

การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ในรูปแบบของคาร์ปาซิเตอร์ต่อร่วมถาวรแบบขนาน

Performance Prediction of Three-phase
Induction Motor Operated by Single-phase Supply System
under Parallel Permanent Connected Capacitor Condition

อาจารย์กุลสมทรัพย์ เย็นจำชลิต

สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสในสภาวะต่อคาปาซิเตอร์ถาวรแบบขนานค่าต่าง ๆ โดยพิจารณาในแง่ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ และประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการพิจารณาวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสองขดลวดที่ไม่สมมาตรของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส หลังจากนั้นนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง จากผลที่ได้จะเห็นว่าเทคนิคการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ที่นำเสนอนี้สามารถทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ดัดแปลงมาใช้กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้จริง ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการเลือกใช้ขนาดคาร์ปาซิเตอร์ให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของโหลด

คำสืบค้น

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์ มอเตอร์คาปาซิเตอร์ต่อร่วมถาวรแบบขนาน วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสองขดลวดที่ไม่สมมาตร

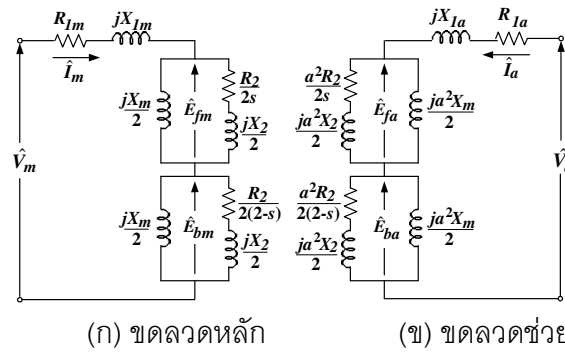
บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นมอเตอร์ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมมักนิยมใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมากกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีราคาถูกกว่าประสิทธิภาพสูงกว่า มีพิกัดใช้งานหลากหลายมากกว่า โดยมีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมีเฉพาะขนาดเล็ก และที่พิกัดกำลังเท่ากันมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีขนาดเล็กกว่าจึงใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยกว่า อย่างไรก็ตามถ้าผู้ใช้มีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแต่ไม่มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส และ/หรือต้องการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ขนาดพิกัดสูง ๆ การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีอยู่มาต่อใช้งานกับแหล่งจ่ายไฟแบบหนึ่งเฟสจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น และคุ้มค่า จากบทความวิจัย [1] แสดงให้เห็นว่าเมื่อต่อคาปาซิเตอร์แบบขนานเข้ากับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ มอเตอร์ที่ถูกดัดแปลงสามารถรับโหลดได้มากกว่าการต่อคาปาซิเตอร์ในลักษณะอนุกรม โดยสมรรถนะของมอเตอร์ที่ดัดแปลงจะขึ้นอยู่กับขนาดคาปาซิเตอร์ที่นำมาต่อขนาน ดังนั้นการคำนวณสมรรถนะของมอเตอร์เพื่อให้ทราบถึงผลของคาร์ปาซิเตอร์ที่มีต่อคุณลักษณะ และความสามารถรับโหลดของมอเตอร์ก่อนจะนำมอเตอร์ไปใช้งานจริงจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

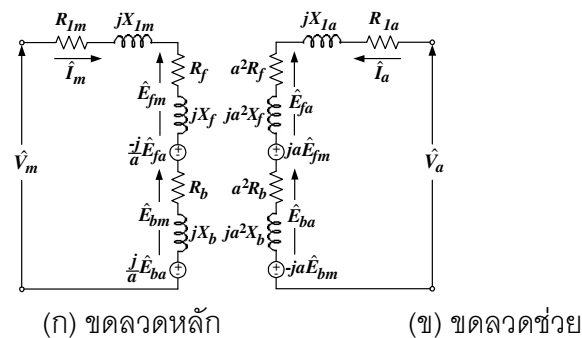
บทความนี้นำเสนอเทคนิคการคำนวณสมรรถนะของมอเตอร์ในแง่ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็วรอบ และประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ได้จากการดัดแปลงนำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาใช้กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยนำวิธีการคำนวณวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสองขดลวดที่ไม่สมมาตรของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้เห็นถึงความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอจึงนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าข้อมูลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้ขนาดคาร์ปาซิเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะโหลด ซึ่งเป็นผลให้มอเตอร์ทำงานในช่วงที่มีประสิทธิภาพสูง

