

การศึกษาการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงของสปินเดิลมอเตอร์ ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า

The study of vibration that effects acoustic noise of spindle motors in harddisk drives using electrical excitation

อภิรัฐ ศิลปพินิจ บุรินทร์ โพธิ์ชัย ปาจารย์ ถาวรล้ำเลิศ และ นกคณัย อาชวาคม*
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ. พญาไท กรุงเทพฯ 10330
โทร 0-2218-6610 โทรสาร 0-2252-2889 *อีเมล nopdanai.a@chula.ac.th

Apirat Sillapapinij, Burin Poechai, Pajaree Thawornlamlert, and Nopdanai Ajavakom*
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Phayathai Road, Bangkok 10330
Tel: 0-2218-6610, Fax: 0-2252-2889 *Email: nopdanai.a@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงรบกวนของสปินเดิลมอเตอร์ชนิด Fluid-Dynamic Bearing (FDB) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้การกระตุ้นทางไฟฟ้ากับสปินเดิลมอเตอร์เพื่อหาผลการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response Function, FRF) และความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ พบว่าเมื่อความถี่ของไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นตรงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนที่สูงผิดปกติ นอกจากนี้ตำแหน่งมุมสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ก็ยังมีผลต่อการสั่นสะเทือนด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากทิศทางของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับสเตเตอร์และโรเตอร์ นั้นมีส่วนเสริมให้เกิดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างมอเตอร์ได้ต่างกัน สำหรับมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นแบบสมมาตร ซึ่งจะพบว่าทุกๆ 30 องศาของการหมุนของโรเตอร์จะให้ผลของการสั่นสะเทือนซ้ำกันกับ 30 องศาที่ผ่านมาย้ายสุดสเปคตรัมของเสียงรบกวนที่ได้จากการหมุนของมอเตอร์ก็ยังสามารถนำมาใช้ระบุถึงโหมดการสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดเสียงรบกวนได้อีกด้วย และเมื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองเชิงความถี่ของโครงสร้างมอเตอร์กับสเปคตรัมของเสียงรบกวน จะพบว่าลักษณะสเปคตรัมของเสียงรบกวนจะมียอดแหลมซึ่งเป็นระดับเสียงที่แพร่ออกมาจากมอเตอร์สูงกว่าปกติ ณ จุดที่มีความถี่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์

Abstract

This article is to study the vibration that effects acoustic noise of fluid dynamic bearing (FDB) spindle motors in hard disk drives. The tests are performed by using an electrical excitation to determine the frequency response functions (FRF) as well as the natural frequencies of motor structure. When the excitation frequency is coincident with the motor's natural frequency, unusual high amplitude in vibration occurs. In addition, it is found that vibration is also a function of the orientation angle between pole and slot. By measuring the vibration while the rotor is rotated by hand, the direction of force that is responsible for each natural frequency of motor can be identified. Moreover, since the tested motors are symmetric, i.e. every 30 degrees of the orientation angle between pole and slot will ideally give a similar vibration test result. Finally, the acoustic noise spectrum obtained from a spinning motor is also obtained for identifying the vibro-acoustic modes where the coincidence of an excitation frequency and a resonance frequency causes a high peak in the noise spectrum.

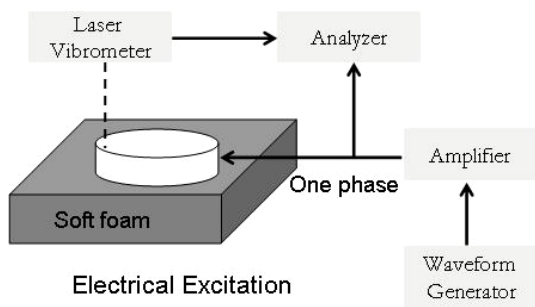
1. บทนำ

การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ เป็นผลให้มีความต้องการฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลมีความจุสูงขึ้นและสามารถ อ่าน เขียน และส่งผ่านข้อมูลที่รวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งความต้องการเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องออกแบบให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สปินเดิล

