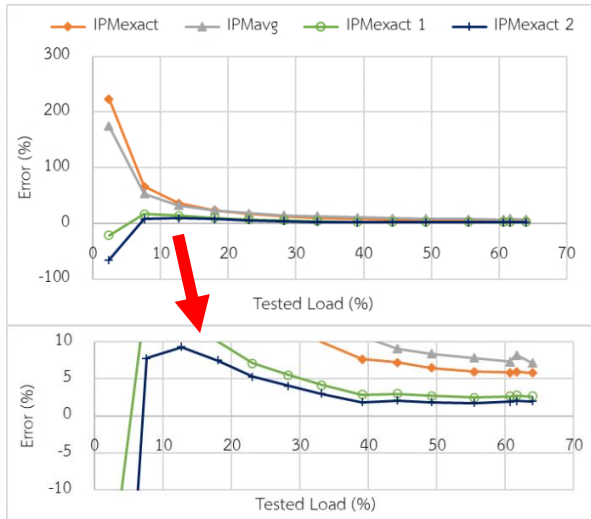
Under Voltage Unbalance				
%PVUR	Type	$V_{an}$ (V)	$V_{bn}$ (V)	$V_{cn}$ (V)
5	2 (A=B, C)	204	204	220
	2 (A≠B, C)	200	208	220
	3 [(A=B), ≠C]	199	199	214.5
	3 (A≠B≠C)	200	190	210
7	2 (A=B, C)	198	198	220
	2 (A≠B, C)	200	196	220
	3 [(A=B), ≠C]	196.5	196.5	218
	3 (A≠B≠C)	200	175	190
Over Voltage Unbalance				
%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

เมื่อทำการทดสอบมอเตอร์เรียบร้อยแล้ว นำค่าของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้รวมที่ได้จากการวัดจริง มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์โหลดด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และวิธีการที่นำเสนอในหัวข้อที่ 4 หลังจากนั้นนำผลคำนวณที่ได้มาพิจารณาเปรียบเทียบเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% Error) โดยใช้การคำนวณดังสมการที่ 11

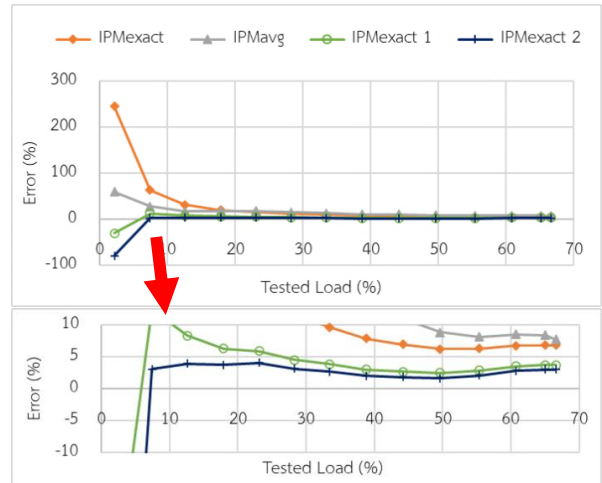
$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Actual data} - \text{Calculated data}}{\text{Actual data}} \times 100 \quad (11)$$

จากนั้นนำความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับเปอร์เซ็นต์การรับภาระโหลดจริงของมอเตอร์มาพล็อตกราฟ ได้กราฟในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบต่ำกว่าปกติดังรูปที่ 3-10 และในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบสูงกว่าปกติเป็นดังรูปที่ 11-18 จากรูปจะเห็นได้ว่า

