

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีปัญหาการเยื้องศูนย์

Vibration Analysis of Eccentric Gears

ก่อเกียรติ บุญชูกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยี
การบำรุงรักษาเครื่องจักรกล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ 10330

สมชาย เดโชธรรมสถิต
ผู้จัดการแผนกซ่อมบำรุง
บริษัท นูบูน จำกัด
สมุทรปราการ
10540

การเยื้องศูนย์ของชุดเฟืองเป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหาการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ซึ่งมีผลต่อสภาวะการทำงานของชุดเฟือง ทำให้เกิดการสึกหรอและมีการสั่นสะเทือนมาก การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนสามารถใช้ตรวจสอบปัญหาการเยื้องศูนย์ได้

จากการทดลองของชุดเฟืองซึ่งปรับให้มีระยะการเยื้องศูนย์ต่างๆ กันและทำงานในสภาวะที่แตกต่างกัน เมื่อชุดเฟืองมีระยะการเยื้องศูนย์มากขึ้น การสั่นสะเทือนอาจมีระดับสูงขึ้นหรือลดลงได้ สเปกตรัมมีแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างและแอมพลิจูดของความถี่การหมุนของเฟืองที่เยื้องศูนย์เพิ่มสูงขึ้น แต่มีรูปแบบไม่ชัดเจน โดยที่แอมพลิจูดของความถี่การหมุนของฟันเฟืองและฮาร์มอนิกอาจเพิ่มขึ้นแล้วลดลง เมื่อระยะการเยื้องศูนย์มากขึ้น แกมมิตูของยอดเขปส์ตรัมของเฟืองที่เยื้องศูนย์มากจะมีขนาดสูงขึ้นเด่นชัดเทียบกับยอดเขปส์ตรัมของเฟืองที่เยื้องศูนย์น้อย

Eccentricity of gear trains can cause vibration problem in machinery and also affects the gear trains itself. It leads to wear and high vibration. Vibration analysis was used to study eccentric gears.

Experiments with the simulated gear trains were conducted with different levels of eccentricity and working conditions. As eccentricity increased the vibration level might increase or decrease. Spectrum amplitude of the GMF and its sidebands tended to increase and then decrease. As eccentric distance increased, the gamnitude of the more eccentric gear was consistently higher than the gamnitude of the less eccentric gear.

1. บทนำ

การเยื้องศูนย์ของเฟืองอาจเกิดจากความผิดพลาดจากการผลิต การติดตั้ง หรืออาจเกิดจากเพลหาหมุนเยื้องศูนย์ ปัญหาการเยื้องศูนย์ของเฟืองทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ทำให้อัตราทดรอบหมุนคลาดเคลื่อนตลอดจนเป็นสาเหตุให้ชุดเฟืองเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควรจะเป็น

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนน่าจะเป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบการเยื้องศูนย์ของชุดเฟืองได้ การทดลองถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเมื่อเฟืองมีระยะเยื้องศูนย์มากขึ้น โดยการวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum) และเซปส์ตรัม (cepstrum)

2. การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองกับปัญหาการเยื้องศูนย์

ถ้าฟันของเฟืองคู่ที่ขบกันนั้นมีโปรไฟล์เป็นแบบอินโวลูทที่สมบูรณ์ มีระยะพิตช์คงที่สม่ำเสมอทุกฟันและไม่มีภาวะมากระทำกับฟัน

เฟืองแล้ว เฟืองจะหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่และจะไม่เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น แต่ในความเป็นจริงแล้ว เฟืองต้องรับภาระซึ่งทำให้เกิดการโค้งตัวของฟัน และฟันเฟืองอาจจะมีรูปร่างโปรไฟล์ที่เบี่ยงเบนไปจากเส้นโค้งอินโวลูท มีระยะพิตช์ไม่เท่ากันทุกฟัน ซึ่งอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การผลิต การติดตั้ง การสึกหรอ หรือ การแตกร้าวของฟัน เป็นต้น ด้วยสาเหตุดังกล่าว มีผลทำให้การเคลื่อนที่เชิงมุมของเฟืองคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ถูกต้อง ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเรียกว่า “ความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านการเคลื่อนที่ (transmission error)” [1]