มอเตอร์มีแผ่นดิสก์ที่สามารถบรรจุข้อมูลให้มีความหนาแน่นยิ่งขึ้น ไปพร้อมกับอัตราการหมุนของสปีนเดิลมอเตอร์ที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนที่บริเวณแผ่นดิสก์สูง จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการสั่นสะเทือนให้น้อยลง เพื่อป้องกันการเกิดความผิดพลาดในการอ่านและเขียนข้อมูลลงในแผ่นดิสก์ ซึ่งผลเสียอีกอย่างจากการสั่นสะเทือนคือมันยังทำให้มีเสียงรบกวนเกิดขึ้น โดยแหล่งกำเนิดหลักของการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาจากสปีนเดิลมอเตอร์นั่นเอง

ในปัจจุบัน fluid dynamic bearing (FDB) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สปีนเดิลมอเตอร์ เนื่องจากให้การสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับ ball bearing โดยปกติแล้วเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจากการทำงานนั้นจะมีแหล่งกำเนิดมาจาก การกระตุ้นด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า, การกระตุ้นทางกล และแหล่งกำเนิดทางอากาศพลศาสตร์ [1] จากการทดลอง [2] ปรากฏว่าแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนใน FDB สปีนเดิลมอเตอร์โดยส่วนใหญ่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์สามารถทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนในมอเตอร์ เช่น สเตเตอร์ โรเตอร์ และฐานของมอเตอร์ และยังส่งผลให้เกิดเสียงรบกวนตามมาอีกด้วย

บทความนี้จะเน้นไปที่การศึกษาคุณสมบัติของเสียงรบกวนที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของ FDB สปีนเดิลมอเตอร์ ผ่านการทดลองโดยการกระตุ้นให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนด้วยการจ่ายไฟเข้ามอเตอร์เพื่อหาผลการตอบสนองเชิงความถี่สำหรับการวิเคราะห์ตำแหน่งความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ และทิศทางของแรงที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน ณ ความถี่ธรรมชาตินั้นๆ รวมไปถึงลักษณะของเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจากการทำงานปกติของมอเตอร์

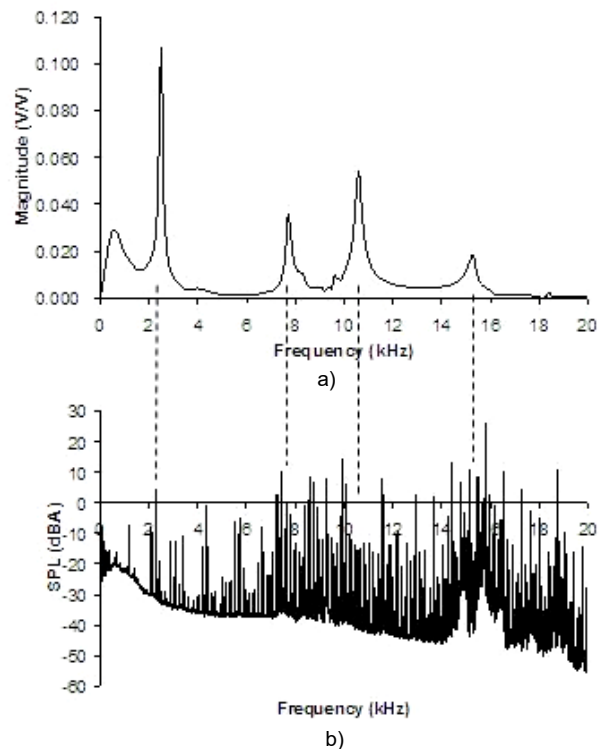


รูปที่ 1 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบการสั่นสะเทือน

2. ผลตอบสนองเชิงความถี่ และ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์

ในการทดสอบจะกระทำโดยการใช้ FDB สปีนเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ที่มีจำนวน pole กับ slot เท่ากับ 12 และ 9 ตามลำดับ มีความเร็วรอบในการหมุนที่ 7200 rpm สำหรับการติดตั้งเครื่องมือวัดและมอเตอร์แสดงในรูปที่ 1 โดยมอเตอร์จะวางอยู่บนฟองน้ำซึ่งทำตัวเสมือน free boundary condition และโครงสร้างมอเตอร์จะถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้าโดยการจ่ายคลื่นรูปไซน์ไปให้มอเตอร์เพียงเฟสเดียวโดยใช้ function generator จ่ายไฟไปยังเครื่องขยาย