2. วงจร และวิธีการคำนวณที่นำเสนอ

มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสประกอบด้วยขดลวดหลัก และขดลวดช่วย เมื่อพิจารณาเป็นวงจรสมมูลแยกแต่ละขดลวดเป็นดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากนั้นเมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดมาพิจารณาร่วมด้วยสามารถเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์ได้ใหม่เป็นดังรูปที่ 2 [2] สำหรับการดัดแปลงนำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาต่อใช้งานกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟสโดยต่อคาปาซิเตอร์ขนานเข้ากับขดลวดสเตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3 สามารถพิจารณาโดยนำหลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสองขดลวดที่ไม่สมมาตรมาใช้ ทำให้ได้วงจรสมมูลของมอเตอร์คาร์ปาซิเตอร์แบบขนานเป็นดังรูปที่ 4 [3]



รูปที่ 1 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟส

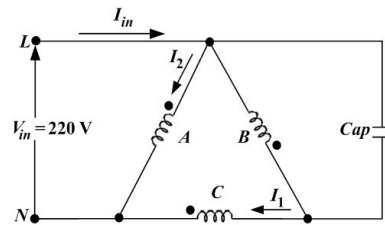


รูปที่ 2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสองขดลวดที่ไม่สมมาตร

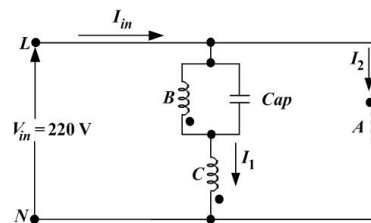
กำหนดให้

- V_m คือ แรงดันไฟฟ้าของขดลวดหลัก
- V_a คือ แรงดันไฟฟ้าของขดลวดช่วย
- I_m คือ กระแสไฟฟ้าของขดลวดหลัก
- I_a คือ กระแสไฟฟ้าของขดลวดช่วย
- E_{fm} คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในส่วน Forward field ของขดลวดหลัก
- E_{bm} คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในส่วน Backward field ของขดลวดหลัก
- E_{fa} คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในส่วน Forward field ของขดลวดช่วย
- E_{ba} คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในส่วน Backward field ของขดลวดช่วย
- a, a_1 คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก
- R_{1m}, X_{1m}, Z_{1m} คือ ความต้านทาน รีแอกแตนซ์ และอิมพีแดนซ์ขดลวดหลัก
- R_{1a}, X_{1a}, Z_{1a} คือ ความต้านทาน รีแอกแตนซ์ และอิมพีแดนซ์ขดลวดช่วย
- $R_{cap}, X_{cap}, Z_{cap}$ คือ ความต้านทาน รีแอกแตนซ์ และอิมพีแดนซ์ของ คาปาซิเตอร์
- R_r, X_r คือ ความต้านทาน และรีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์
- R_2, X_2 คือ ความต้านทาน และรีแอกแตนซ์ของโรเตอร์
- X_m คือ แมกนีไทซ์ซิงรีแอกแตนซ์
- Z_{fm} คือ อิมพีแดนซ์ในส่วน Forward field ของขดลวดหลัก

- Z_{bm} คือ อิมพีแดนซ์ในส่วน Backward field ของขดลวดหลัก
- Z_{fa} คือ อิมพีแดนซ์ในส่วน Forward field ของขดลวดช่วย
- Z_{ba} คือ อิมพีแดนซ์ในส่วน Backward field ของขดลวดช่วย

