

การเปรียบเทียบวงจรสมมูลเพื่อนำมาใช้ทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในสถานะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุลและแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในรูปแบบต่าง ๆ

Equivalent Circuits Comparison for Performance Prediction of Three-phase Induction Motor under Various Types of Balanced and Unbalanced Voltage Supplies

สลิลทิพย์ สิ้นธุสนธิชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

E-mail: salitips@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวงจรสมมูลเพื่อนำมาใช้ทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุล และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในรูปแบบต่าง ๆ การคำนวณความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 วงจรสมมูลที่นำมาใช้เพื่อทำนายสมรรถนะของมอเตอร์มีทั้งหมด 4 รูปแบบ เพื่อค้นหาวงจรสมมูลที่เหมาะสมจึงทำการทดสอบมอเตอร์จริงภายใต้ได้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ไม่มีภาระโหลด จนถึงภาระโหลดเต็มพิกัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ หลังจากนั้นนำค่าสลิปที่ได้จากการทดสอบจริงมาแทนค่าลงในวงจรสมมูลแต่ละรูปแบบ และนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง ซึ่งจะทำให้ทราบถึงรูปแบบวงจรสมมูลที่เหมาะสมจะนำมาใช้ทำนายสมรรถนะของมอเตอร์มากที่สุด

Abstract

This paper proposes equivalent circuits comparison for performance prediction of three-

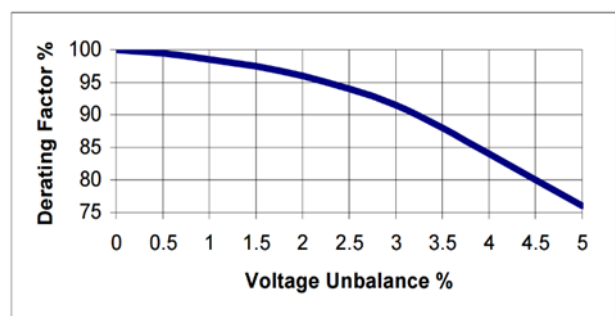
phase induction motor under various types of balanced and unbalanced voltage supplies. Unbalance voltage calculation is based on IEEE Standard 1459-2010. Four equivalent circuits are in consideration. To find out an appropriate equivalent circuit, the motors are authentically tested from no load to full load current. The given slips are put into the equivalent circuits for motor performance calculation. The computed results are compared with the tested ones. This is advantage for the equivalent circuit selection.

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นมอเตอร์ที่ถูกนิยมใช้ อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม ตลอดจนอาคารสำนักงานรวมถึงที่อยู่อาศัย เนื่องจากมีพิสัยการใช้งานที่หลากหลาย ทำให้สามารถเลือกขนาดมอเตอร์ให้เหมาะสมกับขนาด และลักษณะการใช้งานสำหรับเครื่องจักรภายในโรงงานอุตสาหกรรมตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ รวมทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นมอเตอร์ที่สามารถทำงานได้ดีใน

สภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อตัวมอเตอร์ และต้องการการบำรุงรักษาไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตามมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมักจะประสบปัญหาเกี่ยวกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งมีสาเหตุมาจากโหลดหนึ่งเฟสในระบบไฟฟ้าที่มีผลทำให้การใช้ไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุลที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า คุณสมบัติและสมรรถนะของมอเตอร์จะเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ แต่ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีค่าแตกต่างจากพิกัดแรงดันไฟฟ้า และ/หรือมีสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทั้งในเรื่องของคุณสมบัติ และสมรรถนะต่าง ๆ เนื่องจากเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟสในขดลวดโรเตอร์ และขดลวดสเตเตอร์จะไม่สมมาตร ทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งอาจมีค่าสูงประมาณ 6-10 เท่าของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูงส่งผลทำให้ความสูญเสียเนื่องจากขดลวด I^2R มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดความร้อนของฉนวน ซึ่งมีผลต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์โดยตรง รวมทั้งมอเตอร์มีความร้อนเกิดขึ้นผิดปกติเนื่องจากมีกระแสไฟฟาลำดับลบ (Negative sequence current) ไหลเข้ามอเตอร์เป็นจำนวนมาก กระแสไฟฟาลำดับลบนี้อาจจะไปสร้างสนามแม่เหล็กต้านกับสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดกำลังงาน มีผลทำให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลง เอกสารอ้างอิง [1] ได้กำหนดค่าตัวประกอบลดพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อใช้ในการลดการใช้งานของมอเตอร์ลง เมื่อมอเตอร์ถูกนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลดังแสดง

ในรูปที่ 1 จากรูปจะเห็นว่าในสถานะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลประมาณ 5% ค่าตัวประกอบลดมีค่าประมาณ 75% ดังนั้นในสถานะนี้มอเตอร์จึงสามารถรับโหลดได้ลดลงเหลือเพียงประมาณ 75% ของพิกัดมอเตอร์ที่แสดงบนแผ่นป้าย ซึ่งถ้ามอเตอร์รับโหลดมากกว่าค่าที่นำเสนอจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ทั้งในด้านสมรรถนะ และประสิทธิภาพของมอเตอร์ [2-4]



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้ากับค่าตัวประกอบลดพิกัดของมอเตอร์

งานวิจัยนี้นำเสนอการประเมินวิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเพื่อนำมาใช้ทำนายสมรรถนะมอเตอร์ในสถานะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุล และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในรูปแบบต่าง ๆ โดยใช้การคำนวณความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 [5] ซึ่งเป็นการคำนวณโดยใช้อัตราส่วนความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส (Phase Voltage Unbalance Ratio: PVUR) และเพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์ จึงทำการทดสอบมอเตอร์จริงตั้งแต่ไม่มีภาระโหลด จนถึงภาระโหลดเต็มพิกัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ในสถานะที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุล แรงดันไฟฟ้าสมดุลแบบ

ต่ำกว่าปกติ และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติในรูปแบบต่าง ๆ หลังจากนั้นทำการทดสอบมอเตอร์ตามรูปแบบการทดสอบประเภทต่าง ๆ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลจริงของมอเตอร์ที่มีรูปแบบวิธีการคำนวณแตกต่างกัน 4 วิธีคือวงจรสมมูลแบบแยกเฟส วงจรสมมูลแบบค่าเฉลี่ยต่อเฟส วงจรสมมูลตามมาตรฐาน IEEE112-2017 [6] และวงจรสมมูลองค์ประกอบสมมาตร ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากคำนวณแต่ละวิธีที่ได้ในวงจรสมมูลถูกนำมาใช้เพื่อทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ทั้งในส่วนของแรงบิด และประสิทธิภาพโดยใช้ค่าสลิปที่ได้จากการทดสอบการรับภาระโหลดของมอเตอร์จริง แทนลงในวงจรสมมูล หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบจริง เพื่อศึกษา และหาข้อสรุปสำหรับวงจรสมมูล และวิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าใกล้เคียงผลการทดสอบจริงมากที่สุด

2. ประเภทของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

ประเภทของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสามารถแบ่งออกได้เป็น 8 ประเภทดังนี้ [7]

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) เกิดขึ้นเนื่องจากการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบให้มีค่าพิคค ซึ่งโดยปกติจะใช้ตัวเก็บประจุในการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบ แต่ถ้าหากเฟสใดเฟสหนึ่งของระบบไฟฟ้าสามเฟสมีการชดเชยที่มากเกินไปจะทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินที่เฟสนั้น