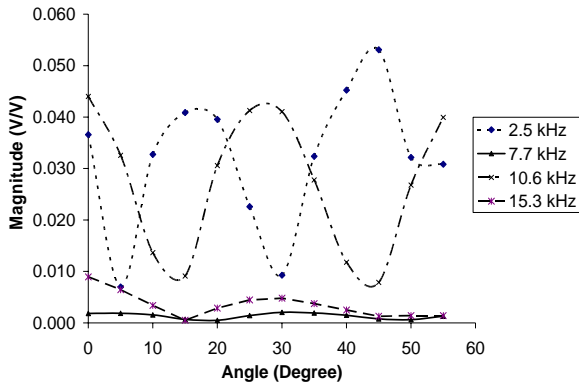
สัญญาณ (amplifier) ก่อนจะจ่ายเข้ามอเตอร์ ขณะที่สองเฟสที่เหลือจะไม่มีกระแสไฟฟ้าเข้าไป ดังนั้นโรเตอร์จึงไม่หมุน การกระตุ้นด้วยคลื่นรูปไซน์ให้กับมอเตอร์ในช่วงเวลาหนึ่งนั้นจะเป็นเพียงแค่ความถี่เดียว แต่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่และแอมพลิจูดเพื่อหาผลการตอบสนองเชิงความถี่ของมอเตอร์ได้ โดยความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะเพิ่มอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ 0.1-20 kHz และขนาดของแอมพลิจูดโดยประมาณคือ 0.1-1.7 V การสั่นสะเทือนที่ฐานของมอเตอร์ในทิศทาง radial และทิศทาง transverse ซึ่งเกิดจากแรงแม่เหล็กกระทำกับสเตเตอร์ วัดได้โดยใช้ laser doppler vibrometer แล้วส่งสัญญาณความเร็วไปยังเครื่อง analyzer เพื่อหาผลการตอบสนองเชิงความถี่ พบว่าการสั่นสะเทือนจากของทั้งสองทิศทางให้ตำแหน่งของความถี่ธรรมชาติที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตาม ขนาดของการสั่นสะเทือนที่วัดในทิศทาง radial จะน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการวัด ในทิศทาง transverse ดังนั้นเฉพาะผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่วัดในทิศทาง transverse ได้นำมาแสดงในรูปที่ 2 a) ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่ายอดแหลมที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆ นั้นคือ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ โดยมีค่าความถี่ธรรมชาติที่สามารถเห็นได้ชัดที่ 2.5, 7.7, 10.6 และ 15.3 kHz



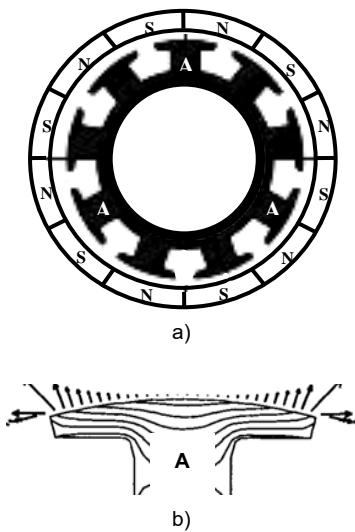
รูปที่ 2 a) ผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนที่ฐานของมอเตอร์ในทิศทาง transverse เปรียบเทียบกับ b) sound power spectrum ที่ได้จากมอเตอร์ขณะทำงาน

การสั่นสะเทือนของโครงสร้างมอเตอร์ที่วัดได้ไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับความถี่และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์เท่านั้น แต่ยังมีความสัมพันธ์กับมุมระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วย ซึ่งการทดสอบหาผลการตอบสนองเชิงความถี่นั้น โรเตอร์จะอยู่ที่ตำแหน่งเดียวตลอดเวลา