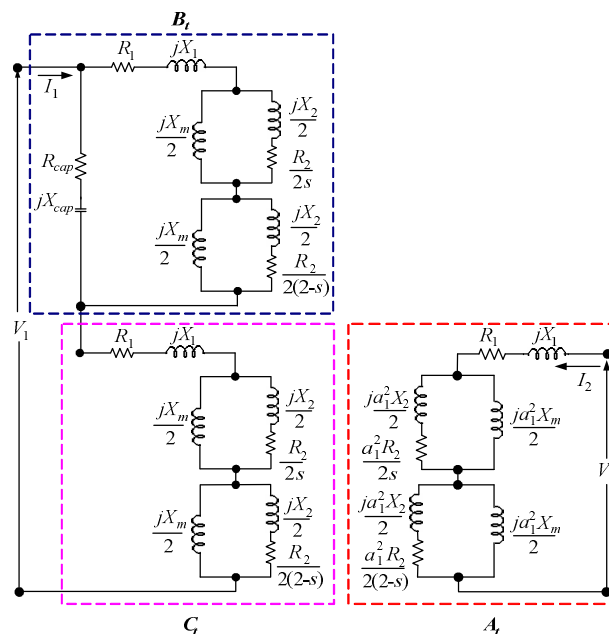


(ก) วงจรการต่อใช้งาน



(ข) วงจรอย่างง่ายสำหรับพิจารณาวงจรสมมูล

รูปที่ 3 การต่อใช้งานมอเตอร์คาปาซิเตอร์ถาวรแบบขนาน



รูปที่ 4 วงจรสมมูลที่นำเสนอ

เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ตามมาตรฐาน IEEE Std. 112-2004 จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่อเฟสของมอเตอร์ หลังจากนั้นคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของขดลวดแต่ละเฟส ได้ค่าอิมพีแดนซ์เป็นดังสมการที่ (1) – (5)

$$Z_{1A} = Z_{1B} = Z_{1C} = R_1 + jX_1 \quad (1)$$

$$Z_{Af} = \frac{\left(\left(\frac{a_1^2 R_2}{2s} + j \frac{a_1^2 X_2}{2} \right) \times \left(\frac{ja_1^2 X_m}{2} \right) \right)}{\left(\frac{a_1^2 R_2}{2s} + ja_1^2 \left(\frac{X_2 + X_m}{2} \right) \right)} \quad (2)$$

$$Z_{Ab} = \frac{\left(\left(\frac{a_1^2 R_2}{2(2-s)} + j \frac{a_1^2 X_2}{2} \right) \times \left(\frac{ja_1^2 X_m}{2} \right) \right)}{\left(\left(\frac{a_1^2 R_2}{2(2-s)} + ja_1^2 \left(\frac{X_2 + X_m}{2} \right) \right) \right)} \quad (3)$$

$$Z_{Bf} = Z_{Cf} = \frac{\left(\left(\frac{R_2}{2s} + j \frac{X_2}{2} \right) \times \left(\frac{jX_m}{2} \right) \right)}{\left(\frac{R_2}{2s} + j \left(\frac{X_2 + X_m}{2} \right) \right)} \quad (4)$$

$$Z_{Bb} = Z_{Cb} = \frac{\left(\left(\frac{R_2}{2(2-s)} + j \frac{X_2}{2} \right) \times \left(\frac{jX_m}{2} \right) \right)}{\left(\left(\frac{R_2}{2(2-s)} + j \left(\frac{X_2 + X_m}{2} \right) \right) \right)} \quad (5)$$

ถ้ากำหนดให้อิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ $Z_{cap} = R_{cap} - jX_{cap}$ ดังนั้นอิมพีแดนซ์รวมของขดลวดเฟส A, B และ C เป็นดังสมการที่ (6) - (8)

$$Z_{At} = Z_{1A} + Z_{Af} + Z_{Ab} \quad (6)$$

$$Z_{Bt} = \frac{\left((Z_{1B} + Z_{Bf} + Z_{Bb}) \times Z_{cap} \right)}{(Z_{1B} + Z_{Bf} + Z_{Bb} + Z_{cap})} \quad (7)$$

$$Z_{Ct} = Z_{1C} + Z_{Cf} + Z_{Cb} \quad (8)$$

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดหลัก B-C (I_1) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดช่วย A (I_2) คำนวณได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{\begin{bmatrix} V_1 & -\frac{j}{a_1}(Z_{Af} - Z_{Ab}) \\ V_2 & Z_{At} \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} (Z_{Bt} + Z_{Ct}) & -\frac{j}{a_1}(Z_{Af} - Z_{Ab}) \\ -ja_1((Z_{Bb} + Z_{Cb}) - (Z_{Bf} + Z_{Cf})) & Z_{At} \end{bmatrix}} \quad (9)$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} (Z_{Bt} + Z_{Ct}) & V_1 \\ -ja_1((Z_{Bb} + Z_{Cb}) - (Z_{Bf} + Z_{Cf})) & V_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} (Z_{Bt} + Z_{Ct}) & -\frac{j}{a_1}(Z_{Af} - Z_{Ab}) \\ -ja_1((Z_{Bb} + Z_{Cb}) - (Z_{Bf} + Z_{Cf})) & Z_{At} \end{bmatrix}$$