การเยื้องศูนย์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ตำแหน่งการขบของฟันเฟืองคลาดเคลื่อน และทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น การเยื้องศูนย์ของเฟืองจะมีลักษณะเป็นคาบตามรอบหมุนของเฟือง สัญญาณการสั่นสะเทือนจะถูกมอดูเลตแอมพลิจูดและจะปรากฏเป็นแถบความถี่ข้าง

(sidebands) รอบความถี่การขบของฟันเฟือง (gear mesh frequency; GMF) [2]

3. สเปกตรัมและซีสต์ริ่ม

สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถแสดงได้สามรูปแบบ คือ แสดงบนโดเมนเวลา โดเมนความถี่และโดเมนคิวเฟรนซี (quefrensy) สัญญาณบนโดเมนความถี่เรียกว่า สเปกตรัม สัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซีเรียกว่า ซีสต์ริ่ม [3]

การวิเคราะห์สเปกตรัมเป็นการวิเคราะห์ลักษณะเป็นคาบ (periodic) ของสัญญาณบนโดเมนเวลาโดยอาศัยหลักการแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) ส่วนการวิเคราะห์ซีสต์ริ่มเป็นการวิเคราะห์ลักษณะเป็นคาบของสัญญาณบนโดเมนความถี่ หรืออาจเรียกซีสต์ริ่มว่าเป็นสเปกตรัมของสเปกตรัม

สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองประกอบด้วยสัญญาณหลายความถี่มารวมกัน ลักษณะสัญญาณบนโดเมนเวลาจึงดูซับซ้อน และสังเกตลักษณะเป็นคาบได้ยาก สัญญาณบนโดเมนความถี่หรือสเปกตรัมแสดงค่าแอมพลิจูดของสัญญาณแต่ละความถี่ สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองประกอบด้วย

- ความถี่การขบของฟันเฟืองหรือ GMF และฮาร์โมนิก เกิดจากการกระทบกันของซี่ฟันเฟือง $GMF = (\text{จำนวนฟันเฟือง}) \times (\text{ความเร็วรอบเฟือง})$
- แถบความถี่ข้างรอบความถี่ GMF และฮาร์โมนิก โดยมีระยะห่างความถี่เท่ากับความเร็วรอบ (RPM) ของเฟืองที่มีปัญหาความคลาดเคลื่อนโปรไฟล์

สัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซีหรือซีสต์ริ่มจะแสดงลักษณะเป็นคาบของยอดสัญญาณความถี่ต่างๆในโดเมนความถี่ แถบความถี่ข้างที่มีระยะห่างความถี่เท่ากับ RPM จะแสดงเป็นยอดสัญญาณ $1/RPM$ บนโดเมนคิวเฟรนซี

แถบความถี่ข้างประกอบด้วยหลายยอดสัญญาณ และตามปกติแล้วความถี่ข้างจะมีขนาดแอมพลิจูดต่ำ และเนื่องจากสัญญาณอาจมีแถบความถี่ข้างมากกว่าหนึ่งชุดซึ่งแต่ละชุดจะมีระยะห่างความถี่ต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์แถบความถี่ข้างบนโดเมนความถี่จึงอาจยุ่งยากและเสียเวลามาก การวิเคราะห์แถบความถี่ข้างด้วยการอ่านค่ายอดสัญญาณ $1/RPM$ ในโดเมนคิวเฟรนซีจึงสะดวกและรวดเร็วกว่า

เมื่อมีการเยื้องศูนย์ของชุดเฟืองจะทำให้ความคลาดเคลื่อนโปรไฟล์ของฟันเฟืองสูงขึ้น การมอดูเลตสัญญาณการสั่นสะเทือนจากการหมุนและความคลาดเคลื่อนโปรไฟล์ จะรุนแรงขึ้น จึงทำให้แถบความถี่ข้างซึ่งมีระยะห่างความถี่เท่ากับความเร็วรอบของเฟืองที่เยื้องศูนย์มีระดับแอมพลิจูดสูงขึ้น ค่ายอดสัญญาณ $1/RPM$ ในโดเมนคิวเฟรนซีเป็นตัวแทนของแถบความถี่ข้าง ดังนั้นค่ายอดสัญญาณ $1/RPM$ จึงสัมพันธ์กับปัญหาการเยื้องศูนย์

4. การทดลองและการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน [4]

ทดลองวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีปัญหาการเยื้องศูนย์ของเฟือง โดยออกแบบให้เฟืองตัวขับมีระยะเยื้องศูนย์ 4 ระดับ ตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและวิเคราะห์สเปกตรัมและซีสต์ริ่ม

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

ชุดทดลองประกอบด้วย ชุดเฟือง มอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า คัปปลิง (coupling) เฟลาขับ เฟลาตาม แบริ่งลูกปืน 4 ตำแหน่ง ชุดเบรกที่สามารถปรับแรงดึงได้ พัดลมระบายความร้อนที่ ชุดเบรก ฐานของชุดทดลอง อินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ และมีมอเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า ระหว่างฐานของชุดทดลองกับพื้นได้ เสริมยางแผ่นที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตรเพื่อให้ฐานสัมผัสกับพื้นตลอดเวลา เฟืองขับทำด้วยเหล็กกล้ามี 26 ฟัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิทซ์ 91 มิลลิเมตร และมีความหนา 12 มิลลิเมตร เฟืองตามทำจากเหล็กกล้ามี 38 ฟัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิทซ์ 133 มิลลิเมตร และมีความหนา 13 มิลลิเมตร เฟืองทั้งสองเป็นเฟืองตรง โมดูล 3.5 มิลลิเมตร เฟืองขับถูกออกแบบให้มีรูสำหรับใส่บุช (bush) เพื่อเปลี่ยนระดับการเยื้องศูนย์ของเฟืองขับได้ บุชประกอบเข้ากับเฟลาขับและเฟืองขับ บุชมี 4 ชิ้นแต่ละชิ้นเจาะรูให้มีระยะเยื้องศูนย์ต่างกัน แผนภาพของชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 1

อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนประกอบด้วย ตัวตรวจวัดความเร่ง (accelerometer) รุ่น 4371 ซึ่งถูกจับยึดกับตำแหน่งวัดด้วยแม่เหล็ก เครื่องขยายประจุ (Charge Amplifier) รุ่น 2635 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) รุ่น 2035 อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณทุกอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Bruel&Kjaer ผังการต่ออุปกรณ์วัดสัญญาณแสดงในรูปที่ 2

4.2 การทดลอง

ชุดเฟืองทำงานด้วยการขับของมอเตอร์และรับภาระจากชุดเบรกซึ่งสามารถปรับแรงดึงได้ ขณะที่ชุดเฟืองทำงาน มีการหล่อลื่นฟันเฟืองด้วยจาระบีตลอดเวลา อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่จ่ายไฟให้มอเตอร์และควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ การทดลองแบ่งเป็น 3 ชุด การทดลองแต่ละชุดมีสภาวะการทำงานต่างกัน และให้เฟืองขับมีระยะเยื้องศูนย์ 4 ระดับ ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่แบร์ริง 1 แบร์ริง 2 แบร์ริง 3 และแบร์ริง 4 ในทิศแนวตั้งและแนวนอน การตรวจวัดสัญญาณในแต่ละจุดวัดทำการเก็บทั้งหมด 6 สัญญาณ

การทดลองในชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ชุดเฟืองรับภาระจากเบรก และมีความเร็วรอบหมุนต่างกัน การควบคุมกระแสไฟและความเร็วรอบหมุนต้องปรับแรงดึงของเบรกและการจ่ายกระแสไฟของอินเวอร์เตอร์ควบคู่กัน สำหรับการทดลองในชุดที่ 3 ชุดเฟืองไม่รับภาระจากเบรก แต่ควบคุมเฉพาะความเร็วรอบด้วยการปรับการจ่ายกระแสไฟของอินเวอร์เตอร์เท่านั้น

4.3 การวิเคราะห์สัญญาณ

แต่ละจุดวัด ทำการเก็บสัญญาณทั้งหมด 6 สัญญาณ แต่ละสัญญาณที่ตรวจวัดได้ถูกเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ 10 ครั้งและใช้การเฉลี่ย