อย่างไรก็ตาม ถ้าเรากระตุ้นมอเตอร์ด้วยความถี่ที่ความถี่ธรรมชาติแล้ว วัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ ในขณะที่หมุนโรเตอร์ช้าๆ ด้วยมือ จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมของโรเตอร์และผลต่อการสั่นสะเทือนได้ นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้ถึงทิศทางของแรงแม่เหล็กที่มากระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือน ณ ตำแหน่งมุมต่างๆ ของโรเตอร์ที่ความถี่กระตุ้นนั้นๆ ได้อีกด้วย ในการศึกษาต่อไปนี้ อัตราส่วนของขนาดสูงสุดของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้ในทิศทาง transverse กับขนาดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระตุ้นของแต่ละความถี่ธรรมชาติถูกนำมาพล็อตและแสดงในรูปที่ 3 โดยการหมุนโรเตอร์ครั้งละ 5 องศา ตั้งแต่ 0 ถึง 55 องศา โดยที่ตำแหน่ง 0 องศาจะตรงกับมุมที่ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์เยื้องกับช่องว่างของสเตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4 a) โดยที่ตำแหน่ง 'A' แสดงให้เห็นถึงเฟสที่ถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้า เนื่องจากสปีนเดิลมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์ที่มีการหมุนแบบสมมาตร และมีจำนวนของ pole กับ slot เท่ากับ 12 และ 9 ตามลำดับ ดังนั้นในทางทฤษฎีที่ทุกๆ 30 องศาของการหมุนโรเตอร์จะให้ผลของการสั่นสะเทือนที่เหมือนเดิม

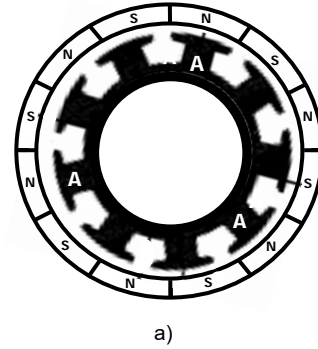


รูปที่ 3 การสั่นสะเทือนในทิศทาง transverse ของโรเตอร์เทียบกับมุมของโรเตอร์

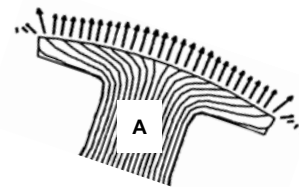


รูปที่ 4 a) ลักษณะ pole-slot ของสปีนเดิลมอเตอร์ ที่มุมโรเตอร์ 0 องศา และ b) ลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทาง tangential

ในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าที่ทุกค่าความถี่ของการกระตุ้น การสั่นสะเทือนจะเข้ารูปแบบเดิม มีค่าสูงสุด และต่ำสุดซ้ำกันที่ทุกๆ มุมที่เพิ่มขึ้น 30 องศา ตามทฤษฎีแต่ค่าที่วัดได้อาจจะไม่ซ้ำกันเนื่องจากมอเตอร์มีขนาดเล็ก การหมุนโรเตอร์ไป 5 องศาพอดีเป็นไปได้ลำบาก สำหรับความถี่ของการกระตุ้นที่ 7.7, 10.6 และ 15.3 kHz จะพบว่า ที่ตำแหน่ง 0 และ 30 องศาจะให้การสั่นสะเทือนที่สูงสุด และที่ 15 และ 45 องศาจะให้การสั่นสะเทือนที่ต่ำสุด ซึ่งที่ตำแหน่ง 0 และ 30 องศา โรเตอร์และสเตเตอร์เกิดการเยื้องกัน ดังรูป 4 a) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงแม่เหล็กที่มีความรุนแรงในแนว tangential บนสเตเตอร์และโรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4 b) ในทางกลับกัน ที่ตำแหน่ง 2.5 kHz จะมีการสั่นสะเทือนสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 15 และ 45 องศา โดยที่โรเตอร์นั้นอยู่ในแนวเดียวกันกับสเตเตอร์ ดังรูป 5 a) แรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นอยู่ในทิศทาง radial ดังแสดงในรูปที่ 5 b) ซึ่งการพิจารณาถึงขนาดและทิศทางของแรงแม่เหล็กไฟฟ้านั้นยังขึ้นอยู่กับจำนวนของ pole และ slot ของสปีนเดิลมอเตอร์อีกด้วย [3]



a)



