

การศึกษาผลกระทบของรูปทรงโรเตอร์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อความถี่ธรรมชาติด้วยแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์

เกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์¹, สมพร เรืองสินชัชวานิช¹ และ สิทธิโชค ผูกพันธุ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000,

E-mail: kreangsuk_k@nu.in.th, sompomru@yahoo.co.uk

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000, E-mail: phukeypan@yahoo.com

บทคัดย่อ – บทความนี้นำเสนอผลกระทบต่อความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์รูปทรงต่าง ๆ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ชนิดกรงกระรอก โดยวิเคราะห์รูปร่างของโรเตอร์แบบต่างๆ มาตรฐานของสมาคมผู้ผลิตเครื่องไฟฟ้านานาชาติ (National Electrical Manufacturers Association; NEMA) ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้ทำให้สรุปได้ว่ารูปทรงของโรเตอร์ที่แตกต่างกันส่งผลโดยตรงต่อทั้งขนาดและความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของการสั่นสะเทือนทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

คำสำคัญ : มอเตอร์เหนี่ยวนำ, ความถี่ธรรมชาติ, แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, ร่องโรเตอร์

1. บทนำ

การสั่นสะเทือน คือ ปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุจากอิทธิพลของแรงที่มากระทำ ทั้งนี้แรงที่กระทำอาจมาจากโครงสร้างภายในหรือจากแรงจากภายนอกก็ได้ เมื่อวัตถุได้รับแรงกระทำจากภายในจะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration) ทำให้เกิดความถี่ (มักถูกเรียกว่าความถี่ธรรมชาติ) โดยอาจเกิดความถี่เพียงช่วงเดียวหรือเกิดหลายช่วงความถี่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของวัสดุของวัตถุนั้น ๆ สำหรับการสั่นสะเทือนที่มีผลมาจากแรงที่กระทำจากภายนอก จะเป็นการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Forced Vibration) และการสั่นสะเทือนแบบนี้หากบังเอิญไปตรงกับความถี่ธรรมชาติของวัตถุ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (Resonance) ซึ่งส่งผลทำให้ขนาดของการสั่นสะเทือนถูกขยายอย่างมาก และอาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่ระบบหรือวัตถุนั้น ๆ ได้ ผู้ออกแบบและนักวิจัยมักให้

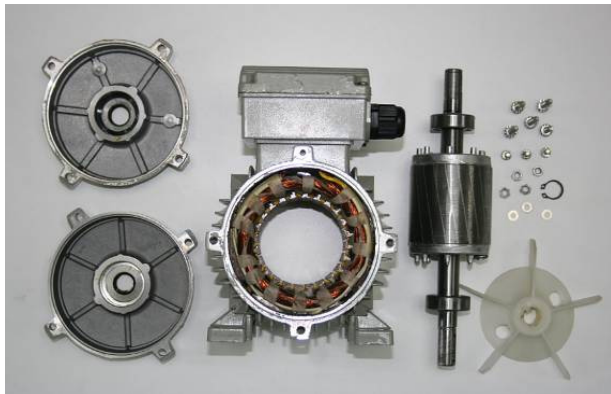
ความสำคัญต่อการศึกษาความถี่ธรรมชาติในวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่อาจก่อให้เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ มอเตอร์ไฟฟ้าก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีความเสี่ยงต่อปัญหาเรโซแนนซ์ขณะใช้งาน การสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การยึดโครงสร้างที่ไม่เหมาะสม, การชำรุดของแบร์ริง, ขนาดของภาระงานที่ไม่สม่ำเสมอ, ความสัมพันธ์กันระหว่างจำนวนร่องของสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ไม่เหมาะสม, การออกแบบและการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐาน, ความเสื่อมสภาพของวัสดุต่าง ๆ ตามอายุการใช้งาน แม้ว่าตัวอย่างสาเหตุต่าง ๆ เหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อการสูญเสียทางกลและสมรรถนะในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า อีกทั้งยังส่งผลไปกระทบต่อการกระจายตัวที่ไม่สมดุลของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ขณะใช้งานด้วย ทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง [1-2]

นักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจกับปัญหาเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ อาทิเช่น ในปี 2002 Jason D. Ede และคณะได้ทำการศึกษาสภาวะเรโซแนนซ์ของมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน โดยทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความถี่ธรรมชาติต่าง ๆ เช่น คุณสมบัติของวัสดุในมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน [1] หรือในปี 1999 C. G. C. Neves และคณะได้ทำการศึกษา การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำต่อโครงสร้างของมอเตอร์ โดยสามารถแสดงผลตอบสนองของความถี่ต่าง ๆ ตามส่วนประกอบของมอเตอร์ [2] และในปี 2003 F. Ishibashi และคณะ ทำการศึกษาหาความถี่ธรรมชาติของแกนเหล็กที่สเตเตอร์ และแกนเหล็กที่โรเตอร์พร้อมขดลวดที่ใช้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมุ่งเน้นการวิ

เคราะห์ความถี่ธรรมชาติเฉพาะในโหมดที่ 2 (มอเตอร์ดังกล่าวต้องการหลีกเลี่ยงความถี่ในโหมดที่ 2) โดยใช้เทคนิค two-mass two-degrees-of-freedom และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีผลที่ใกล้เคียงกัน [3]

2. กรณีศึกษามอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำมาใช้ในแบบจำลอง

ภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำต้นแบบ ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส 50 Hz, มีกำลังไฟฟ้า 373 วัตต์ โดยมีความเร็วรอบ 1370 รอบต่อนาที โรเตอร์เป็นแบบ B และตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในมอเตอร์ต้นแบบ ทั้งสเตเตอร์ โรเตอร์ มอเตอร์เฟรม และขดลวดไฟฟ้า ทั้งนี้พารามิเตอร์เหล่านี้จะนำไปใช้ในการประมวลผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

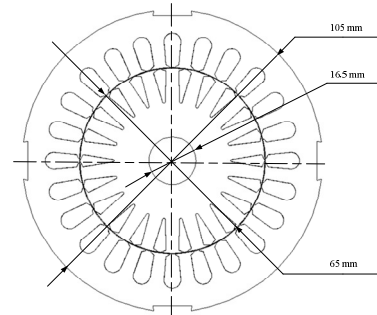


ภาพ 1. ส่วนประกอบของมอเตอร์ที่นำมาใช้ในแบบจำลอง

ตาราง 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

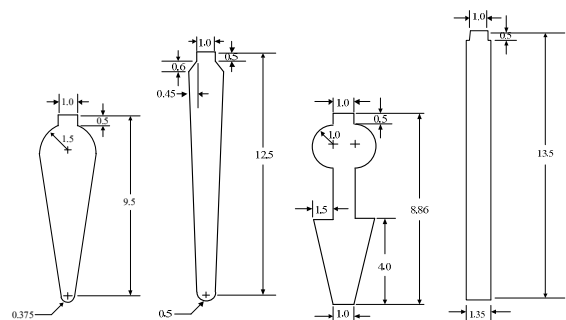
อุปกรณ์	สเตเตอร์, โรเตอร์	โรเตอร์ บาร์	ขดลวด
ประเภท	M 54	Aluminum Alloy	Copper
Electromagnetic	Relative	B-H	1
	Resistivity	B-H	5.7e-008
Structural	Young's	2e011	7.1e+010
	Poisson's	0.3	0.33
	Density	7850	2770
	Thermal Expansion	1.2e-005	2.3e-005

ภาพที่ 2 แสดงขนาดมอเตอร์ที่นำมาใช้ในแบบจำลองที่ใช้ในวิธีจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้งนี้ขนาดของสเตเตอร์ในมอเตอร์ต้นแบบจะนำไปใช้ในโรเตอร์โมเดลรูปทรงต่าง ๆ เพื่อให้ผลตอบสนองในโรเตอร์มีความชัดเจน



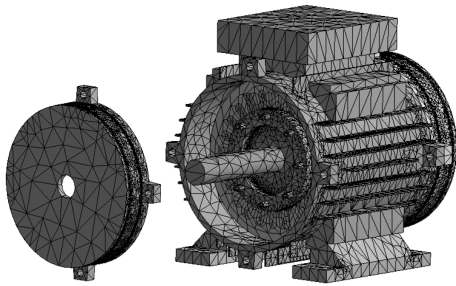
ภาพที่ 2. ขนาดมอเตอร์ที่นำมาใช้ในแบบจำลอง