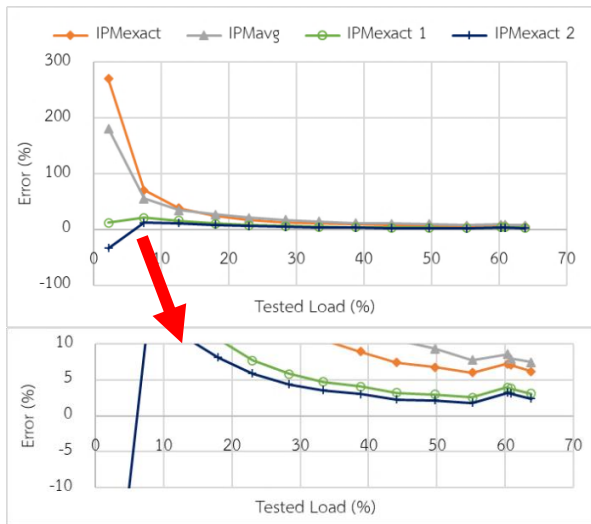
- ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบต่ำกว่าปกติ ทั้งกรณีความไม่สมดุลที่ 5% และ 7% ที่ประเภทความไม่สมดุลแบบ 2 เฟส และ 3 เฟส การประเมินความไม่สมดุลโดยใช้การคำนวณด้วยวิธี  $IPM_{exact,2}$  ให้ค่าใกล้เคียงกับการรับภาระโหลดจริงของมอเตอร์มากที่สุด เมื่อมอเตอร์มีภาระโหลดตั้งแต่ประมาณ  $\geq 10\%$  ของภาระโหลดเต็มพิกัด
- ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบสูงกว่าปกติ ทั้งกรณีความไม่สมดุลที่ 5% และ 7%
  - ที่ประเภทความไม่สมดุลแบบ 2 เฟส การคำนวณด้วยวิธี  $IPM_{exact,3}$  ให้ค่าให้ค่าใกล้เคียงกับการรับภาระโหลดจริงของมอเตอร์มากที่สุด เมื่อมอเตอร์มีภาระโหลดตั้งแต่ประมาณ  $\geq 40\%$  ของภาระโหลดเต็มพิกัด



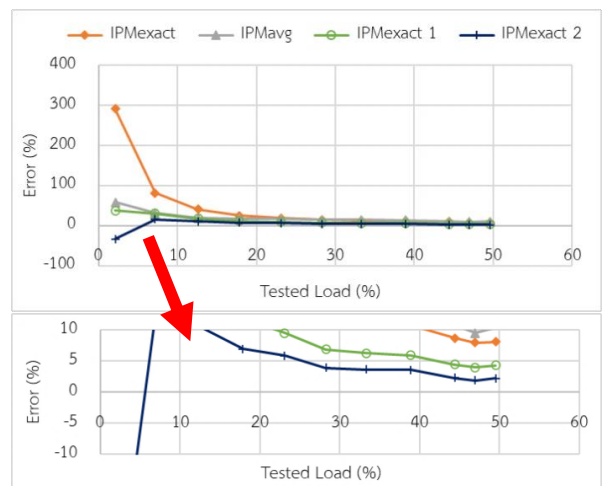
รูปที่ 3 UV 5% กรณี 2(A=B, C)



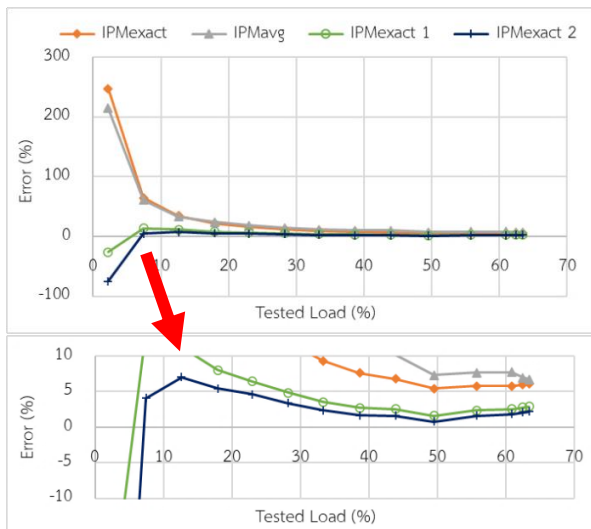
รูปที่ 6 UV 5%กรณี 3(A≠B≠C)



