

การหาค่าพารามิเตอร์เพื่อจำลองการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

กฤษ เฉยไสย ประยงค์ เสาร์แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

E-mail: krit@elec.kku.ac.th , prayong_s@thaimail.com

บทคัดย่อ

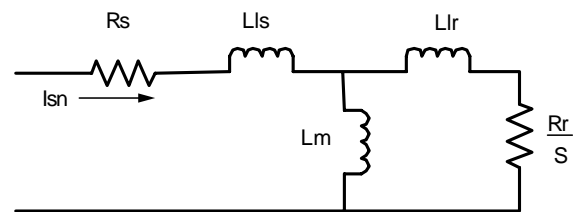
ปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องมือเครื่องใช้ ระบบ HVAC ปั๊มน้ำ พัดลม ฯ ในการศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการจำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์หรือ ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้น จำเป็นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ภายในของมอเตอร์เหนี่ยวนำ บทความนี้ได้นำเสนอ การหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ประกอบด้วยค่า ความต้านทานสเตเตอร์ (R_s) ความต้านทานโรเตอร์ (R_r) ความเหนี่ยวนำรั่วสเตเตอร์ (L_{ls}) ความเหนี่ยวนำรั่วโรเตอร์ (L_{lr}) และ ความเหนี่ยวนำร่วม (L_m) โดยวิธีคำนวณจากค่ากระแส และแรงดันของมอเตอร์ที่ทำงานในสภาวะที่มอเตอร์ไม่มีโหลดและในสภาวะที่มอเตอร์ถูกล็อกไม่ให้หมุน จาก การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาดสองแรงม้า สีโพล ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ เมื่อนำไปจำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ จะได้ค่าผลลัพธ์แสดงการทำงานของมอเตอร์ที่ใกล้เคียงกับคุณสมบัติของมอเตอร์ที่ปรากฏบนเนมเพลทมาก ทั้งค่าความเร็วรอบ และค่ากระแสของมอเตอร์

คำสำคัญ Parameter , Induction motor , Simulation

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่มีราคาถูก แข็งแรง ทนทาน ต้องการการบำรุงรักษาเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องมือเครื่องใช้ ระบบ HVAC ปั๊มน้ำ พัดลม ฯ ในการศึกษาการทำงานของมอเตอร์หรือในงานควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้น จำเป็นอย่างมากที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรเสมือนของมอเตอร์

รูปที่ 1 แสดงวงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำใน 1 เฟส ซึ่งวงจรเสมือนนี้คำนวณมาจากโครงสร้างและการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [1] บทความนี้จะนำเสนอรูปที่ 1 เป็นวงจรพื้นฐานในการคำนวณและหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์ที่จะนำมาทดลอง



รูปที่ 1 วงจรเสมือนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โดยที่ V_{sn} คือ เฟสโวลเตจ
 R_s คือ ความต้านทานสเตเตอร์
 R_r คือ ความต้านทานโรเตอร์
 L_{ls} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วสเตเตอร์
 L_{lr} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วโรเตอร์
 L_m คือ ความเหนี่ยวนำร่วม
 S คือ สลิป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์อย่างง่าย และเขียนโปรแกรมจำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ทดสอบผลที่ได้กับค่าจริงที่ปรากฏบนเนมเพลทของมอเตอร์

2. หลักการหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ

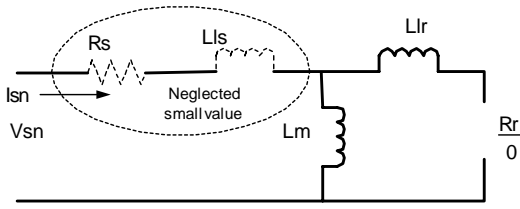
จากวงจรเสมือนของมอเตอร์ในรูปที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสามารถหาได้โดยพิจารณาแรงดันและกระแสเฟสของมอเตอร์ที่ทำงานในสภาวะต่างๆดังนี้

2.1 มอเตอร์อยู่หนึ่ง

ในสภาวะที่มอเตอร์ยังไม่ทำงาน จากโครงสร้างของมอเตอร์สามารถประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ ได้จากการวัดค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์โดยใช้โอห์มมิเตอร์