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

6) ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกินสามเฟส (Three Phase Over Voltage Unbalance) กรณีแรงดันไฟฟ้าสามเฟสถูกชดเชยด้วยแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดแรงดันสูงเกินกว่าค่าพิคค และค่าจะไม่เท่ากัน ถ้ากรณีนี้เกิดขึ้นจะต้องปิดระบบไฟฟ้าและทำการปลดตัวเก็บประจุออกจากระบบไฟฟ้า

7) ระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีค่าองศาทางไฟฟ้าไม่เท่ากัน (Unequal Single Phase Angle

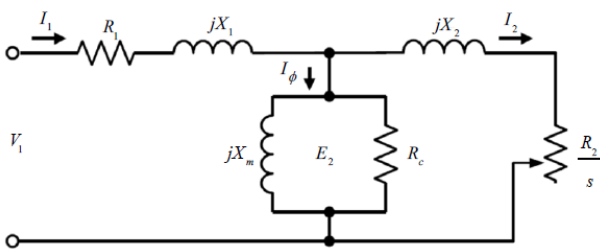
Displacement) โดยปกติแรงดันไฟฟ้าที่สมดุลจะมีมุมระหว่างเฟสต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ถ้าเกิดมีเฟสใดเฟสหนึ่งจากสามเฟสมีค่า องศาทางไฟฟ้าที่หันเหไปจากปกติ ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเกิดมุมที่ไม่เท่ากันหนึ่งเฟส

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

3. วงจรสมมูล และรูปแบบการทดสอบ

3.1 วงจรสมมูล

ในงานวิจัยนี้ใช้วงจรสมมูลจริงมาศึกษา และวิจัย วงจรสมมูลจริงต่อเฟสเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์เป็นดังรูปที่ 2 ค่าของ V_1 , I_1 , R_1 และ X_1 คือแรงดันไฟฟ้าพิกัด กระแสไฟฟ้าพิกัด ความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์ ตามลำดับ R_c เป็นค่าความต้านทานความสูญเสียในแกนเหล็ก X_m เป็นค่ารีแอกแตนซ์สร้างสนามแม่เหล็ก R_2 และ X_2 เป็นความต้านทาน และรีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์ และ s คือค่าสลิป



รูปที่ 2 วงจรสมมูลจริงต่อเฟสพิจารณาทางด้านสเตเตอร์

3.2 รูปแบบการทดสอบ

การทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูล และหาค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านลมเพื่อใช้คำนวณหาค่าประสิทธิภาพมอเตอร์นั้นประกอบด้วย การทดสอบ 4 การทดสอบดังนี้คือ

3.2.1 การทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล (No Load Test)

การทดสอบนี้กระทำโดย ต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบสตาร์ และที่แกนเพลามอเตอร์ ต้องไม่มีโหลด หลังจากนั้นจ่ายแรงดันไฟฟ้าจนถึงพิกัดแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ และทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแต่ละเฟส ได้ค่าเป็น V_{nl} , I_{nl} , P_{nl} ตามลำดับ

3.2.2 การทดสอบแบบยึดโรเตอร์ (Blocked Rotor Test)

การทดสอบนี้กระทำโดย ต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบสตาร์ และยึดจับแกนเพลาให้หยุดนิ่งอยู่กับที่ หลังจากนั้นจ่ายแรงดันไฟฟ้าจนถึงพิกัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ และทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแต่ละเฟส ได้ค่าเป็น V_{bl} , I_{bl} , P_{bl} การทดสอบนี้กระทำ 2 แบบ คือ จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่พิกัดใช้งานสำหรับวงจรสมมูลแบบแยกเฟส และแบบค่าเฉลี่ยต่อเฟส และจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 12.5% ของความถี่พิกัดใช้งานสำหรับวงจรสมมูลตามมาตรฐาน IEEE112-2017 และวงจรสมมูลตามองค์ประกอบสมมาตร ซึ่งเป็นการกระทำภายใต้เงื่อนไขที่กระแสโรเตอร์ และความถี่ไฟโรเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นในสภาวะขณะมอเตอร์ทำงาน

3.2.3 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Test)

การทดสอบนี้กระทำโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วของมอเตอร์คู่ใดคู่หนึ่ง แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ตั้งแต่ค่าน้อย ๆ จนถึงพิกัดกระแสไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ (R_1)

3.2.4 การทดสอบลดค่าแรงดันไฟฟ้า (Decreasing Voltage Test)

การทดสอบนี้ต้องวงจรแบบเดียวกับการทดสอบในสภาวะไม่มีโหลด และจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตั้งแต่ค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าพิกัด 10% หลังจากนั้นลดค่าแรงดันไฟฟ้าลงเป็นลำดับ โดยแต่ละลำดับทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในงานวิจัยนี้จ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 240 V - 60 V หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า $P_{r,total}$ ซึ่งประกอบด้วยค่าความสูญเสียสองส่วนคือ ความสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{core}) และค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านลม ($P_{f\&w}$) ดังนั้นจึงต้องแยกความสูญเสียทั้งสองออกจากกันโดยการพล็อตกราฟเพื่อหาจุดตัดแกน y ซึ่งคือค่า $P_{f\&w}$ ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับมอเตอร์แต่ละตัว หลังจากนั้นคำนวณหา P_{core} จากผลต่างระหว่าง $P_{r,total}$ และ $P_{f\&w}$

4. วิธีการหาค่าพารามิเตอร์

4.1 วงจรสมมูลแบบแยกเฟส

วงจรสมมูลแบบแยกเฟสใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดของแต่ละเฟสมาแทนค่า ดังนั้นในการคำนวณจึง

คิดค่าพารามิเตอร์ของเฟส a, b และ c แยกแต่ละเฟส ค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของแต่ละเฟสจึงมีค่าไม่เท่ากัน สมการที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

- การทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลใช้คำนวณหาค่า เป็นค่าความต้านทานความสูญเสียในแกนเหล็ก R_c และค่ารีแอคแตนซ์การสังวรสนามแม่เหล็ก X_m ของแต่ละเฟสดังนี้

$$P_{r,total} = (P_{nl,a} - I_{nl,a}^2 R_{1,a}) + (P_{nl,b} - I_{nl,b}^2 R_{1,b}) + (P_{nl,c} - I_{nl,c}^2 R_{1,c}) \quad (1)$$

$$P_{core} = P_{r,total} - P_{f\&w} \quad (2)$$

ดังนั้นค่า R_c และ X_m ของแต่ละเฟสคำนวณได้จาก

$$R_c = \frac{V_{nl}^2}{\left(\frac{P_{core}}{3}\right)} \quad (3)$$

$$X_m = \frac{V_{nl}}{I_m} \quad (4)$$

โดยที่

$$I_m = I_{nl} \sin \theta \quad (5)$$

- การทดสอบแบบยึดโรเตอร์ ใช้คำนวณหาค่า R_2 , X_2 และ X_1 ดังนี้

$$R_{bl} = \frac{V_{bl}^2}{P_{bl}} = R_1 + R_2 \quad (6)$$

$$X_{bl} = \sqrt{Z_{bl}^2 - R_{bl}^2} = X_1 + X_2 \quad (7)$$

$$R_2 = R_{bl} - R_1 \quad (8)$$

สำหรับมอเตอร์ Class A จะได้ว่า

$$X_2 = X_1 = \frac{X_{bl}}{2} \quad (9)$$

4.2 วงจรสมมูลแบบค่าเฉลี่ยต่อเฟส

วงจรสมมูลนี้ใช้สมการคำนวณเหมือนกับวงจรสมมูลแบบแยกเฟสในหัวข้อที่ 4.1 แตกต่างกันเฉพาะตัวเลขที่นำมาแทนค่า โดยวงจรสมมูลแบบแยกเฟสใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดของแต่ละเฟสมาแทนค่า ดังนั้นในการคำนวณจึงคิดที่ละเฟส จึงทำให้วงจรสมมูลของมอเตอร์แต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน ในขณะที่วงจรสมมูลแบบค่าเฉลี่ยต่อเฟสเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งสามเฟสมาหาค่าเฉลี่ย หลังจากนั้นจึงนำผลเฉลี่ยที่ได้มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพียงชุดเดียวสำหรับมอเตอร์แต่ละตัว ในการคำนวณหาค่าเริ่มต้นจากหาค่า $P_{r,total}$ ดังนี้คือ