สมาคมผู้ผลิตเครื่องไฟฟ้านานาชาติ (National Electrical Manufacturers Association; NEMA) ได้กำหนดมาตรฐานของรูปทรงโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ออกเป็น 4 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 3 และรูปทรงเหล่านี้จะถูกนำไปสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทางคณะที่วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS ที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการประมวลผลทางเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประมวลผลทางการสั่นสะเทือน [6] ของวัสดุแบบต่าง ๆ โดยให้ความแม่นยำอย่างมากในกรณีที่มีปัญหาเป็นแบบเชิงเส้น



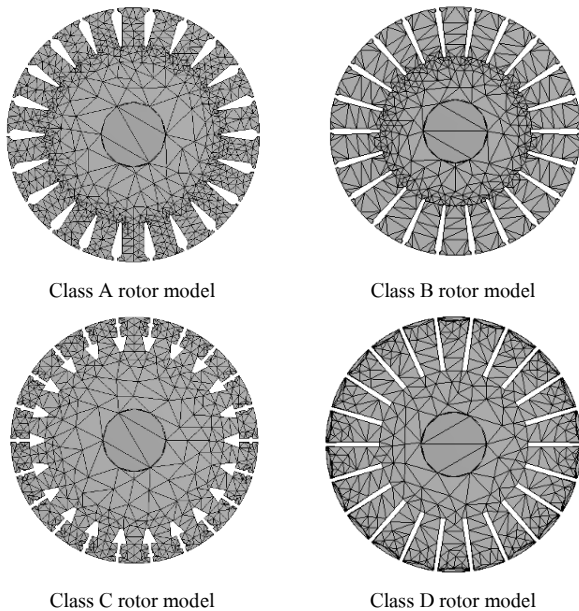
Class A Class B Class C Class D
ภาพ 3. รูปทรงของร่องสลักในโรเตอร์แต่ละแบบตามมาตรฐาน NEMA

3. แบบจำลองมอเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

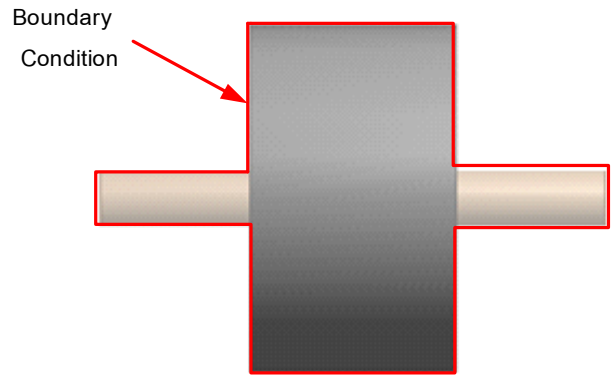


ภาพ 4. เมชของมอเตอร์โมเดลด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพที่ 4 แสดงเมชของโมเดลของมอเตอร์ต้นแบบในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และภาพที่ 5 แสดงโมเดลของโรเตอร์ตามมาตรฐานของ NEMA ทั้ง 4 ประเภท กำหนดและออกแบบให้ปริมาตรของโรเตอร์ทั้ง 4 แบบ มีปริมาตรที่เท่ากัน และมีจำนวนร่องสลิตทั้งหมด 22 ช่อง ภาพที่ 6 แสดงโมเดลการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของปัญหาในการวิเคราะห์ ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งจากภาพการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณขอบเขตเฉพาะแกนเหล็กสเตเตอร์, แกนเหล็กโรเตอร์และเพลลา ไม่รวมผลที่เกิดกับร่องลื่น (Bearing) หรือส่วนอื่นๆ