2.2 มอเตอร์ทำงานที่สภาวะไม่มีโหลด

เมื่อมอเตอร์ทำงานในสภาวะที่ไม่มีโหลด มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุด ประมาณว่าค่าสลิป S มีค่าเป็นศูนย์ จะได้วงจรเสมือนในรูปที่ 2 ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ขดลวดสเตเตอร์จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำร่วมจึงไม่นำมาพิจารณา รวมในวงจร



รูปที่ 2 วงจรเสมือนมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานในสภาวะไม่มีโหลด

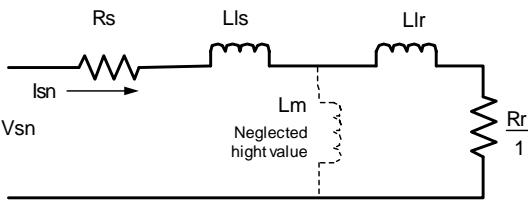
จากรูปที่ 2 ค่าความเหนี่ยวนำรวมคำนวณจากสมการ 1

$$L_m = \frac{V_{sn}}{I_{sn} 2\pi f} \quad (1)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์

2.3 มอเตอร์ทำงานที่สภาวะโรเตอร์ถูกล๊อคไม่ให้หมุน

เมื่อมอเตอร์ทำงานที่สภาวะโรเตอร์ถูกล๊อคไม่ให้หมุนค่าสลิปของมอเตอร์จะมีค่าเป็นหนึ่ง วงจรเสมือนของมอเตอร์จะได้ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำรวมจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์และสเตเตอร์ จึงไม่นำมาพิจารณาในวงจร



รูปที่ 3 วงจรเสมือนมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานในสภาวะโรเตอร์ถูกล๊อคไม่ให้หมุน

จากรูปที่ 3

$$R_{eq} = \frac{V_{sn}}{I_{sn}} \cos \theta \quad (2)$$

$$X_{eq} = \frac{V_{sn}}{I_{sn}} \sin \theta \quad (3)$$

โดยที่ θ คือมุมระหว่าง V และ I

$$R_{eq} = R_s + R_r \quad (4)$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานโรเตอร์คำนวณจากสมการ

$$R_r = R_{eq} - R_s \quad (5)$$

ค่าความเหนี่ยวนำในวงจร

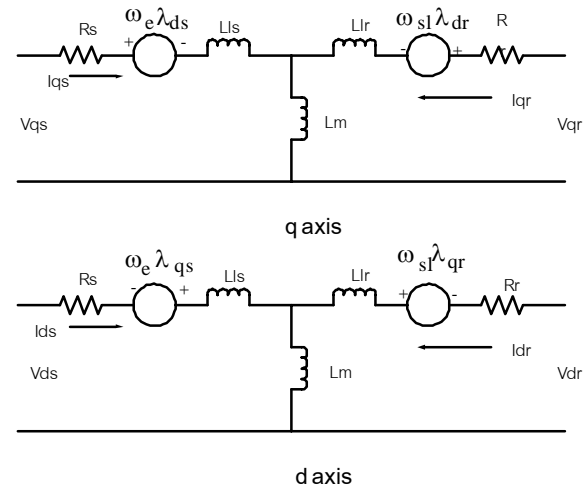
$$L_{eq} = \frac{X_{eq}}{2\pi f} \quad (6)$$

โดยทั่วไปจะประมาณค่าความเหนี่ยวนำโรเตอร์เท่ากับค่าความเหนี่ยวนำโรเตอร์

$$L_{ls} = L_{lr} = \frac{L_{eq}}{2} \quad (7)$$

3. การจำลองการทำงานมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การศึกษาการทำงานของมอเตอร์รวมถึงการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โมเดลที่เหมาะสมในการจำลองการทำงานคือแบบไดนามิกโมเดล (Dynamic Model) ที่มีแกนอ้างอิงบนแกนหมุนซิงโครนัส (Synchronously rotating references model) [2] ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรเสมือนของมอเตอร์

สมการที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_e \lambda_{ds} \quad (8)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_e \lambda_{qs} \quad (9)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + \omega_{sl} \lambda_{dr} \quad (10)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - \omega_{sl} \lambda_{qr} \quad (11)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_M i_{qr} \quad (12)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_M i_{dr} \quad (13)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_M i_{qs} \quad (14)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_M i_{ds} \quad (15)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (16)$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (17)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (18)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l \quad (19)$$

4. การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

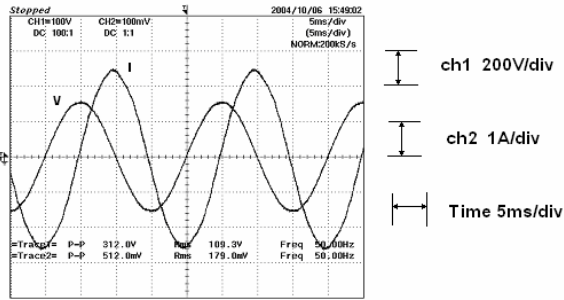
จากหลักการที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อนำไปทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น SF-JR ขนาด 3ϕ , 2 Hp, 4 pole, 380 V, 3.5 A, 50 Hz, 1450 rpm

4.1 มอเตอร์อยู่หนึ่ง

วัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์โดยใช้ดีจิจิตอล
โอห์มมิเตอร์ได้ $R_s = 3.2 \Omega$

4.2 มอเตอร์ทำงานที่สภาวะไม่มีโหลด

รูปที่ 5 แสดงผลการวัดค่าแรงดันและกระแสเฟสของมอเตอร์
เมื่อมอเตอร์ทำงานที่สภาวะไม่มีโหลด



รูปที่ 5 แรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่สภาวะไม่มีโหลด

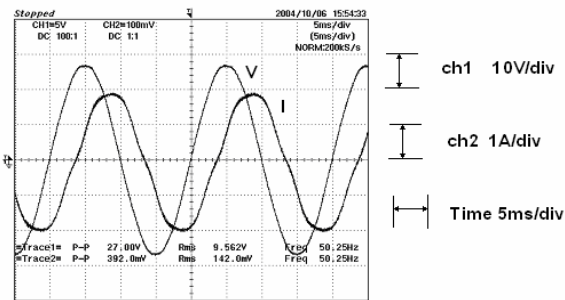
$V_{un} = 218.6 \text{ Vrms}$, $I_u = 1.79 \text{ A}$,
 $f = 50 \text{ Hz}$, $\text{p.f.} = 0.06$, $\theta = 86.4^\circ$

จากสมการที่ 1

จะได้
$$L_m = \frac{218.6}{(1.79)(2\pi)(50)} = 0.388 \text{ H}$$

4.3 มอเตอร์ทำงานที่สภาวะโรเตอร์ถูกล๊อคไม่ให้หมุน

รูปที่ 6 แสดงการวัดค่าแรงดันและกระแสเฟสเมื่อมอเตอร์
ทำงานที่สภาวะโรเตอร์ถูกล๊อคไม่ให้หมุน



รูปที่ 6 แรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่สภาวะโรเตอร์ถูกล๊อค

$V_{un} = 19.124 \text{ Vrms}$, $I_u = 1.42 \text{ A}$,
 $f = 50 \text{ Hz}$, $\text{p.f.} = 0.368$, $\theta = 68.4^\circ$,