$$P_{nl} = P_{nl,a} + P_{nl,b} + P_{nl,c} = 3I_{nl,avg}^2 R_{1,avg} + P_{r,total} \quad (10)$$

ดังนั้น

$$P_{r,total} = P_{nl} - 3I_{nl,avg}^2 R_{1,avg} \quad (11)$$

หลังจากนั้นคำนวณหาค่า R_c และ X_m เฉลี่ยจาก

$$R_{c,avg} = \frac{3V_{nl,avg}^2}{P_{core}} \quad (12)$$

$$X_{m,avg} = \frac{V_{nl,avg}}{I_{m,avg}} \quad (13)$$

โดยที่

$$I_{m,avg} = I_{nl,avg} \sin \theta_{avg} \quad (14)$$

$$R_{bl,avg} = \frac{V_{bl,avg}^2}{P_{bl,a} + P_{bl,b} + P_{bl,c}} = R_{1,avg} + R_{2,avg} \quad (15)$$

$$X_{bl,avg} = \sqrt{Z_{bl,avg}^2 - R_{bl,avg}^2} = X_1 + X_2 \quad (16)$$

$$R_2 = R_{bl,avg} - R_{1,avg} \quad (17)$$

$$X_2 = X_1 = \frac{X_{bl}}{2} \quad (18)$$

4.3 วงจรสมมูลตามมาตรฐาน IEEE112-2017

ในมาตรฐาน IEEE112-2017 สำหรับมอเตอร์ Class A กำหนดความสัมพันธ์ระหว่าง X_1 และ X_2 มีค่าเท่ากัน สำหรับการคำนวณกำลังไฟฟ้าเสมือนจากการทดสอบแบบไร้ภาระทางกล (Q_{nl}) และกำลังไฟฟ้าเสมือนจากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์ (Q_{bl}) ใช้สมการดังนี้

$$Q_{nl} = \sqrt{(mV_{nl}I_{nl})^2 - P_{nl}^2} \quad (19)$$

$$Q_{bl} = \sqrt{(mV_{bl}I_{bl})^2 - P_{bl}^2} \quad (20)$$

ค่ารีแอกแตนซ์ในการสร้างสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการดังนี้

$$X_m = \frac{mV_{nl}^2}{Q_{nl} - (mI_{nl}^2 X_1)} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)^2} \quad (21)$$

หลังจากนั้นคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ที่สเตเตอร์ที่ความถี่ที่ทดสอบได้ดังนี้

$$X_{1,bl} = \frac{Q_{bl}}{mI_{bl}^2 \times \left[1 + \left(\frac{X_1}{X_2}\right) + \frac{X_1}{X_m}\right]} \times \left[\frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m}\right] \quad (22)$$

ค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่พิกัดคำนวณได้จาก

$$X_1 = \frac{f}{f_{bl}} \times X_{1,bl} \quad (23)$$

ในการคำนวณต้องคำนวณแบบวนลูป ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการคำนวณทั้งหมด 4 ขั้นตอนดังนี้

(1) คำนวณหาค่า X_m โดยกำหนดให้ $\frac{X_1}{X_m}$ และ X_1 เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1

(2) คำนวณหาค่า $X_{1,bl}$ โดยกำหนดให้ $\frac{X_1}{X_m}$ เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1

(3) คำนวณหาค่า X_1 โดยใช้ค่า $X_{1,bl}$ ที่ได้จากขั้นตอนที่ (2)

(4) เช็คค่า %Error X_1 กับ X_m ถ้ายังไม่เท่ากับ 0 % ให้ย้อนกลับไปคำนวณตามขั้นตอนที่ (1) จนค่า %Error X_1 กับ X_m มีค่าเท่ากับ 0% แล้วนำค่า X_m , $X_{1,bl}$, X_1 ไปใช้ในการคำนวณลำดับถัดไปดังนี้

$$X_{2,bl} = \frac{X_{1,bl}}{\left(\frac{X_1}{X_2}\right)} \quad (24)$$

กำหนดค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่พิกัดได้จาก

$$X_2 = \frac{f}{f_{bl}} \times X_{2,bl} \quad (25)$$

$$G_c = \frac{P_{nl}}{mV_{nl}^2} \times \left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)^2 \quad (26)$$

ดังนั้นค่าความต้านทานความสูญเสียในแกนเหล็กสามารถคำนวณจาก

$$R_c = \frac{1}{G_c} \quad (27)$$

และค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์คือ

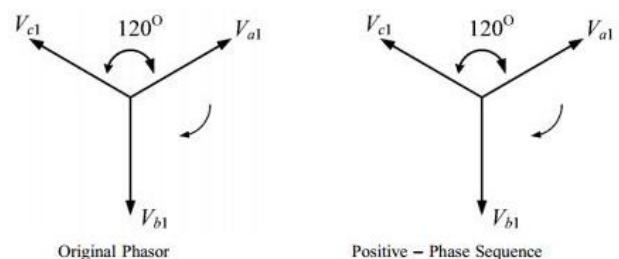
$$R_2 = \left(\frac{P_{bl}}{mI_{bl}^2} - R_1\right) \times \left(1 + \frac{X_2}{X_m}\right) - \left(\frac{X_2}{X_1}\right)^2 \times (X_{1,bl}^2 G_c) \quad (28)$$

4.4 วงจรสมมูลตามองค์ประกอบสมมาตร

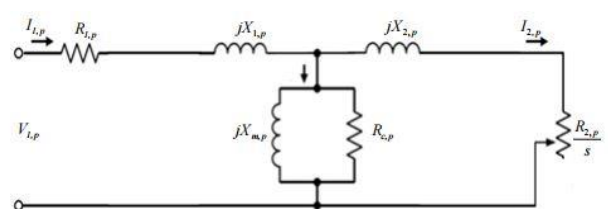
ระบบไฟฟ้าสามเฟส แยกส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Components) เป็น 3 องค์ประกอบคือ องค์ประกอบลำดับบวก (Positive – Sequence Components) องค์ประกอบลำดับลบ (Negative – Sequence Components) องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero – Sequence Components)

4.4.1 องค์ประกอบลำดับบวก

องค์ประกอบลำดับบวกของระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส คือแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส และมีมุมต่างเฟสเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้า มีลำดับเฟส (Phase Sequence) เหมือนกันกับเฟสเซอร์เดิม (Original Phasor) ซึ่งส่งผลทำให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา ดังรูปที่ 3 (ก) วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำลำดับบวกต่อเฟสเป็นดังแสดงในรูปที่ 3 (ข)