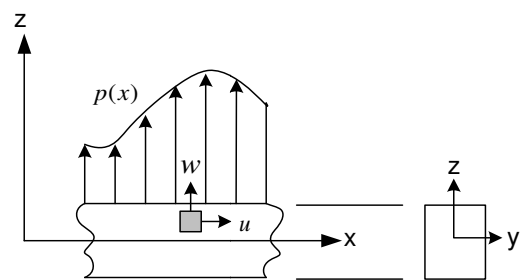
ภาพ 5. โมเดลของโรเตอร์ทั้ง 4 แบบ



ภาพ 6. เงื่อนไขขอบเขต

4. การวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของวัตถุที่มีรูปทรงคล้ายคาน (กรณีที่พิจารณาที่ใช้โรเตอร์) สามารถนำสมการของคานมาวิเคราะห์เพื่อทำการอ้างอิงได้ [1, 5-6] เพราะองค์ประกอบหลักของคานและ โรเตอร์มีลักษณะเดียวกัน ประกอบด้วยความยาวและพื้นที่หน้าตัด ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการหาความสัมพันธ์ต่างๆที่เกิดขึ้น ภาพที่ 7 แสดงส่วนหนึ่งของคานที่วางตัวอยู่ในแนวแกน x และมีพื้นที่ หน้าตัดในระนาบ $y-z$ หากคานนี้ถูกแรงแบบกระจาย (Distributed Load) $p(x)$ มากระทำดังแสดง ในภาพก่อให้เกิดการโก่งด้วยค่าเคลื่อนตัว w ในแนวแกน z และการยืดตัว u ในแนวแกน x



ภาพ 7. การโก่งและยืดตัวของคานเมื่อถูกแรงมากระทำ

สมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการโก่งของคานอันเนื่องมาจากแรงที่กระทำเป็นแบบกระจาย [5] สามารถเขียนได้

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 w}{dx^2} \right) - p(x) = 0 \quad (1)$$

โดย E แทนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำแกน และ I แทน โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด (Moment of Inertia of Area)

จากสมการเชิงอนุพันธ์ (1) สามารถใช้วิธีถ่วงน้ำหนักเศษตักตั้งเพื่อปรับใช้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาการโค้งของแกน หรืออาจใช้วิธีการแปรผัน โดยถ้าหากใช้วิธีการแปรผันจำเป็นต้องหาพลังงานศักย์รวมซึ่งศักย์ที่เกิดขึ้นจากประกอบด้วยพลังงาน

โดยพิจารณาความเครียดในวัตถุ U ที่เกิดขึ้นจากผลของแรงภายนอก V^* สามารถแสดงได้เป็น

$$U^* = \frac{1}{2} \int_V \sigma_x \epsilon_x dV \quad (2)$$

$$\text{เมื่อแทน } \sigma_x = E \epsilon_x \text{ โดย } \epsilon_x = \frac{du}{dx} = -z \frac{d^2 w}{dx^2}$$

และพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอก คือ

$$V^* = -Work = -\int_0^L p(x)w(x)dx \quad (3)$$

ดังนั้น พลังงานศักย์รวมที่เกิดขึ้นทั้งหมด [5] คือ

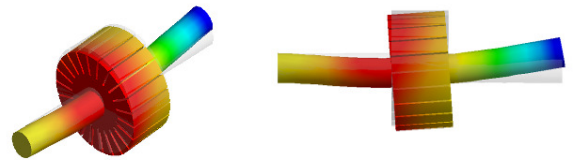
$$J = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx - \int_0^L p(x)w(x)dx \quad (4)$$

5. ผลและวิเคราะห์ผล

จากแบบจำลองโรเตอร์โมเดลทั้ง 4 แบบ นำมาประมวลผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการศึกษาผลกระทบความยาวของแกนเหล็กของโรเตอร์ และคุณลักษณะของความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์โมเดลทั้ง 4 แบบ ในงานวิจัยนี้เน้นการศึกษาแบบการสั่นสะเทือน 2 รูปแบบ (โหมด) ได้แก่ Bending Mode และ Rotational Mode

5.1 ความยาวของแกนเหล็กในโรเตอร์ 31 มิลลิเมตร

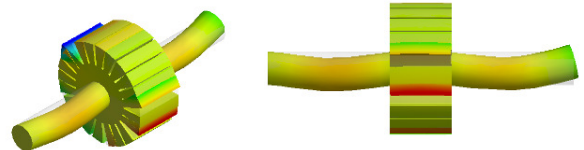
โดยออกแบบให้แกนเหล็กของโรเตอร์ให้มีขนาดความยาวลดลง 31 มิลลิเมตรหรือ 50% ของโรเตอร์แบบปกติ ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 8 โดยเน้นรูปแบบการสั่นสะเทือนใน Bending Mode และ Rotational Mode ในแบบจำลองโรเตอร์ทั้ง 4 แบบ พบว่าใน Bending Mode มีความถี่สำคัญ 3 ช่วง ได้แก่ First Bending, Second Bending และ Third Bending Modes และผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าโรเตอร์ Class A จะมีความถี่สูงสุดในรูปความถี่ First Bending Mode (2,190 Hz) และ Third Bending Mode (17,008 Hz) ขณะที่โรเตอร์ Class B จะมีความถี่สูงสุดในโหมดความถี่ Second Bending Mode (4,505 Hz) และเมื่อหากพิจารณาที่ Rotational Mode โรเตอร์ Class B จะมีความถี่สูงสุด (12,925 Hz) และโรเตอร์ Class C ค่าความถี่ธรรมชาติ ต่ำสุด ในทุกโหมด