จากสมการที่ 2

$$R_{eq} = \frac{19.124}{1.42} \cos(68.4^\circ) = 4.95 \Omega$$

จากสมการที่ 5

$$R_r = 4.95 - 3.2 = 1.75 \Omega$$

จากสมการที่ 3

$$X_{eq} = \frac{19.124}{1.42} \sin(68.4^\circ) = 12.52 \Omega$$

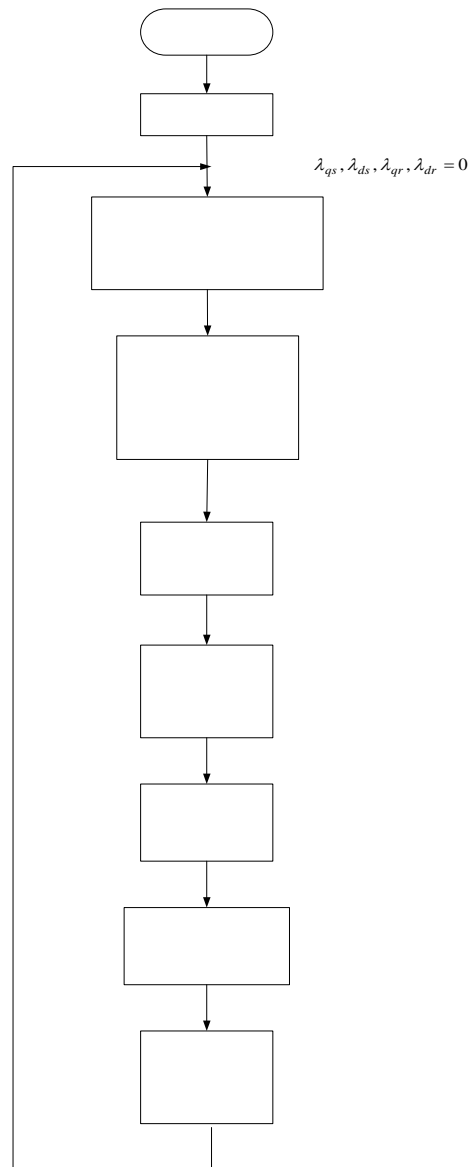
จากสมการที่ 6 และ 7

$$L_{eq} = \frac{12.52}{2\pi(50)} = 39.858 \text{ mH}$$

$$L_{ls} = L_{lr} = \frac{39.858}{2} = 19.929 \text{ mH}$$

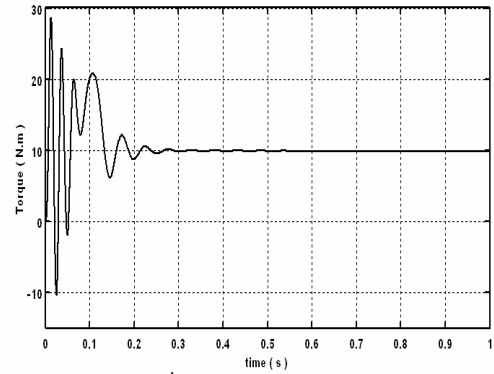
4.4 การจำลองการทำงาน

จากพารามิเตอร์ที่หาได้ในข้อ 4 นำไปเขียนโปรแกรม
จำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้สมการที่ 8 ถึง 19
ตาม Flowchart ในรูปที่ 7 เพื่อคำนวณหาค่า พลิ๊กซ์ กระแส
แรงบิด สลิป และคำนวณความเร็วรอบของมอเตอร์

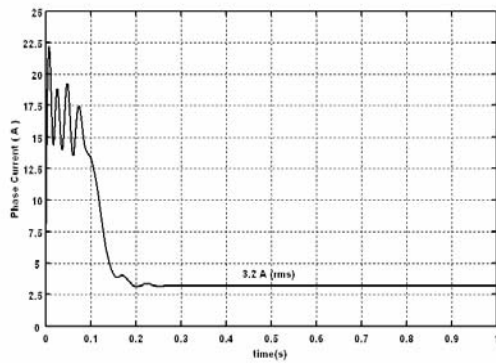


รูปที่ 7 Flow chart การจำลองการทำงานของมอเตอร์

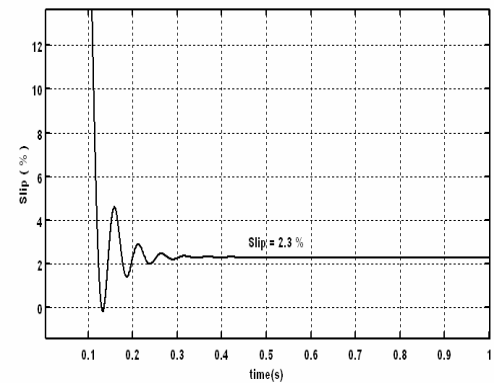
ผลการจำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์เมื่อป้อนแรงดัน เฟส 220 V 50 Hz ให้กับมอเตอร์ จากรูปที่ 8 จะเห็นว่าค่ากระแสเฟสที่ได้ 3.2 A จะมีค่าใกล้เคียงกับที่บอกไว้บนเนมเพลท 3.5 A คิดเป็นค่าผิดพลาดที่ 5.87 % รูปที่ 9 จะเห็นว่าเฟสของแรงดันจะนำหน้าเฟสของกระแส รูปที่ 10 ความเร็วรอบมอเตอร์ที่ได้ 1465 rpm จะมีค่าใกล้เคียงกับที่บอกไว้บนเนมเพลท 1450 rpm คิดเป็นค่าผิดพลาด 1.03 % และเข้าสู่ความเร็วสูงสุดที่เวลา 0.3 วินาที รูปที่ 11 แสดงค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่คำนวณได้ 10 N.m รูปที่ 12 แสดงค่าสลิปของมอเตอร์เมื่อทำงานจะมีค่า 2.3 % รูปที่ 13 แสดงทางเดินของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์มีลักษณะเป็นวงกลม รูปที่ 14 แสดงค่ากระแส dq ของสเตเตอร์และโรเตอร์