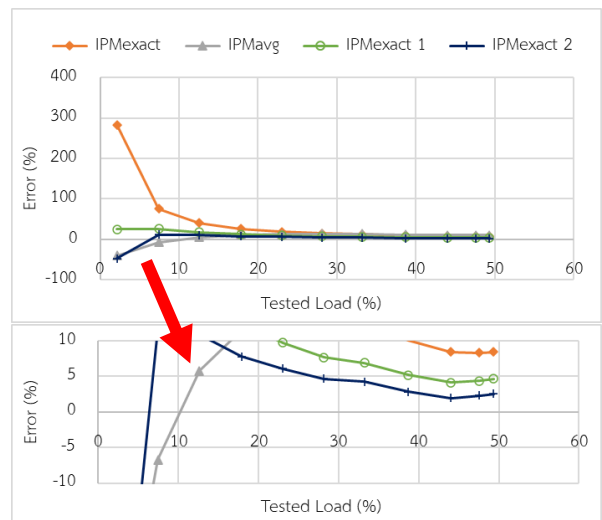
รูปที่ 4 UV 5%กรณี 2(A≠B, C)



รูปที่ 7 UV 7%กรณี 2(A=B, C)

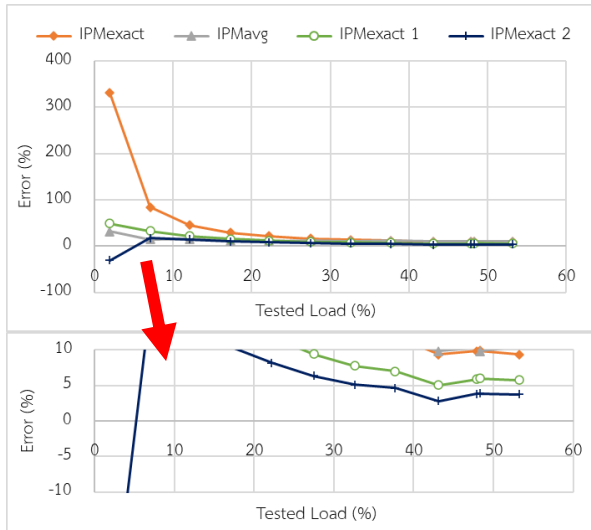


รูปที่ 5 UV 5%กรณี 3[(A=B)≠C]

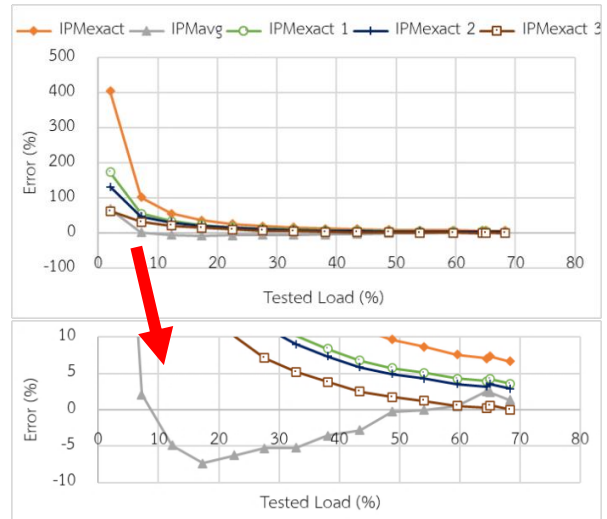


รูปที่ 8 UV 7% กรณี 2(A≠B, C)