จากรูปที่ 3 (ข) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อทราบค่ากระแสไฟฟ้า I_1 และ I_2 จะสามารถคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าอินพุต (I_{in}) ได้ดังสมการที่(11)

$$I_{in} = I_1 + I_2 \quad (11)$$

และสามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต (P_{in}) ได้ดังสมการที่ (12)

$$P_{in} = V_{in} I_{in} \cos \theta_{in} \quad (12)$$

กำหนดให้ความสูญเสียเนื่องจากการหมุน ($P_{rotational}$) เป็นผลรวมของความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก (core loss) และความสูญเสียเนื่องจากความฝืด และแรงลมต้าน (friction and windage losses) ซึ่งในที่นี้พิจารณาเป็นค่าคงที่ ดังนั้นกำลังเอาต์พุตของมอเตอร์ (P_{out}) มีค่าเท่ากับ

$$P_{out} = (1-s) \left(P_{in} - \left[(I_1^2 R_1) + (I_2^2 R_1) + \left(I_{in}^2 \frac{R_1 \times Z_{cap}}{R_1 + Z_{cap}} \right) \right] \right) - P_{rotational} \quad (13)$$

ดังนั้นแรงบิดเอาต์พุต (T_{out}) และประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (14) สมการที่ (15) ตามลำดับ

$$T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad (14)$$

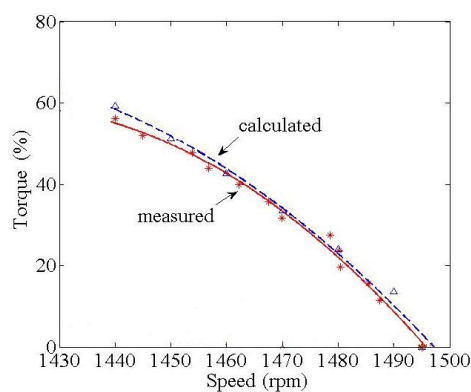
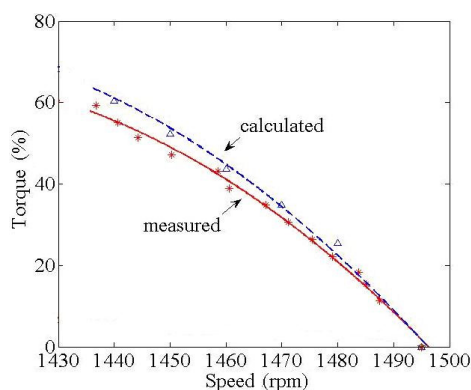
$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (15)$$

เมื่อ ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์มีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi N_r}{60}$ และ N_r คือค่าความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์

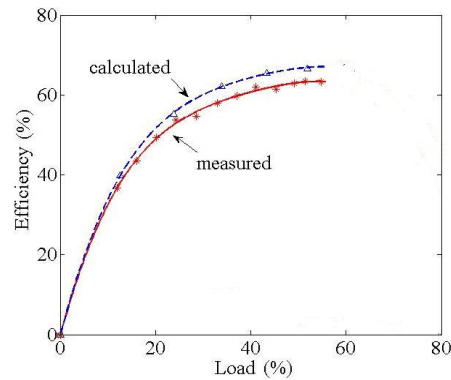
3. ผลที่ได้ และการวิเคราะห์ผล

มอเตอร์สามเฟสที่ใช้ทดสอบมีขนาดพิกัด 0.75 kW, 4 Pole, 50 Hz, 220/380 V, 3.5/2.0 A, 1400 rpm, 0.8 p.f. อัตราส่วนจำนวนรอบ (a_1) ทดสอบโดยใช้วิธีการของ Veinott [4] ค่าพารามิเตอร์ต่อเฟสของมอเตอร์ดังแสดงในภาคผนวกถูกนำมาแทนค่าลงในวงจรสมมูลดังที่นำเสนอในหัวข้อที่ 2 เพื่อใช้คำนวณหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์ โดยนำค่าสลิป และค่าคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์จริงขนาด 30 และ 36 μF แทนค่าในวงจรสมมูลในการทดสอบมอเตอร์เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณนั้นทำการทดสอบมอเตอร์ตั้งแต่ไม่มีโหลด