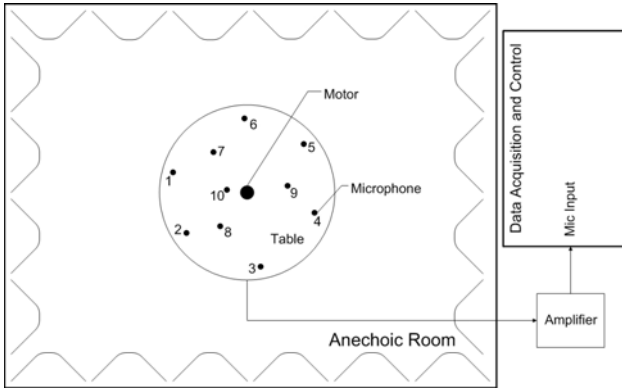
b)

รูปที่ 5 a) ลักษณะ pole-slot ของสปีนเดิลมอเตอร์ ที่มุมโรเตอร์ 15 องศา และ b) ลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทาง radial

3. การสั่นสะเทือน ณ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของเสียงรบกวน

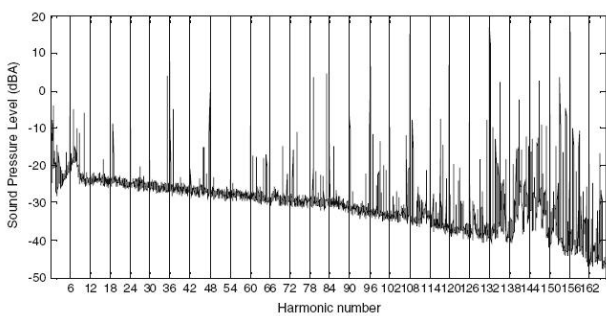
หลังจากการศึกษาถึงโหมดการสั่นสะเทือนซึ่งได้แสดงให้เห็นในส่วนที่แล้ว ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์จากเสียงรบกวนที่แพร่มาจากการทำงานของมอเตอร์ผ่านทางสเปกตรัมเสียง (sound power spectrum) ซึ่งในการหาสเปกตรัมเสียงจะติดตั้งสปีนเดิลมอเตอร์ดังต่อไปนี้ คือ มอเตอร์จะวางอยู่กับจุดรองรับที่ยึดด้วยเชือกบนโต๊ะที่ตั้งอยู่ในห้องไร้เสียงสะท้อน (anechoic room) ซึ่งเสียงที่แพร่กระจายจากการหมุนของมอเตอร์จะถูกวัดด้วยไมโครโฟนที่ตั้งอยู่แต่ละตำแหน่งตามลักษณะ

ของเครื่องทรงกลมและมีความสูงแตกต่างกันไป โดยที่ไม่โครโฟนทุกตัวจะมีระยะห่างจากปลายของไมโครโฟนถึงพื้นผิวของมอเตอร์เป็นระยะทางเท่ากันคือ 0.3 เมตร ทั้งหมด 10 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตำแหน่งของไมโครโฟนที่ใช้วัดเสียงรบกวนของสปินเดิลมอเตอร์ภายในห้องไร้เสียงสะท้อน

เมื่อสัญญาณของ sound power level ที่ได้จากการวัดนำมาผ่าน A-weighting filter ผลลัพธ์ที่ได้คือ sound power spectrum ดังแสดงในรูปที่ 2 b) โดยสามารถคำนวณหาค่าระดับความดังของเสียงโดยรวม (overall sound power level) ได้เท่ากับ 27.8 dBA ในสเปกตรัมเสียงจะพบว่ามี ยอดภูเขา (mountain peaks) เช่นเดียวกับ ยอดแหลม (discrete peaks) เกิดขึ้น โดยในส่วนของยอดแหลมจะมีอยู่อย่างหนาแน่นและโดยมากจะเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายโดยไดรเวอร์ (driver) ของมอเตอร์ ซึ่งมีค่า harmonics ค่าหนึ่งในสัญญาณไฟฟ้าตรงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 7 ผลลัพธ์ที่ได้คือเกิดการขยายการสั่นสะเทือนของโครงสร้างมอเตอร์ให้รุนแรงขึ้น และส่งผลให้เสียงรบกวนดังขึ้นอีกด้วย ในรูปที่ 2 b) จะพบโหมดการสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดเสียงรบกวน (vibro-acoustic mode) ได้จากตำแหน่งที่มียอดแหลมที่มีค่าสูงที่ใกล้เคียงกันกับความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ นั่นคือที่ความถี่ประมาณ 2.5 kHz ในช่วง 7.2-7.8 kHz และ 15.1-15.8 kHz