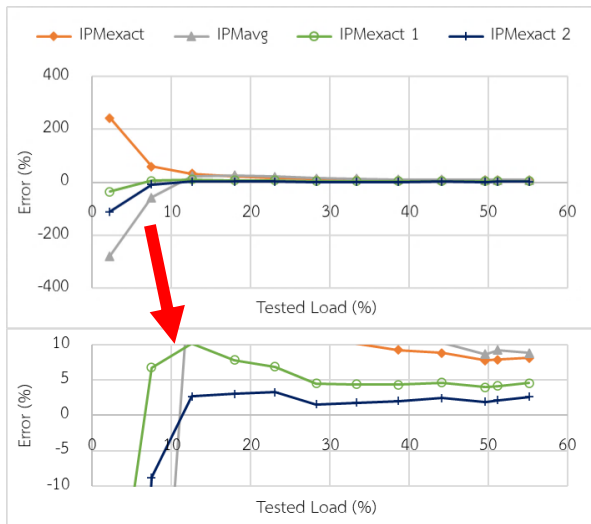




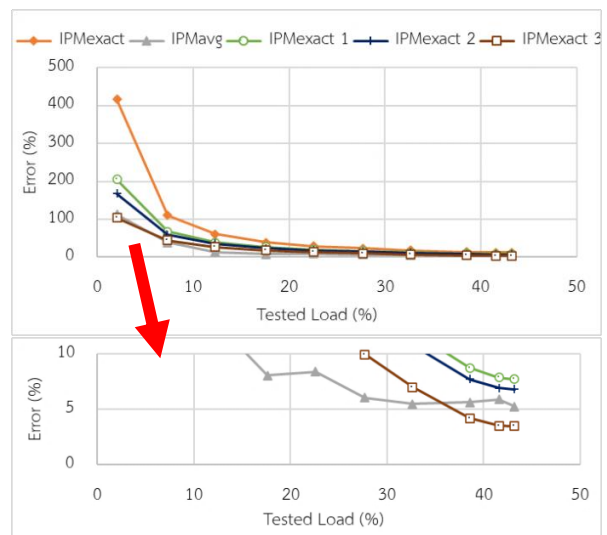
รูปที่ 9 UV 7% กรณี 3(A=B, ≠C)



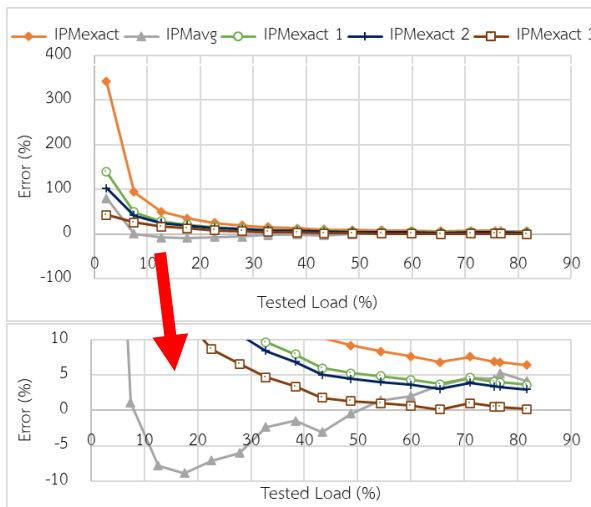
รูปที่ 12 OV 5% กรณี 2(A≠B, C)



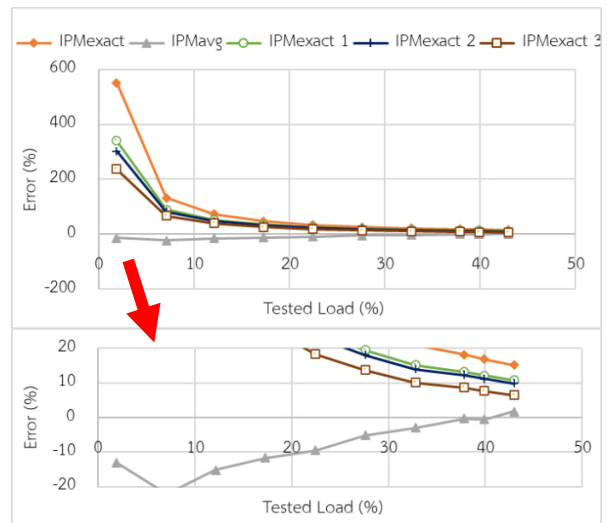
รูปที่ 10 UV 7% กรณี 3(A≠B≠C)