(ก) องค์ประกอบลำดับบวก



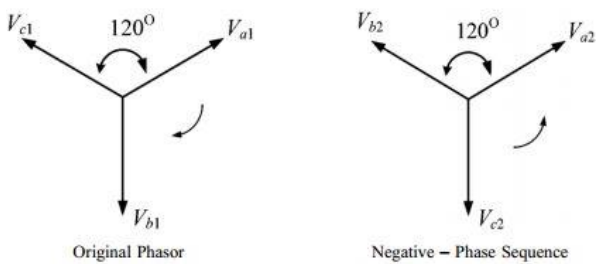
(ข) วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำรูปที่ 3 คุณสมบัติลำดับบวก

4.4.2 องค์ประกอบลำดับลบ

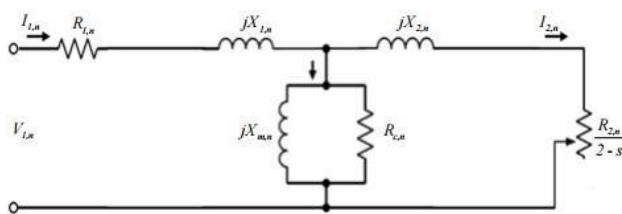
องค์ประกอบลำดับลบของระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส คือแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส และมีมุมต่างเฟสเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้า มีลำดับเฟส (Phase Sequence) ตรงข้ามกับเฟสเซอร์เดิม (Original Phasor) ซึ่งส่งผลทำให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา คุณสมบัติ และวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำลำดับลบต่อเฟสเป็นดังแสดงในรูปที่ 4

4.4.3 องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero – Sequence Components)

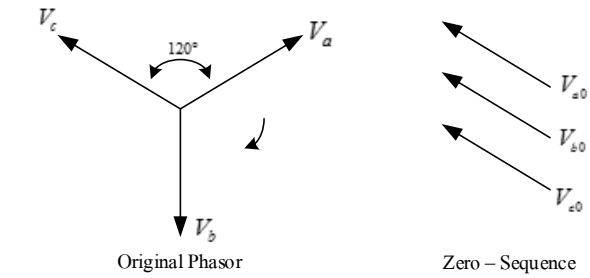
องค์ประกอบลำดับศูนย์ของระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส คือแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน และมีมุมต่างเฟสเท่ากับ 0 องศา (มีทิศทางไปทางเดียวกัน) จะไม่ส่งผลต่อการหมุนของมอเตอร์ คุณสมบัติ และวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำลำดับศูนย์ต่อเฟสเป็นดังรูปที่ 5



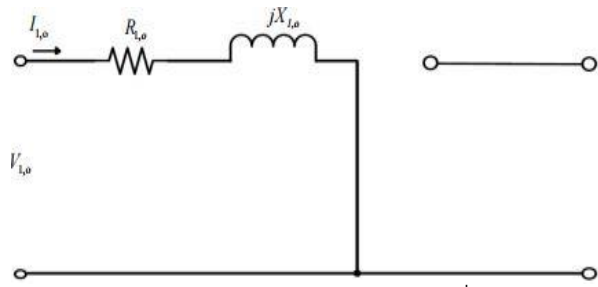
(ก) องค์ประกอบลำดับลบ



(ข) วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำรูปที่ 4 คุณสมบัติลำดับลบ



(ก) องค์ประกอบลำดับศูนย์



(ข) วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำรูปที่ 5 คุณสมบัติลำดับศูนย์

โดยแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสเซอร์เดิมที่ไม่สมดุล จะเป็นผลบวกของส่วนประกอบของตัวมัน ซึ่งสามารถแสดงเฟสเซอร์เดิมในเทอมขององค์ประกอบสมมาตรได้ดังนี้

$$V_a = V_{p,a} + V_{n,a} + V_{0,a} \quad (29)$$

$$V_b = V_{p,b} + V_{n,b} + V_{0,b} \quad (30)$$

$$V_c = V_{p,c} + V_{n,c} + V_{0,c} \quad (31)$$

เมื่อ V_p, V_n และ V_0 คือแรงดันไฟฟ้าลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ตามลำดับ

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลต่อเฟสของทั้งองค์ประกอบลำดับบวก และองค์ประกอบลำดับลบใช้การคำนวณตามมาตรฐาน IEEE112-2017 ส่วนองค์ประกอบลำดับศูนย์ใช้การสร้างสมการแรงดันไฟฟ้าลำดับศูนย์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูล

5. ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผล

มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก และเป็นมอเตอร์ Cass A มี 2 ขนาดพิกัดที่ใช้ในการทดสอบ คือ

- พิกัด 2 HP, 4 pole, 50 Hz, 220/380 V, 6.2/3.6 A, 1450 rpm
- พิกัด 5 HP, 4 pole, 50 Hz, 220/380 V, 13.7/7.9 A, 1420 rpm

ในการทดสอบ ทำการต่อมอเตอร์ทดสอบทั้งสองพิกัดแบบสตาร์ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะต่าง ๆ ที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน 3 ลักษณะ ดังนี้คือ

- 1) สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล: โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับพิกัด ต่ำกว่าพิกัด 5%, 7% และ 9% และสูงกว่าพิกัด 5%, 7% และ 9%
- 2) สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล: โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่าปกติ 5%, 7% และ 9%
- 3) สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล: โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่าปกติ 5%, 7% และ 9%

สำหรับสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลนั้น ทำการทดสอบ 3 กรณี คือ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบหนึ่งเฟส สองเฟส และสามเฟส การคำนวณความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ซึ่งเป็นการหาอัตราส่วนความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส (Phase Voltage Unbalance Ratio; %PVUR) คำนวณโดยใช้ค่าส่วนต่างที่มากที่สุดของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสเฉลี่ย ซึ่งมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$\%PVUR = \text{Max} \left[\frac{V_{AN} - V_{phase,avg}, V_{BN} - V_{phase,avg}, V_{CN} - V_{phase,avg}}{V_{phase,avg}} \right] \times 100 \quad (32)$$

ค่าของแรงดันไฟฟ้าเฟสเฉลี่ย ($V_{phase,avg}$) สามารถหาได้จากสมการ

$$V_{phase,avg} = \frac{V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}}{3} \quad (33)$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์แต่ละเฟสสำหรับใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นดังแสดงในตารางที่ 1 จากตารางในส่วนแรกเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าสมดุลที่จ่ายให้กับมอเตอร์แต่ละเฟส ประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าที่พิกัด (Rated Voltage Balance), แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่าพิกัด (Under Voltage Balance) และแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่าพิกัด (Over Voltage Balance) และในส่วนหลังเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ (Under Voltage Unbalance) และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ (Over Voltage Unbalance) โดยพิจารณาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าแยกตามประเภทความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า ตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2 ได้เป็น 3 ประเภท คือ

- ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า แบบ 1-phase
- ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า แบบ 2-phase ซึ่งประกอบด้วยแบบที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน ($2(A=B)$) และแบบที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าไม่เท่ากัน ($2(A \neq B)$)
- ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าแบบ 3-phase แบบที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากันสองเฟส ($3(A=B)$)

และแบบที่แรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีค่าไม่เท่ากัน
(3(A≠B))