แบบเหลื่อมกัน (overlap) มากที่สุด การเก็บสัญญาณแต่ละครั้งนาน 1.0 วินาที 0.5 วินาที และ 2.0 วินาทีสำหรับการทดลองชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ตามลำดับ แล้วนำสัญญาณมาวิเคราะห์สเปกตรัมและเซปส์ตรัมโดยใช้พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สัญญาณดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

เนื่องจากมีข้อมูลปรากฏในสเปกตรัมและเซปส์ตรัมจำนวนมาก จึงทำการวิเคราะห์เฉพาะพารามิเตอร์ที่สำคัญ ค่าสัญญาณต่างๆ ที่วิเคราะห์บนโดเมนเวลา โดเมนความถี่ และโดเมนคิวเฟรนซ์ มีดังนี้

- (1) โดเมนเวลา
 - Peak คือยอดสูงสุด (peak) ของสัญญาณ
 - RMS คือรากที่สองของค่ากำลังสองเฉลี่ย (root mean square) ของสัญญาณ
- (2) โดเมนความถี่
 - P คือแอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่เท่ากับความเร็วรอบหมุนของเฟืองขับ
 - G คือแอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่เท่ากับความเร็วรอบหมุนของเฟืองตาม
 - 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF คือแอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่การขบของฟันเฟือง ฮาร์มอนิกอันดับที่สองและอันดับที่สามของความถี่การขบของเฟืองตามลำดับ
 - SBD-P คือ ค่าแอมพลิจูดเฉลี่ยของยอดแถบความถี่ข้าง ข้างซ้ายและข้างขวาของยอดสเปกตรัม 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความเร็วรอบของเฟืองขับ
 - SBD-G คือ ค่าแอมพลิจูดเฉลี่ยของยอดแถบความถี่ข้าง ข้างซ้ายและข้างขวาของยอดสเปกตรัม 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความเร็วรอบของเฟืองตาม
- (3) โดเมนคิวเฟรนซ์
 - $1/P$ คือ ค่าแกมมาจุดของยอดเซปส์ตรัมที่คิวเฟรนซ์เท่ากับ $1/(\text{ความเร็วรอบหมุนของเฟืองขับ})$
 - $1/G$ คือ ค่าแกมมาจุดของยอดเซปส์ตรัมที่คิวเฟรนซ์เท่ากับ $1/(\text{ความเร็วรอบหมุนของเฟืองตาม})$

5. ผลการทดลอง

ผลการทดลองมีทั้งหมด 3 ชุดคือชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ผลการทดลองแต่ละชุดแสดงโดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณกับระยะเยื้องศูนย์ของเฟืองขับ การทดลองแต่ละชุด ได้แปรเปลี่ยนระยะเยื้องศูนย์ของเฟืองขับทั้งหมด 4 ระดับ ที่ระยะเยื้องศูนย์ระดับหนึ่งๆ สัญญาณถูกตรวจวัดทั้งหมด 8 จุดวัด คือที่แบร์ริง 1 แบร์ริง 2 แบร์ริง 3 และแบร์ริง 4 ในทิศแนวตั้งและแนวนอน โดยที่แต่ละจุดวัดทำการเก็บสัญญาณทั้งหมด 6 สัญญาณ ดังนั้นสำหรับการทดลองแต่ละชุด ที่จุดวัดหนึ่งๆ ได้ตรวจวัดสัญญาณทั้งหมด $4 \times 6 = 24$ สัญญาณ

เนื่องจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้ที่แต่ละแบร์ริงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณสอดคล้องกัน ผลการทดลองจึงแสดงเฉพาะการวิเคราะห์สัญญาณที่ตรวจวัดได้ที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้งและทิศแนวนอน กราฟดังกล่าวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณกับระยะเยื้องศูนย์

ของเฟืองขับ โดยนำค่าสัญญาณซึ่งวิเคราะห์จากสัญญาณที่เก็บได้ทั้งหมด 24 สัญญาณแสดงไว้ในกราฟ