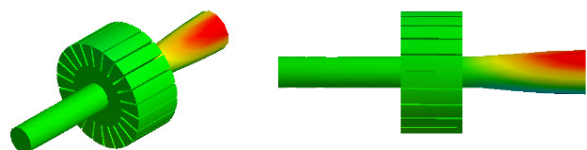
1st Bending Mode (2,176 Hz)



2nd Bending Mode (4,505 Hz)



3rd Bending Mode (16,948 Hz)

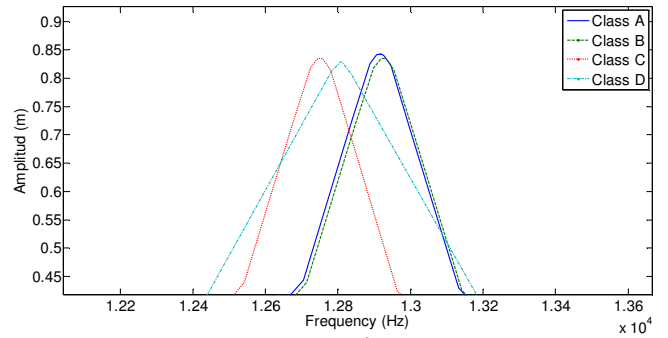


Rotational Mode (12,925 Hz)

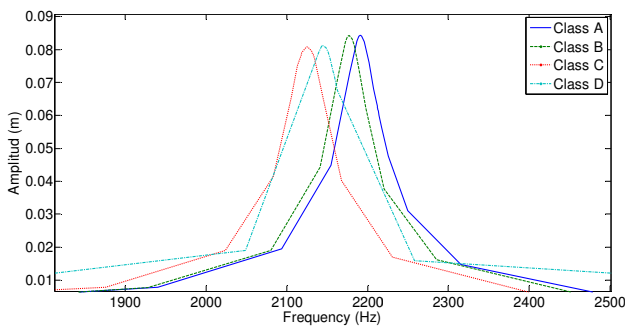
ภาพ 8. รูปทรงโรเตอร์ Class B ที่โหมดความถี่ต่าง ๆ

ตาราง 2 สรุปความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์แบบต่างๆ

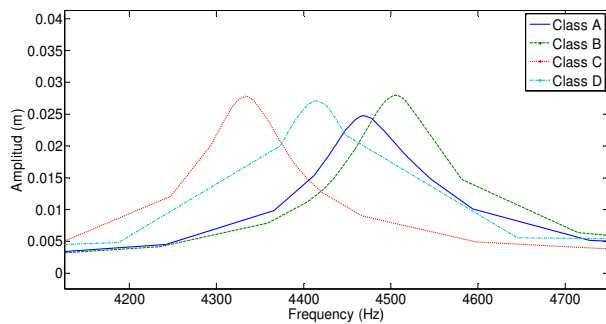
Mode	Class of Rotors			
	A	B	C	D
1 st Bending	2,190	2,176	2,125	2,143
2 nd Bending	4,469	4,505	4,334	4,414
3 rd Bending	17,008	16,948	16,365	16,588
Rotational	12,916	12,925	12,750	12,807



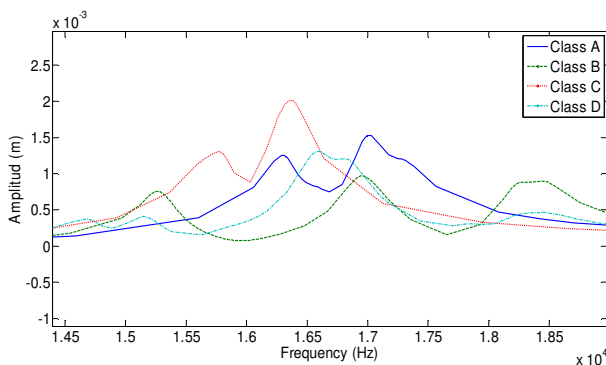
ภาพ 12. การตอบสนองเชิงความถี่ในโหมด Rotational