ตารางที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

Voltage balance				
Type		Va	Vb	Vc
Rated Voltage Balance		220	220	220
5% Under Voltage Balance		209	209	209
7% Under Voltage Balance		204.6	204.6	204.6
9% Under Voltage Balance		200.2	200.2	200.2
5% Over Voltage Balance		231	231	231
7% Over Voltage Balance		235.4	235.4	235.4
9% Over Voltage Balance		239.8	239.8	239.8
Voltage Unbalance				
Type	Phase	Va	Vb	Vc
5% Under Voltage Unbalance	1	203.7	220	220
	2 (A=B)	204	204	220
	2 (A≠B)	199	210	220
	3 (A=B)	202.3	202.3	218
	3 (A≠B)	188.5	179	198
7% Under Voltage Unbalance	1	197.5	220	220
	2 (A=B)	198.3	198.3	220
	2 (A≠B)	191.7	205	220
	3 (A=B)	189.3	189.3	210
	3 (A≠B)	184	200	210
9% Under Voltage Unbalance	1	191.5	220	220
	2 (A=B)	192.7	192.7	220
	2 (A≠B)	198	187	220
	3 (A=B)	184.7	184.7	211
	3 (A≠B)	179.5	190	211
5% Over Voltage Unbalance	1	237	220	220
	2 (A=B)	237.5	237.5	220
	2 (A≠B)	235	240	220
	3 (A=B)	232	232	250
	3 (A≠B)	240	227	250
7% Over Voltage Unbalance	1	244	220	220
	2 (A=B)	245	245	220
	2 (A≠B)	250	230.5	220
	3 (A=B)	250	250	224.5
	3 (A≠B)	223	227.5	250
9% Over Voltage Unbalance	1	251.3	220	220
	2 (A=B)	253	253	220
	2 (A≠B)	260	235	220
	3 (A=B)	227.5	227.5	260
	3 (A≠B)	225	230	260

หลังจากนั้นทำการทดสอบมอเตอร์ในรูปแบบต่าง ๆ ตามหัวข้อที่ 3 เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลทั้ง 4 รูปแบบ ได้ผลการทดสอบ No load test เป็นดังตารางที่ 2 และผลการทดสอบ Blocked rotor test เป็นดังตารางที่ 3

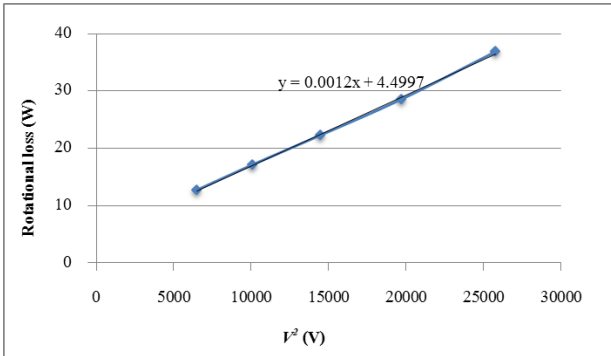
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ No load test

มอเตอร์ 2 HP 4 Pole			
Phase	V_{nl} (V)	I_{nl} (A)	P_{nl} (W)
a	220.3700	2.2100	50.00
b	220.1000	2.1800	75.40
c	220.3800	2.3100	49.50
avg	220.2833	2.2333	58.30
มอเตอร์ 5 HP 4 Pole			
Phase	V_{nl} (V)	I_{nl} (A)	P_{nl} (W)
a	220.3600	3.4807	95.20
b	220.3600	3.3132	93.70
c	220.5000	3.4815	53.90
avg	220.4067	3.4251	80.93

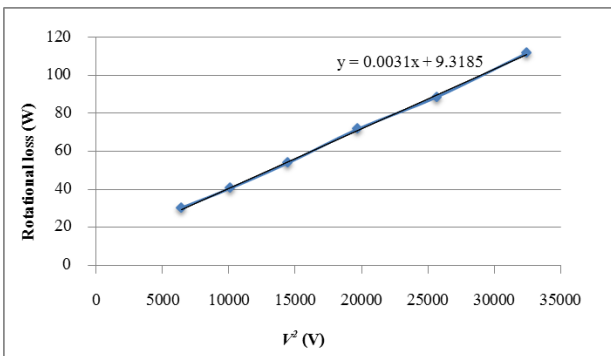
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ Blocked rotor test

มอเตอร์ 2 HP 4 Pole			
Phase	V_{bl} (V)	I_{bl} (A)	P_{bl} (W)
a	46.94	3.6340	112.40
b	46.73	3.6370	112.57
c	47.12	3.6043	112.77
avg	46.93	3.6251	112.58
มอเตอร์ 5 HP 4 Pole			
Phase	V_{bl} (V)	I_{bl} (A)	P_{bl} (W)
a	43.56	7.9540	209.33
b	43.27	7.9647	208.13
c	43.28	7.9367	215.20
avg	43.37	7.9518	210.89

จากการทดสอบ DC test เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณ และพล็อตกราฟหาค่าความสูญเสีย $P_{f\&w}$ โดยสร้างสมการเส้นแนวโน้มเพื่อหาจุดตัดแกน y ซึ่งเป็นค่าความสูญเสีย $P_{f\&w}$ ได้ข้อมูลเป็นดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7

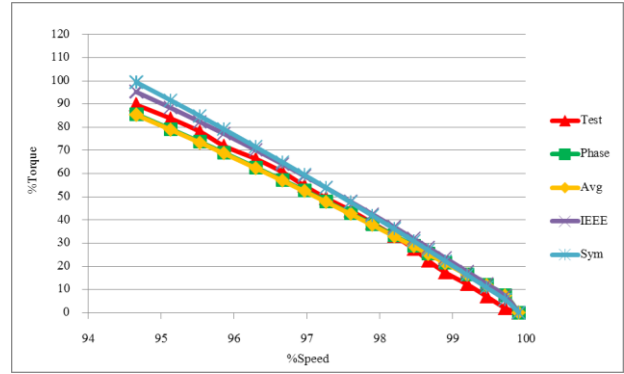


รูปที่ 6 ค่าความสูญเสีย $P_{f\&w}$ ของมอเตอร์ขนาด 2 HP

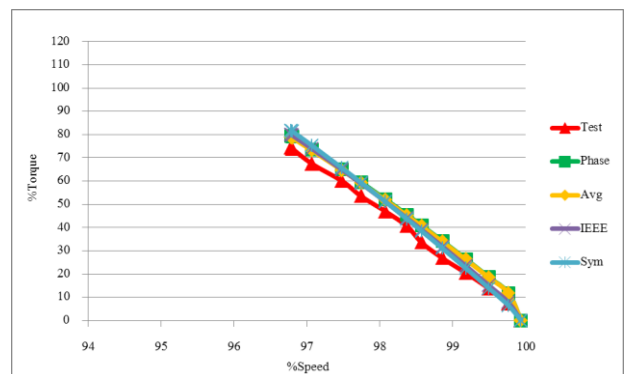


รูปที่ 7 ค่าความสูญเสีย ของมอเตอร์ขนาด 2 HP

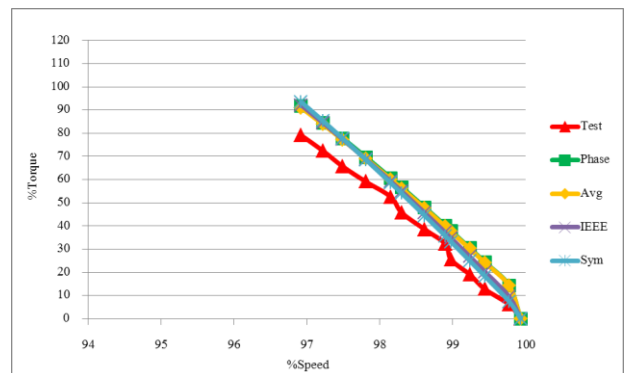
จากรูปที่ 6 จะเห็นว่ามอเตอร์ขนาด 2 HP มีค่า $P_{f\&w} = 4.4997$ W และจากรูปที่ 7 จะเห็นว่ามอเตอร์ขนาดพิกัด 5 HP มีค่า $P_{f\&w} = 9.3185$ W หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของแต่ละรูปแบบ สำหรับมอเตอร์พิกัด 2 HP ได้ค่าต่าง ๆ เป็นดังตารางที่ 4 และสำหรับมอเตอร์พิกัด 5 HP ได้ค่าต่าง ๆ เป็นดังตารางที่ 5 เมื่อนำค่าสลิป ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุล และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลไปแทนค่าในวงจรสมมูลทั้ง 4 รูปแบบ