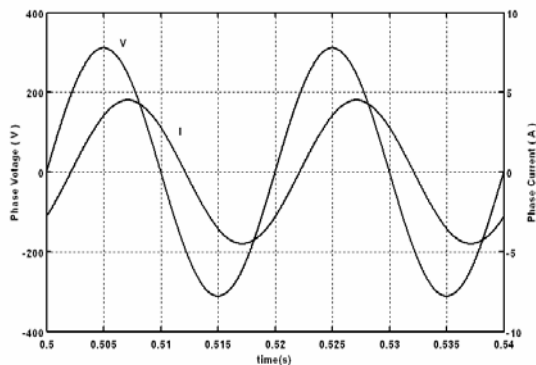
รูปที่ 11 แรงบิดของมอเตอร์



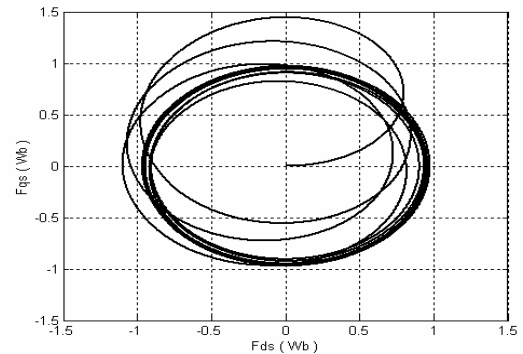
รูปที่ 8 กระแสเฟสของมอเตอร์



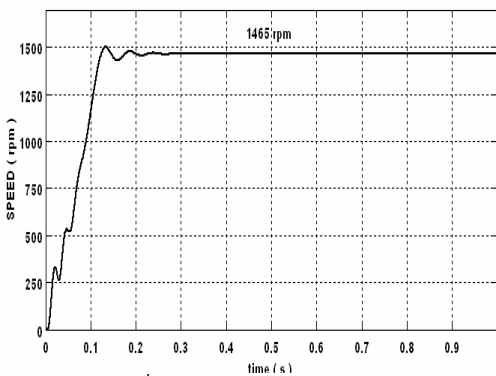
รูปที่ 12 สลิปของมอเตอร์



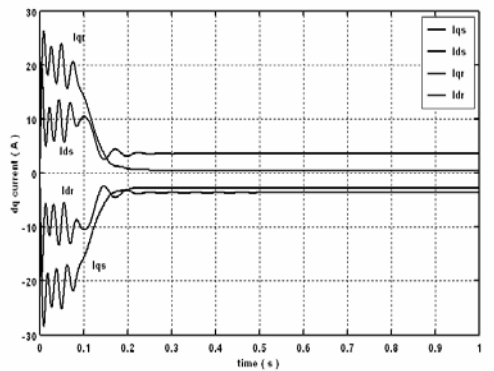
รูปที่ 9 เฟสของแรงดันและกระแสของมอเตอร์



รูปที่ 13 ทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์



รูปที่ 10 ความเร็วรอบของมอเตอร์



รูปที่ 14 กระแสที่สเตเตอร์และโรเตอร์

5. สรุป

การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำเสนอเป็นวิธีอย่างง่ายไม่ยุ่งยากและสามารถนำไปจำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ได้จริง สามารถศึกษาลักษณะของแรงดัน กระแส ความเร็วรอบ แรงบิด สลิป และเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ได้ และให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับคุณสมบัติของมอเตอร์ที่ปรากฏบนเนมเพลท โดยมีค่าความผิดพลาดของกระแสเฟสที่ 5.87% และค่าความผิดพลาดของความเร็วที่ 1.03% เท่านั้น ซึ่งถือว่ามีค่าความผิดพลาดน้อยมาก

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์จากห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ned Mohan, T.M.Undeland , W.P. Robbins. Power Electronics, John Wiley&Sons, Newyork, USA..
- [2] R.Krishman 2001. Electric Motor Drive, Prentice Hall, USA.



ผศ.ดร. กฤษ เฉยไสย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี โทและเอกในสาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลังจากมหาวิทยาลัย NAGAOKA ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2540 2542 และ 2545 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



ประยงค์ เสาร์แก้ว สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโททางด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น