ภาพ 9. การตอบสนองเชิงความถี่ในโหมด First Bending



ภาพ 10. การตอบสนองเชิงความถี่ในโหมด Second Bending

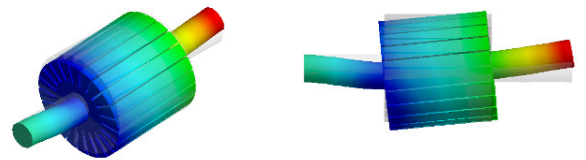


ภาพ 11. การตอบสนองเชิงความถี่ในโหมด Third Bending

ภาพที่ 9 ถึง ภาพที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบผลการประมวลผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของความถี่ธรรมชาติในโรเตอร์ ทั้ง 4 แบบโดยแยกตามโหมดต่างๆ เช่น First Bending, Second Bending, Third Bending และ Rotational Modes ตามลำดับ

5.2 ความยาวของแกนเหล็กในโรเตอร์ 62 มิลลิเมตร

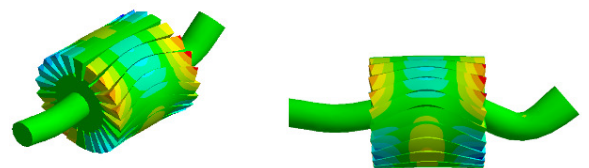
โดยออกแบบให้แกนเหล็กของโรเตอร์ให้มีขนาดความยาว 62 มิลลิเมตร(แบบปกติ) ผลจากการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



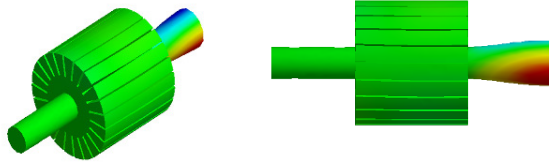
1st Bending Mode (2,423 Hz)



2nd Bending Mode (4,514 Hz)



3rd Bending Mode (4,514 Hz)



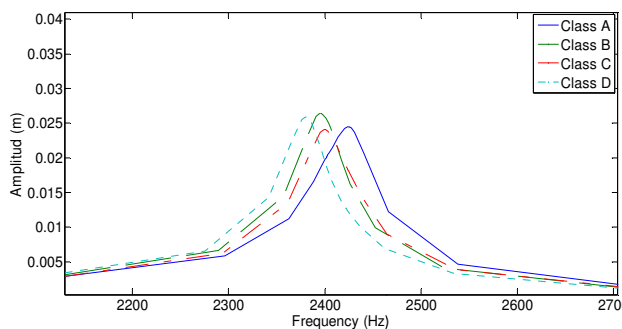
Rotational Mode (4,514 Hz)

ภาพ 13. โรเตอร์ Class B ที่โหมดความถี่ต่างๆ

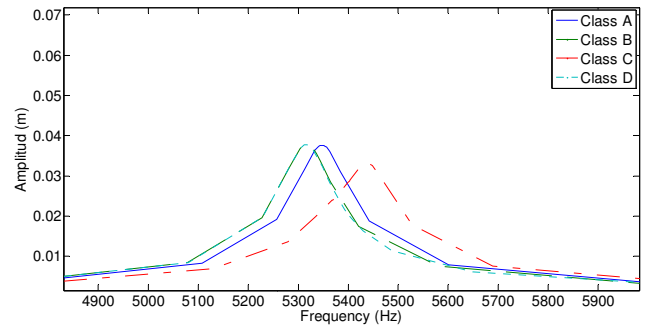
ตาราง 3 สรุปความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์แบบต่างๆ

Mode	Class of Rotors			
	A	B	C	D
1 st Bending	2,423	2,395	2,399	2,380
2 nd Bending	5,348	5,316	5,437	5,315
3 rd Bending	22,899	23,765	23,445	23,689
Rotational	17,282	16,572	16,907	16,629