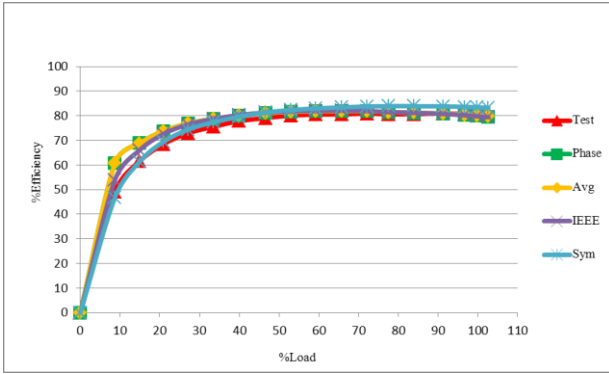
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของแรงบิดกับเปอร์เซ็นต์ความเร็วรอบในสภาวะ Under Voltage Balance 5%



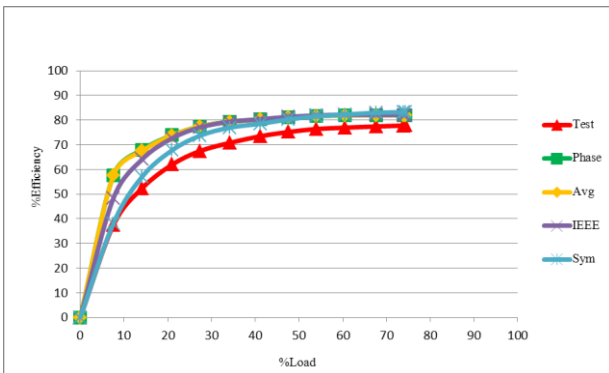
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของแรงบิดกับเปอร์เซ็นต์ความเร็วรอบในสภาวะ Under Voltage Unbalance 7% แบบหนึ่งเฟส



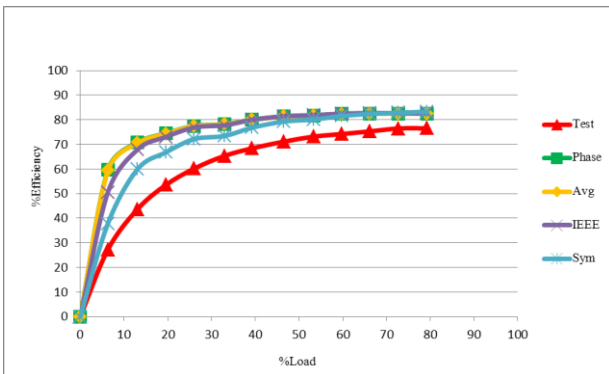
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของแรงบิดกับเปอร์เซ็นต์ความเร็วรอบในสภาวะ Over Voltage Unbalance 5% แบบ 2(A=B)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับเปอร์เซ็นต์โหลดใน
สภาวะ Under Voltage Balance 5%



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับเปอร์เซ็นต์โหลดใน
สภาวะ Under Voltage Unbalance 7% แบบหนึ่งเฟส



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับเปอร์เซ็นต์โหลดใน
สภาวะ Over Voltage Unbalance 5% แบบ 2(A=B)

สำหรับมอเตอร์ขนาด 5 HP แสดงตัวอย่าง
ความสัมพันธ์ของแรงบิดกับเปอร์เซ็นต์ความเร็วรอบ
เป็นดังรูปที่ 8-10 และความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพ
กับเปอร์เซ็นต์โหลดเป็นดังรูปที่ 11-13 เมื่อนำข้อมูล

ทั้งหมดมาทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความ
ผิดพลาดของแรงบิด และประสิทธิภาพที่คำนวณได้
ด้วยสมการที่ 34 ดังนี้คือ

$$\%Error = \frac{Actual\ data - Calculated\ data}{Actual\ data} \times 100 \quad (34)$$

ได้ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง
ตลอดย่านการรับโหลด โดยพิจารณาเป็นค่าเฉลี่ย
ความผิดพลาด (%Average Error) ของแรงบิด และ
ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (%Average Error) ของ
ประสิทธิภาพที่คำนวณจากวงจรสมมูลทั้ง 4 รูปแบบ
เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงเป็นดัง
แสดงในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 ตามลำดับ จาก
ตารางทั้งสอง ขณะทำการทดสอบมอเตอร์ 5 HP ใน
สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 9% แบบ
2(A≠B), 3(A=B) และ 3(A≠B) มอเตอร์มีค่า
กระแสไฟฟ้าเกินพิกัดตั้งแต่การทดสอบแบบไม่มีภาระ
โหลด ดังนั้นจึงไม่ได้ทำการทดสอบในสภาวะรับโหลด
เพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์ได้รับความเสียหาย จาก
ตารางทั้งสองจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าข้อมูล
ของทั้งแรงบิด และประสิทธิภาพมีความสอดคล้องกัน
และจากข้อมูลจะเห็นว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล
และแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ การเลือกใช้วงจรสมมูล
แบบแยกเฟส มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดค่อนข้างต่ำ
เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรสมมูลแบบอื่น แต่ในสภาวะ
แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ วงจรสมมูลแบบ
องค์ประกอบสมมาตรเหมาะสมที่สุด ซึ่งน่าจะมาจาก
ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ นอกจากผลของ
ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิด

องค์ประกอบลำดับลบ และองค์ประกอบลำดับศูนย์ของกระแสไฟฟ้าแล้ว ยังเป็นผลทำให้แกนเหล็กอิ่มตัวอีกด้วย ยิ่งแรงดันไฟฟ้าลำดับลบ และลำดับศูนย์มีค่ามาก จะทำให้กระแสไฟฟ้าลำดับลบ และลำดับศูนย์มีค่ามากตามไปด้วย ซึ่งวิธีการองค์ประกอบสมมาตรเป็นการนำคุณสมบัติทั้งหมดที่มีผลต่อการทำงานของมอเตอร์มาคำนวณร่วมด้วย แต่อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในวงจรสมมูลเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์โดยอ้างอิงค่าแรงดันไฟฟ้าพิกัด และค่ากระแสไฟฟ้าพิกัดจากแผ่นป้ายพิกัดมอเตอร์เป็นหลัก