รูปที่ 7 สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ พล็อตเทียบกับค่าฮาร์โมนิก [2]

ยิ่งไปกว่านั้น จากการคำนวณค่าระดับความดังของเสียงโดยรวมพบว่าถ้ายอดแหลมที่มีค่ามากที่สุด ในสเปกตรัมเสียง มีค่าสูงขึ้นไปเล็กน้อย ก็สามารถเพิ่มระดับความดังของเสียงโดยรวมได้อย่างน่า

สังเกต ในที่นี้คือยอดแหลมที่ความถี่ช่วง 15.1-15.8 kHz ดังนั้นถ้าเราสามารถหลีกเลี่ยงการตรงกันของความถี่ที่ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า กระตุ้นที่ได้จากการจ่ายไฟให้มอเตอร์ทำงานปรกติ กับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ได้ จะส่งผลให้ยอดแหลมนี้ต่ำลงและระดับความดังของเสียงก็จะลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้น vibro-acoustic peaks เหล่านี้จึงเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาถึงระดับความดังของเสียงที่แพร่ออกมาจากมอเตอร์

4. สรุป

เนื่องจากการทำงานปกติของมอเตอร์จำเป็นต้องมีแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในการขับเคลื่อน ดังนั้นการทดสอบผลตอบสนองเชิงความถี่โดยใช้การกระตุ้นทางไฟฟ้าสามารถทำให้สามารถเห็นโหมดของการสั่นสะเทือนของโครงสร้างมอเตอร์ได้ชัดเจน ทำให้สามารถหาความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ได้โดยง่าย นอกจากนี้เรายังสังเกตได้ว่า ความรุนแรงของการสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับมุมของโรเตอร์ ที่บางความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์การสั่นสะเทือนจะเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อโรเตอร์กับสเตเตอร์นั้นอยู่ในแนวเดียวกันหรือเยื้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แหล่งกำเนิดหลักของการสั่นสะเทือนเป็นได้ทั้งแรงแม่เหล็กในทิศทาง radial หรือ tangential ตามลำดับ ในส่วนของเสียงที่เกิดจากการสั่นสะเทือน ลักษณะของการสั่นสะเทือนจะส่งผลโดยตรงต่อเสียงรบกวน สามารถพิสูจน์ได้โดยการสังเกตการทับซ้อนกันของยอดในผลตอบสนองเชิงความถี่ และสเปกตรัมเสียงที่แพร่จากมอเตอร์ขณะหมุน การแพร่ของเสียงจะดังผิดปกติถ้าความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้นตรงกับความถี่ธรรมชาติ ดังนั้นการทราบถึงความถี่ธรรมชาติ และ ทิศทางของแรงที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน ณ ความถี่ธรรมชาติต่างๆ ช่วยให้สามารถออกแบบมอเตอร์ให้มีการสั่นสะเทือน และเสียงรบกวนที่ลดลงได้โดยการออกแบบตัดแปลงโครงสร้างของมอเตอร์เพื่อหลีกเลี่ยงการตรงกันของความถี่กระตุ้นจากแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมบูรณ์กับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างของมอเตอร์ หรือ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอเตอร์ให้มีการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงในแนว radial หรือ tangential ที่น้อยลง ส่งผลให้เสียงที่แพร่ออกมาลดลงตาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Beranek LL., Ver IL, 1992, Noise and Vibration Control Engineering : Principles and Applications., Wiley, New York, pp. 709-734
- [2] Ajavakom, N., Jintanawan, T., Singhatanagid, P., and, Sripakagorn, P., 2007, On Investigation of Vibro-Acoustics of FDB Spindle Motors for Hard Disk Drives., Microsystem Technology, DOI 10.1007/s00542-006-0372-z.
- [3] Hartman A., Lorimer W., 2001, Undriven Vibration in Brushless DC Motors, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 2, pp. 789-792