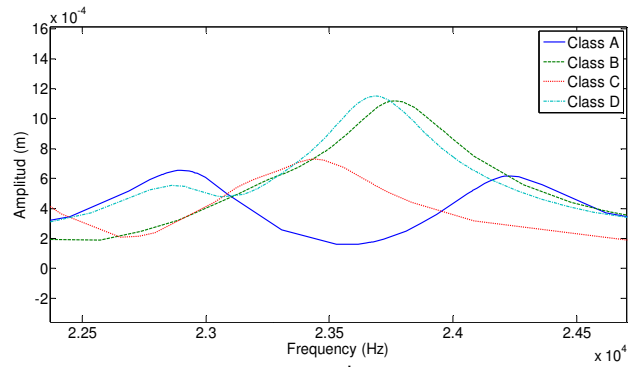
จากตารางที่ 3 และในภาพ 13 และผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นพบว่าโรเตอร์ Class A จะมีความถี่สูงสุดในรูปความถี่ First Bending Mode (2,423 Hz) และ Third Bending Mode (22,899 Hz) ขณะที่โรเตอร์ Class C จะมีความถี่สูงสุดในโหมดความถี่ Second Bending Mode (5,437 Hz) และเมื่อหากพิจารณาที่ Rotational Mode โรเตอร์ Class A จะมีความถี่สูงสุด (17,282 Hz)



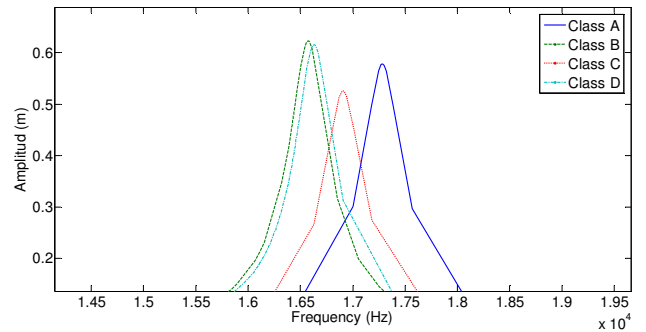
ภาพ 14. การตอบสนองเชิงความถี่ในโหมด First Bending



ภาพ 15. การตอบสนองเชิงความถี่ในโหมด Second Bending



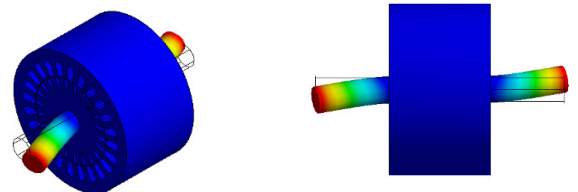
ภาพ 16. การตอบสนองเชิงความถี่ในโหมด Third Bending



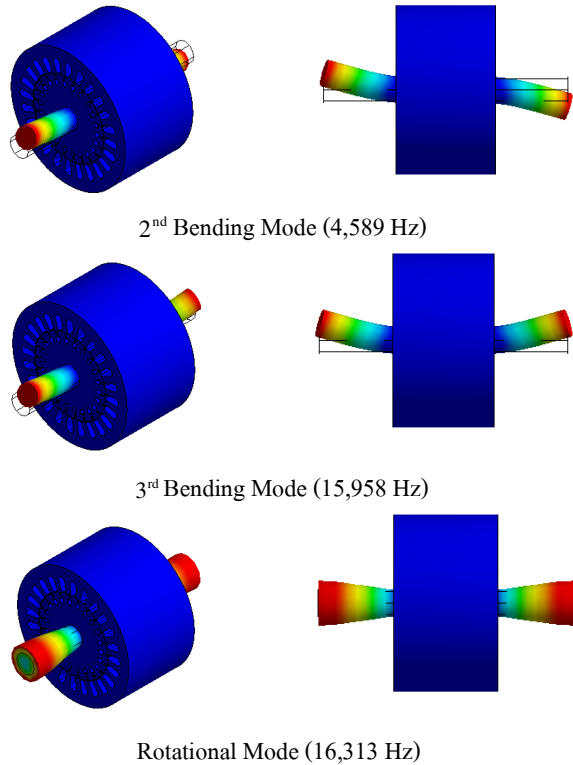
ภาพ 17. การตอบสนองเชิงความถี่ในโหมด Rotation

5.3 มอเตอร์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของโรเตอร์แต่ละประเภทกับ สเตเตอร์ของมอเตอร์ ได้ผลดังตารางที่ 4 และตัวอย่างการตอบสนองความถี่ในโหมดต่างๆ ดังภาพ 18



1st Bending Mode (4,533 Hz)