6. สรุป

บทความนี้เป็นการเปรียบเทียบวงจรสมมูลเพื่อนำมาใช้ทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สามเฟสในสภาวะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุล และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล กรณีที่แรงดันไฟฟ้าสมดุลประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าสมดุลเท่ากับพิกัด ต่ำกว่าพิกัด และสูงกว่าพิกัด ส่วนกรณีที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบต่ำกว่าปกติ และสูงกว่า ซึ่งนำประเภทแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบหนึ่งเฟสแบบสองเฟสแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน และไม่เท่ากัน แบบสามเฟสแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน และไม่เท่ากันมาพิจารณาร่วมด้วย การคำนวณความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงตามวิธีการคำนวณอัตราส่วนความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส วงจรสมมูลที่นำมาใช้เพื่อทำนายสมรรถนะของมอเตอร์มีทั้งหมด 4 รูปแบบ

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลทั้ง 4 รูปแบบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2 HP 4 Pole

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจริงแบบแยกเฟส						
เฟส	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$R_c(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
a	6.0312	2.4799	4.8583	4.8583	895.8239	92.4589
b	6.2357	2.2733	4.8127	4.8127	592.3675	94.2574
c	5.9760	2.7029	4.8891	4.8891	901.7509	88.0989
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจริงแบบเฉลี่ย						
avg	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$R_c(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
	6.081	2.4853	4.8534	4.8534	766.6738	91.4987
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจริงตามมาตรฐาน IEEE 112-2017						
avg	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$R_c(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
	6.0810	2.2787	5.5958	5.5958	1632.6786	93.8284
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจริงตามองค์ประกอบสมมาตร						
Positive Sequence	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$R_c(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
	6.0810	2.2787	5.5958	5.5958	1632.6786	93.8284
Negative Sequence	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$R_c(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
	6.0810	2.2787	5.5958	5.5958	1632.6786	93.8284
Zero Sequence	$R_0(\Omega)$			$X_0(\Omega)$		
	0.0001V ₀ ³ + 0.0044V ₀ ² - 0.0806V ₀ + 7.4407			0.0156V ₀ ³ - 0.3171V ₀ ² + 1.2225V ₀ + 16.817		

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลทั้ง 4 รูปแบบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 5 HP 4 Pole

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจริงแบบแยกเฟส						
เฟส	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$R_c(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
a	1.9326	1.3761	2.1822	2.1822	486.5836	60.8648
b	1.9697	1.3111	2.1656	2.1656	495.4243	64.1125
c	1.9551	1.4616	2.1251	2.1251	860.918	60.5967
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจริงแบบเฉลี่ย						
avg	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$R_c(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
	1.9525	1.3829	2.1576	2.1576	573.0934	61.7961
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจริงตามมาตรฐาน IEEE 112-2017						
avg	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$R_c(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
	1.9525	1.1741	2.5244	2.5244	771.0021	62.0785
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจริงตามองค์ประกอบสมมาตร						
Positive Sequence	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$R_c(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
	1.9525	1.1741	2.5244	2.5244	771.0021	62.0785
Negative Sequence	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$R_c(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
	1.9525	1.1741	2.5244	2.5244	771.0021	62.0785
Zero Sequence	$R_0(\Omega)$			$X_0(\Omega)$		
	$-0.0005V_0^3 + 0.0147V_0^2 + 0.1383V_0 + 2.8486$			$0.0037V_0^3 + 0.0418V_0^2 + 0.4126V_0 + 9.3577$		

ตารางที่ 6 %Average Error ของแรงบิดที่คำนวณจากวงจรสมมูลเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง

Voltage Balance		2 HP 4 Pole				5 HP 4Pole				
Type	Phase	Avg	IEEE	Sym	Phase	Avg	IEEE	Sym		
Rated Voltage Balance	3.8990	3.6283	2.9624	9.3854	10.8195	11.2139	0.4464	2.4506		
5% Under Voltage Balance	3.1151	2.8698	5.0510	9.8323	5.2333	5.6045	5.4932	9.7981		
7% Under Voltage Balance	3.3195	3.0843	5.2814	10.5927	4.5087	4.8727	6.2192	10.8754		
9% Under Voltage Balance	5.7311	5.5032	7.7381	13.6900	4.1641	4.5137	6.4558	11.5951		
5% Over Voltage Balance	5.4751	5.1775	6.9962	9.5556	1.5360	1.9630	9.8552	11.7460		
7% Over Voltage Balance	12.0736	11.7527	13.5931	15.9932	4.4529	2.8417	2.8417	18.7014		
9% Over Voltage Balance	13.6510	13.3164	14.9763	16.8839	1.4505	2.7251	2.7251	11.6237		
Under Voltage Unbalance		2 HP 4 Pole				5 HP 4Pole				
Type	เฟส	Phase	Avg	IEEE	Sym	Phase	Avg	IEEE	Sym	
5% Under Voltage Unbalance	1	10.9622	10.4428	12.2864	14.8193	3.0011	3.5448	8.4011	10.8153	
	2 (A=B)	15.5207	15.5155	16.4988	18.4418	6.8777	7.2349	4.4847	5.1226	
	2 (A≠B)	13.5909	13.3090	14.5488	16.7882	5.6419	5.6825	5.7482	6.9055	
	3 (A=B)	14.5074	14.5001	15.5807	17.7006	3.0769	3.4190	8.7544	10.1239	
7% Under Voltage Unbalance	1	6.9903	6.3144	7.7600	10.1943	3.1399	3.8259	8.2130	10.0763	
	2 (A=B)	11.0017	11.0778	9.8114	10.1676	4.3953	4.8010	7.1791	6.8792	
	2 (A≠B)	18.3864	18.0537	17.6599	18.7057	4.6616	5.2250	6.6968	6.4096	
	3 (A=B)	11.7340	11.7912	12.2337	14.2997	7.9242	8.2705	3.3658	3.9602	
9% Under Voltage Unbalance	1	12.4949	11.5328	12.4477	14.3813	0.1036	0.7457	11.7218	13.5204	
	2 (A=B)	19.7204	19.9438	16.2048	15.7788	3.8066	3.2546	15.8882	14.1180	
	2 (A≠B)	22.1492	22.5679	18.4919	18.0114	1.2924	1.5959	13.1870	11.5531	
	3 (A=B)	13.1877	13.2916	12.2168	13.5744	1.1663	0.6899	13.3201	12.9396	
Over Voltage Unbalance	1	7.9046	7.6968	6.4482	7.6488	4.1270	4.7206	7.1683	6.5715	
	Over Voltage Unbalance		2 HP 4 Pole				5 HP 4Pole			
	Type	เฟส	Phase	Avg	IEEE	Sym	Phase	Avg	IEEE	Sym
	5% Over Voltage Unbalance	1	24.3885	23.9373	20.9463	19.1271	7.0655	8.1260	2.9883	0.3237
2 (A=B)		16.8040	15.7886	16.7332	17.8323	2.5954	3.6434	8.4503	8.9578	
2 (A≠B)		24.3652	23.0633	21.0760	19.6152	6.1219	7.2819	4.3263	3.6445	
3 (A=B)		265.8150	266.9930	161.0345	110.1139	4.4996	5.1487	5.9379	1.7935	
7% Over Voltage Unbalance	1	226.2532	228.7531	193.2570	92.4891	1.3093	1.8790	9.9639	6.8726	
	2 (A=B)	223.2349	223.3314	138.0231	101.1796	3.1539	1.3354	12.2163	5.8766	
	2 (A≠B)	35.3195	33.5950	29.4085	16.1969	1.2427	0.2626	12.1858	2.2056	
	3 (A=B)	323.9284	321.6773	212.9961	155.1356	19.1491	17.8840	25.6936	9.2535	
9% Over Voltage Unbalance	1	392.5005	385.3395	275.4518	192.6103	5.5977	3.9398	16.7828	2.1924	
	2 (A=B)	284.8911	285.8530	180.7798	96.0835	18.3744	17.3314	29.5664	1.8182	
	2 (A≠B)	301.5099	301.5003	198.3808	153.8303	461.1956	430.7409	419.6577	278.5782	
	3 (A=B)	381.5308	372.4037	260.7084	205.9297	2.8534	0.5344	12.2066	7.8484	
Over Voltage Unbalance	1	348.1411	344.6385	231.6368	179.2953	-	-	-	-	
	2 (A=B)	296.8913	298.8942	201.2997	155.2563	-	-	-	-	
	2 (A≠B)	280.0383	273.2218	182.0925	135.8529	-	-	-	-	
	3 (A=B)									