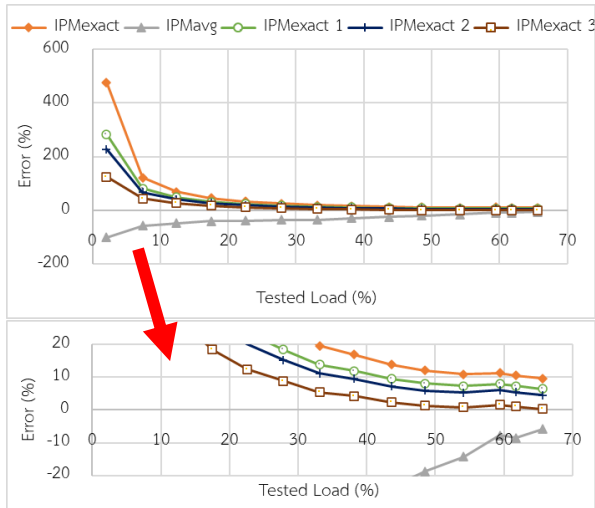
รูปที่ 13 OV 5% กรณี 3[A=B] ≠C



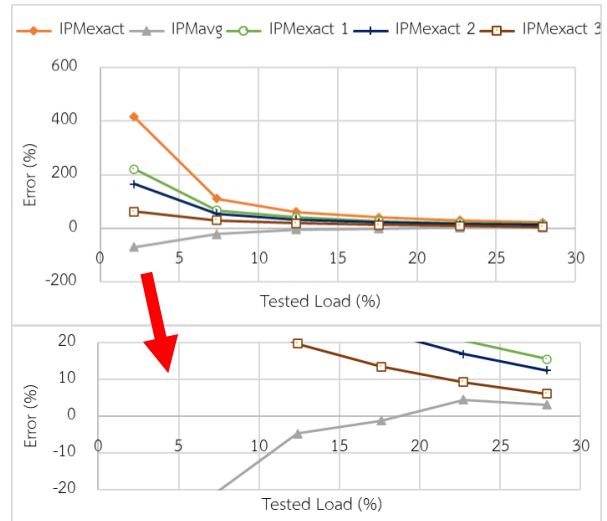
รูปที่ 11 OV 5% กรณี 2(A=B, C)



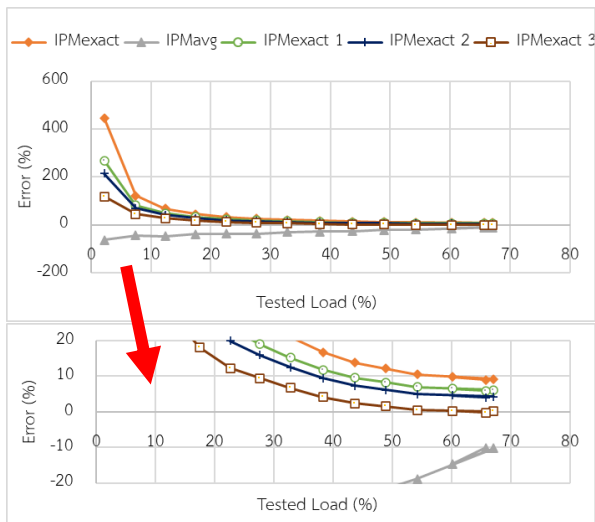
รูปที่ 14 OV 5% กรณี 3(A≠B≠C)