ภาพ 18. มอเตอร์ที่โรเตอร์แบบต่าง ๆ โหมดความถี่ที่ 1

ตาราง 4 ความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์

Mode	Class			
	A	B	C	D
1 st Bending	4,514	4,521	4,533	4,528
2 nd Bending	4,570	4,576	4,589	4,585
3 rd Bending	15,935	15,974	15,958	15,989
Rotational	16,241	16,251	16,313	16,293

6. สรุป

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแบบจำลองของรูปทรงโรเตอร์ 4 ประเภท ตามมาตรฐาน NEMA ร่วมกับการสั่นสะเทือนทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสชนิดกรงกระรอก เพื่อเปรียบเทียบขนาดความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ ในการจำลองผลได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยโปรแกรม ANSYS พร้อมแสดง

ผลลัพธ์ด้วยภาพกราฟฟิคต่างๆ ที่แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะทางกลของมอเตอร์ เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์

เมื่อพิจารณารูปทรงโรเตอร์ทั้ง 4 ประเภท โดยมีเกณฑ์ปริมาตรโรเตอร์เท่ากันปรากฏผลดังนี้ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์ต่ำสุด จะมีโอกาสที่มอเตอร์ตัวนั้นได้รับความเสียหายจากการสั่นสะเทือน(เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์) มากกว่ามอเตอร์ที่มีความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์ที่สูงกว่า ดังนั้น มอเตอร์ Class D มีโอกาสได้รับความเสียหายจากการสั่นสะเทือนมากกว่ามอเตอร์ประเภทอื่น ซึ่งตรงกันข้ามกับมอเตอร์ Class A มีโอกาสได้รับความเสียหายจากการสั่นสะเทือนน้อยกว่ามอเตอร์ประเภทอื่น และ เมื่อพิจารณารูปทรงโรเตอร์แบบต่างๆทั้ง 4 ประเภท ต่อความถี่ธรรมชาติ จึงอาจสรุปได้ว่า ความถี่ธรรมชาติจะมีค่าลดลงเมื่อร่อง โรเตอร์ลึกขึ้น แต่เมื่อพิจารณารูปทรงโรเตอร์นั้นความถี่ธรรมชาติไม่ได้มีปัจจัยหลังเพียงความลึกของร่องอย่างเดียวเท่านั้น ยังมีปัจจัยทางด้านรูปทรงเรขาคณิตของร่องประกอบด้วย ซึ่งปัจจัยทางด้านรูปทรงเรขาคณิตอาจส่งผลกระทบต่อความถี่ธรรมชาติน้อยกว่าปัจจัยทางด้านความลึก ทั้งนี้อาจมีเหตุผลเนื่องจากข้อกำหนดความต้องการพื้นที่หน้าตัดที่ต้องเท่ากันของมอเตอร์แต่ละประเภท และวัสดุที่ใช้เป็นชนิดเดียวกัน ดังนั้นในการพิจารณาเลือกโรเตอร์ จึงต้องคำนึงถึงความลึกของร่องซึ่งเป็นปัจจัยหลัก ควบคู่ไปกับปัจจัยทางด้านรูปทรงเรขาคณิตของร่อง

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ทางการเงินจากบววิจัยปี 2552 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในหัวข้อวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์ปัญหาการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jason D. Ede, Z. Q. Zhu, and D. Howe, “Rotor Resonances of High-Speed Permanent-Magnet Brushless Machines”, IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 38, No. 6, pp. 1542 - 1548, November/December 2002.

- [2] C. G. C. Neves, R. Carlson, N. Sadowski, J. P. A. Bastos', N. S. Soeiro, and S. N. Y. Gerges, "Experimental and Numerical Analysis of Induction Motor Vibrations", IEEE Transactions on Magnetic Application, Vol. 35, No. 3, pp. 1314 – 1317, May 1999.
- [3] F. Ishibashi, K. Kamimoto, T. Hayashi, S. Noda and K. Itomi, "Natural frequency of stator core of small induction motor", IEE Proceeding Electric Power Application, Vol. 150, No. 2, pp. 1542 - 1548, March 2003.
- [4] Stephen J. Chapman, Electric Machines Fundamentals. 4th Ed., Singapore : McGraw-Hill. 2005.
- [5] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2547). ไฟฟ้าในตู้เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] S. Ruangsinchaiwanich, and S. Phanphanit, "Influence of damper position on multi-arm actuator resonance in HDD", International Conference Electrical Machines and Systems (ICEMS 2009), Tokyo, Japan, November 15 - 18, 2009.