ตารางที่ 7 %Average Error ประสิทธิภาพที่คำนวณจากวงจรสมมูลเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง

Voltage Balance		2 HP 4 Pole				5 HP 4Pole				
Type	Phase	Avg	IEEE	Sym	Phase	Avg	IEEE	Sym		
Rated Voltage Balance	1.2233	1.3059	1.4750	4.6711	7.1395	7.1683	6.6407	9.7439		
5% Under Voltage Balance	0.7462	0.6528	0.9473	3.5611	6.8703	6.9042	6.1877	10.5209		
7% Under Voltage Balance	1.7293	1.6310	1.9906	2.9538	7.1602	7.1951	6.4368	11.1025		
9% Under Voltage Balance	0.4709	0.5768	0.1423	5.6746	7.0336	7.0702	6.2431	11.3719		
5% Over Voltage Balance	3.7085	3.7791	3.7594	6.2414	7.5947	7.6254	7.0429	10.0065		
7% Over Voltage Balance	5.4214	5.4902	5.4986	7.7277	7.4823	6.3035	6.3035	8.8086		
9% Over Voltage Balance	6.6269	6.6903	6.7536	8.5248	7.6089	6.7376	6.7376	8.3899		
Under Voltage Unbalance		2 HP 4 Pole				5 HP 4Pole				
Type	เฟส	Phase	Avg	IEEE	Sym	Phase	Avg	IEEE	Sym	
5% Under Voltage Unbalance	1	4.1316	4.2074	4.2206	6.6520	8.1894	8.2087	7.8711	9.9104	
	2 (A=B)	5.4369	5.5095	5.7029	6.6805	8.2970	8.3110	8.3823	8.1113	
	2 (A≠B)	5.4576	5.5262	5.6835	7.1124	8.7476	8.7616	8.7214	9.2135	
	3 (A=B)	5.4400	5.5126	5.6942	6.8765	8.6292	8.6463	8.5836	9.1105	
7% Under Voltage Unbalance	1	5.2518	5.3162	5.4191	6.9427	9.2252	9.2363	9.0392	10.0496	
	2 (A=B)	8.4168	8.5125	8.7757	7.0840	11.2633	11.2734	11.6149	9.1292	
	2 (A≠B)	9.0931	9.1615	9.4391	8.7771	11.4012	11.4000	11.7503	9.6669	
	3 (A=B)	7.0858	7.1711	7.4165	7.7351	10.0111	10.0226	10.2667	8.9301	
9% Under Voltage Unbalance	1	7.1207	7.1652	7.3651	7.5043	11.5955	11.5987	11.4597	11.6132	
	2 (A=B)	9.5544	9.6953	9.7727	5.3120	17.2139	17.2175	17.9651	11.4923	
	2 (A≠B)	12.2896	12.4725	12.5208	6.8209	17.3381	17.3970	18.0919	10.4296	
	3 (A=B)	6.5478	6.6602	6.9182	4.9489	15.3977	15.4052	15.9786	11.4947	
Over Voltage Unbalance	1	16.4316	5.9269	0.5811	4.4213	14.9301	14.9235	15.5628	11.3031	
	Type	เฟส	Phase	Avg	IEEE	Sym	Phase	Avg	IEEE	Sym
	5% Over Voltage Unbalance	1	15.9410	15.9248	16.1348	13.6431	11.1126	11.0662	11.6555	8.0811
		2 (A=B)	7.9609	7.9699	8.1649	8.3964	9.2791	9.2779	9.2109	8.8380
2 (A≠B)		17.4417	17.3528	17.6334	14.8878	9.6952	9.6708	9.8359	7.9343	
3 (A=B)		253.5588	254.3546	214.6250	144.5547	14.1566	14.1406	14.8607	8.7875	
7% Over Voltage Unbalance	1	213.6222	214.7710	217.9917	119.0237	13.6824	13.6843	14.2177	9.1399	
	2 (A=B)	189.4519	189.5213	161.4904	112.2170	22.4487	22.2864	23.4348	14.1090	
	2 (A≠B)	27.9462	27.7684	27.9289	25.8110	13.7121	13.6756	13.8734	12.7356	
	3 (A=B)	292.3221	291.5727	255.7106	190.9137	40.6636	40.4895	41.8351	23.6001	
9% Over Voltage Unbalance	1	349.8344	347.6267	316.0724	252.3754	16.6967	16.6437	16.9671	16.4421	
	2 (A=B)	263.1640	264.0933	227.1472	153.1358	29.6663	29.6114	30.8614	13.7573	
	2 (A≠B)	274.1596	274.3011	240.0164	169.4851	520.8582	511.8068	509.7011	298.4143	
	3 (A=B)	367.3455	364.3839	328.8742	229.7621	23.5021	23.3382	24.1241	13.6613	
Over Voltage Unbalance	1	357.1780	356.0273	315.7576	223.6784	-	-	-	-	
	2 (A=B)	298.7561	300.3297	267.4191	181.6859	-	-	-	-	
	2 (A≠B)	293.0832	291.7472	258.0583	171.3996	-	-	-	-	
	3 (A=B)	-	-	-	-	-	-	-	-	

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าวงจรสมมูลแบบแยกเฟสมีวิธีการคำนวณที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน และให้ค่าสมรรถนะของมอเตอร์ใกล้เคียงผลการทดสอบจริงในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล และในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ ในขณะที่วงจรสมมูลแบบองค์ประกอบสมมาตรให้ค่าสมรรถนะของมอเตอร์ใกล้เคียงผลการทดสอบจริงในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่

สมดุลสูงกว่าปกติ แต่อย่างไรก็ตามถ้าตัดข้อมูลในขณะมอเตอร์รับโหลดหนักออก ผู้วิจัยพบว่าวงจรสมมูลแบบองค์ประกอบสมมาตรเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำนายสมรรถนะของมอเตอร์มากที่สุดในทุกสภาวะแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่มอเตอร์มีภาระโหลดน้อยถึงภาระโหลดปานกลาง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณกรวรรณ เหลืองงาม คุณเขมิ
กา ตี๊กคล้าย คุณอภิวิญช์ แพงโคตร และคุณวชิพร
ศรียามัย ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการทดสอบ การ
ดำเนินการวิจัย และการคำนวณเพื่อการวิเคราะห์
ข้อมูลเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Motors and Generators, NEMA Standards Publication no. MG 1-1993.
- [2] Pragasen Pillay, Peter Hofmann, and Marubini Manyage, "Derating of Induction Motors Operating With a Combination of Unbalanced Voltages and Over or Undervoltages", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 17, NO. 4, DECEMBER 2002, pp. 485-491.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] IEEE 1459-2010: IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2010.
- [6] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112, 2017.
- [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.