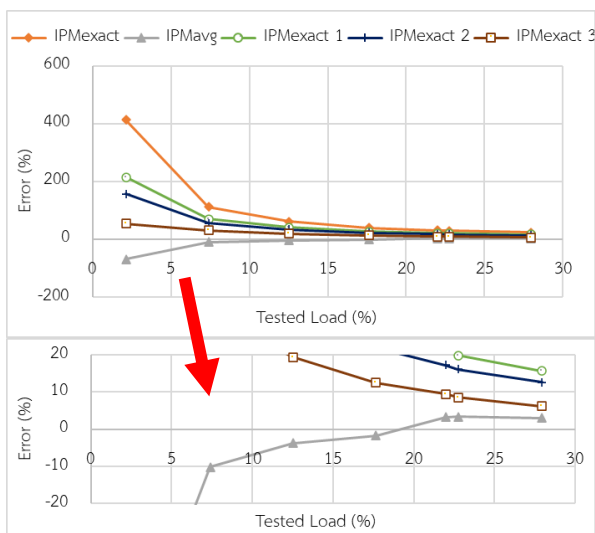
รูปที่ 15 OV 7% กรณี 2(A=B, C)



รูปที่ 18 OV 7% กรณี 3(A≠B≠C)



รูปที่ 16 OV 7% กรณี 2(A≠B, C)



รูปที่ 17 OV 7% กรณี 3[(A=B), ≠C]

➤ ที่ประเภทความไม่สมดุลแบบ 3 เฟส การคำนวณด้วยวิธี  $IPM_{avg}$  ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิมให้ค่าใกล้เคียงกับการรับภาระโหลดจริงของมอเตอร์มากที่สุด

อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบสูงกว่าปกติ 7% ทั้งแบบ 2 เฟส แบบ 3 เฟสนั้นการคำนวณด้วยวิธี  $IPM_{avg}$  ให้ค่า %Error เป็นลบ (ค่าที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าจริง) และการคำนวณด้วยวิธี  $IPM_{exact,3}$  ให้ค่า %Error เป็นบวก (ค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่าจริง) ดังนั้นการประเมินโหลดมอเตอร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบสูงกว่าปกติโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับความไม่สมดุลตั้งแต่ 7% ขึ้นไปควรจะต้องการมีการปรับปรุงเพิ่มเติม หรืออาจจะเลือกวิธีการคำนวณรูปแบบอื่นเพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงตลอดช่วงการรับโหลดของมอเตอร์

## 6. สรุป

จากวิธีการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตที่ใช้สำหรับประมาณค่าภาระโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สามเฟสที่ได้ทำการปรับปรุง และนำเสนอในบทความนี้ ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีสถานะไม่สมดุลแบบต่ำกว่าปกติ และสูงกว่าปกติที่ความไม่สมดุล 5% และ 7% และมีประเภทความไม่สมดุลเป็นแบบ 2 เฟส และ 3 เฟส ในรูปแบบต่าง ๆ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวิธีการที่นำเสนอทำให้เกิดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงโหลดเบา แต่อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้รูปแบบวิธีการคำนวณให้เหมาะสมกับสถานะ และประเภทของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้ายังต้องถูกนำมาพิจารณาร่วมด้วย

### กิตติกรรมประกาศ

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

### เอกสารอ้างอิง

[1] Annette von Jouanne, and Basudeb (Ben) Banerjee, "Assessment of Voltage Unbalance", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 16, NO. 4, OCTOBER 2001, pp. 782-790.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] IEEE 1459-2010: IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2010.

[6] The Motor Challenge, Fact Sheet, Determining Electric Motor Load and Efficiency, a Program of the U.S. Department of Energy, pp. 1-10.

[7] สลิลทิพย์ สินธุสนธิชาติ (2564). การพัฒนาการประมาณค่าโหลดด้วยวิธีการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุล และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44, โรงแรมดิอิมเพลส น่าน จังหวัดน่าน