รูปที่ 3 4 และ 5 คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณกับระยะเยื้องศูนย์ของเฟืองขับสำหรับการทดลองชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ตามลำดับ กราฟมีแกนตั้งเป็นค่าสัญญาณบนสเกลลอการิทึมและแกนนอนเป็นระยะเยื้องศูนย์ของเฟืองขับ กราฟประกอบด้วยจุดแสดงค่าสัญญาณและเส้นโค้งแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณเมื่อระยะเยื้องศูนย์ของเฟืองขับมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณบนโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ 6 dB เทียบได้กับ 2 เท่า ส่วนรูปที่ 6 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมและเซปส์ตรัมของสัญญาณ ซึ่งตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้งและแนวนอนสำหรับการทดลองชุดที่ 3

6. อภิปรายผลการทดลอง

ชุดเฟืองที่มีปัญหาการเยื้องศูนย์ของเฟือง จะให้สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ประกอบด้วย ชุดฮาร์มอนิกของ GMF ความถี่การหมุนของเฟืองที่เยื้องศูนย์ และชุดแถบความถี่ข้างที่มีระยะห่างความถี่เท่ากับความเร็วรอบหมุนของเฟืองที่เยื้องศูนย์ เมื่อชุดเฟืองมีปัญหาการเยื้องศูนย์มากขึ้น ความถี่การหมุนจะมีแอมพลิจูดสูงขึ้น และแถบความถี่ข้างจะมีแอมพลิจูดสูงขึ้น [2] และ [5]

จากผลการทดลอง สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนประกอบด้วยยอดสเปกตรัม 1xGMF 2xGMF 3xGMF และแถบความถี่ข้าง เมื่อเฟืองขับเยื้องศูนย์มากขึ้น แถบความถี่ข้างมีแอมพลิจูดสูงขึ้น และมีจำนวนยอดแถบความถี่ข้างที่สังเกตเห็นมีมากขึ้น แต่ไม่สามารถเปรียบเทียบได้ว่าสเปกตรัมรูปไหนเป็นสเปกตรัมของชุดเฟืองที่มีระยะเยื้องศูนย์ของเฟืองขับมากกว่ากัน

ค่าสัญญาณ SBD-P ที่ได้จากการทดลองไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเฟืองขับเยื้องศูนย์มากขึ้น น่าจะเป็นเพราะว่า เมื่อชุดเฟืองมีการเยื้องศูนย์มากขึ้น การมอดูเลตแอมพลิจูดมีแนวโน้มรุนแรงขึ้น แถบความถี่ข้างโดยรวมมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่การกระจายแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างมีลักษณะไม่สม่ำเสมอเฉพาะยอดโดยยอดหนึ่ง การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของยอดแถบความถี่ข้างเพียงยอดโดยยอดหนึ่งอาจจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สอดคล้องกับระยะเยื้องศูนย์ที่เพิ่มขึ้น

การสั่นสะเทือนที่เกิดจากมวลเยื้องศูนย์หมุนรอบแกนเพลลาจะให้อยอดสเปกตรัมที่ความถี่เท่ากับความเร็วรอบของการหมุนของมวล โดยที่ขนาดแอมพลิจูดจะเป็นสัดส่วนกับ ระยะเยื้อง ขนาดมวล และความเร็วรอบหมุน ในกรณีที่เฟืองเยื้องศูนย์ ก็เปรียบได้กับมวลของเฟืองหมุนเยื้องศูนย์กับแกนเพลลา ดังนั้นการสั่นสะเทือนจะให้อยอดสัญญาณที่ความถี่การหมุนของเฟืองที่เยื้องศูนย์ด้วย แต่จากผลการทดลอง ยอด P ซึ่งเป็นยอดสเปกตรัมที่ความถี่การหมุนของเฟืองขับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเฟืองขับเยื้องศูนย์มากขึ้น เฉพาะผลในการทดลองชุดที่ 2 เท่านั้น ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะว่า ที่ความเร็วรอบหมุนต่ำ การเยื้องศูนย์ของเฟืองมีผลน้อย และสาเหตุที่ค่าสัญญาณ P ของสัญญาณที่ตรวจวัดในทิศแนวนอนมีแอมพลิจูดสูงกว่าที่ตรวจวัดในแนวตั้ง น่าจะเป็นเพราะว่าความแข็งแรงของระบบในแนวนอนมีน้อยกว่าความแข็งแรงของระบบในแนวตั้ง