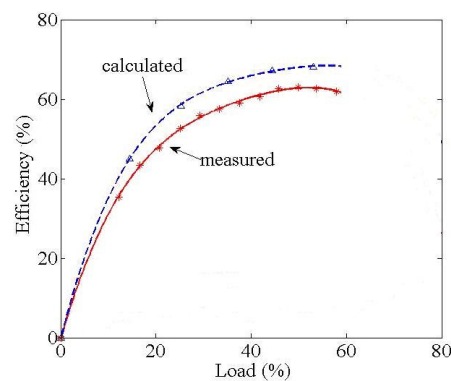
จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าถึงพิกัดกระแสไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์แรงบิดกับความเร็วยกสำหรับการต่อใช้งานเป็นมอเตอร์คาปาซิเตอร์ต่อรวมถาวรแบบขนานเป็นดังรูปที่ 5 และความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเปอร์เซ็นต์โหลดเป็นดังรูปที่ 6 จากรูปที่ 5 และ 6 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธีการประมาณค่าโดยใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบสองขดลวดที่ไม่สมมาตรมาใช้นำยสมรรถนะของมอเตอร์ให้ผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทดสอบจริง ซึ่งน่าจะมาจากการพิจารณาค่าความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กเป็นค่าคงที่ ดังนั้นถ้านำความต้านทานความสูญเสียของแกนเหล็ก (Core loss resistance) มาพิจารณาร่วมในวงจรสมมูลแบบเดียวกับวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส น่าจะทำให้ผลการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น

(ก) คาปาซิเตอร์ขนาด 30 μF (ข) คาปาซิเตอร์ขนาด 36 μF

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์แรงบิดกับความเร็วยก



(ก) คาปาซิเตอร์ขนาด 30 μF



(ข) คาปาซิเตอร์ขนาด 36 μF

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเปอร์เซ็นต์โหลด

4. สรุปผล

จากวิธีการนำวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบสองขดลวดที่ไม่สมมาตรมาประยุกต์ใช้ทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ดัดแปลงมาต่อใช้งานกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสในลักษณะของมอเตอร์คาปาซิเตอร์ต่อรวมถาวรแบบขนาน สามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์แรงบิดกับความเร็วรอบ และประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบจริง

ในงานวิจัยต่อไปจะนำค่าพารามิเตอร์ในส่วนของความต้านทานความสูญเสียแกนเหล็ก มาพิจารณาร่วมในวงจรสมมูล โดยจะวิเคราะห์ถึงตำแหน่งการวางที่เหมาะสม เพื่อทำนายสมรรถนะโดยรวมของมอเตอร์ที่ดัดแปลงให้แม่นยำ และสอดคล้องกับการใช้งานมอเตอร์จริง

ภาคผนวก

ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เป็นดังนี้ $R_1 = 12.158 \, \Omega$, $R_2 = 10.141 \, \Omega$, $X_1 = X_2 = 7.395 \, \Omega$, $X_m = 165.44 \, \Omega$, Core loss = 31.8 W, Friction and windage losses = 2.7 W, Turns ratio $a_1 = 1.7$

บรรณานุกรม

- [1] สลิลทิพย์ สินธุสนธิชาติ และ ณพสิทธิ์ เม่งพัด “การเปรียบเทียบสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามขดลวดแบบสมมาตรเมื่อใช้กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟส” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 หน้า 1-4
- [2] W.J. Morrill. “The Revolving Theory of The Capacitor Motor.” Proc. AIEE Winter Convention, New York, 1929, pp. 614-632.
- [3] ณพสิทธิ์ เม่งพัด “การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามขดลวดแบบสมมาตรเมื่อนำมาใช้กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟส” ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2550
- [4] Cyril G. Veinott and Joseph E. Martin., Fractional and Subfractional Horsepower Electric Motors. Fourth Edition, Mc-Graw-Hill Book International Company, 1987.