

การออกแบบระบบควบคุมแม่เหล็กแบบกระตุ้นและการประยุกต์ใช้งาน



นายนิติศักดิ์ หนูมาน้อย

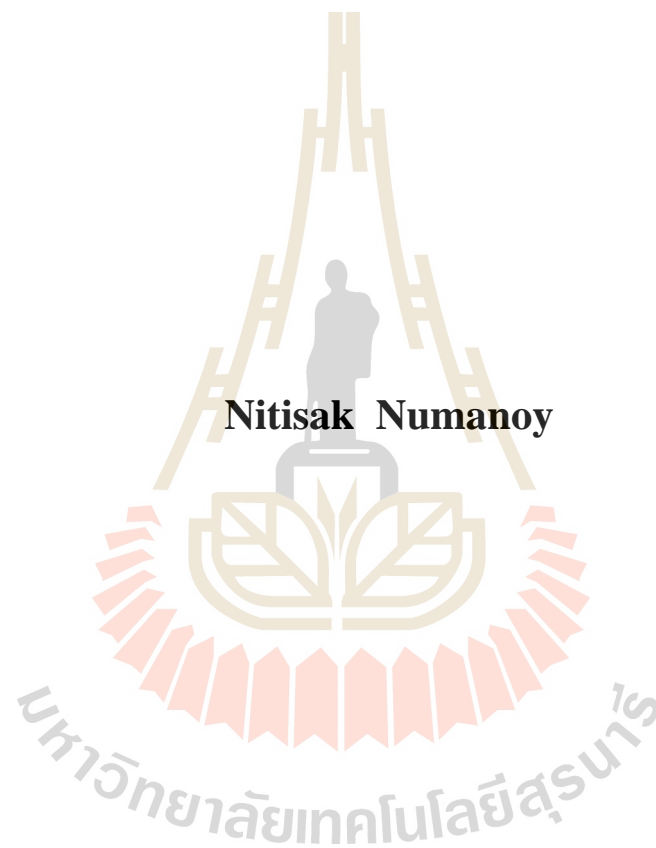
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2562

**CONTROL SYSTEM DESIGN OF ACTIVE MAGNETIC
BEARING AND ITS APPLICATION**



Nitisak Numanoy

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

การออกแบบระบบควบคุมเบร็ลงแม่เหล็กแบบกระตุ้นและการประยุกต์ใช้งาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(รศ. ดร.รัชทิน จันทรเจริญ)

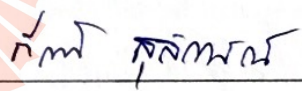
ประธานกรรมการ


(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสรีอุดม)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

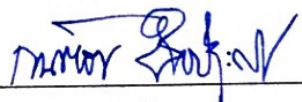
กรรมการ


(ผศ. ดร.กิริติ สุลักษณ์)

กรรมการ


(ผศ. ดร.ชโลธร ธรรมแท้)

กรรมการ


(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล


(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นิติศักดิ์ หนูมาน้อย : การออกแบบระบบควบคุมแม่เหล็กแบบกระตุ้นและการประยุกต์ใช้งาน (CONTROL SYSTEM DESIGN OF ACTIVE MAGNETIC BEARING AND ITS APPLICATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 120 หน้า.

ระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น มีข้อได้เปรียบกว่าแม่เหล็กทั่วไป อาทิ การทำงานที่ไม่มี การสึกหรอทางกล การเสียดทานต่ำ การบำรุงรักษาน้อย และไม่มีมลพิษจากสารหล่อลื่น อย่างไรก็ตาม ยังมีค่าใช้จ่ายในการซื้อที่สูงเมื่อเทียบกับแม่เหล็กทั่วไป วงเปิดของระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้นนั้นไม่มีเสถียรภาพ และไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่รองรับด้วยระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้นมีความเกี่ยวโยงกัน ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ และการหมุนรอบศูนย์กลางทางเรขาคณิตของโรเตอร์ ดังนั้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี ที่มีลำดับการวางขั้วของระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น ในแนวรัศมีแบบ 8 ขั้ว ได้ถูกออกแบบสำหรับช่องว่างอากาศ 1 มิลลิเมตร และสอบเทียบเพื่อระบุความเป็นเชิงเส้นที่สามารถรองรับน้ำหนักได้สูงสุด 198 นิวตัน การทดสอบได้ดำเนินการบนการตอบสนองที่หมุนด้วยความเร็วรอบไม่เกิน 60 เฮิร์ต (3,600 รอบต่อ นาที) ที่ได้จากฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ เพื่ออธิบายระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นจากการทดสอบ โมดอล แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์กับรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม และแผนภาพความเร็ว สำหรับการออกแบบควบคุมแบบแยกอิสระได้ใช้ความสัมพันธ์ทางกายภาพ และปรากฏการณ์ของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่น เพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดี และตัวชดเชยการรบกวนฮาร์โมนิก ผลการทดสอบสามารถจัดการกระตุ้นการรบกวนฮาร์โมนิกของวงโคจรเพลลาได้ โดยใช้สัญญาณการชดเชยจากการควบคุมแยกอิสระ ทำให้ที่ความถี่สั้นพ้องมีการสั่นสะเทือนเฉลี่ยของการกระจัดลดลงประมาณ 60 – 83% และพฤติกรรมของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีได้ถูกวินิจฉัยด้วยรูปแบบวงโคจร และรูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน ภายใต้การทำงานจริงของระบบ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา



ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา



NITISAK NUMANOY : CONTROL SYSTEM DESIGN OF ACTIVE
MAGNETIC BEARING AND ITS APPLICATION. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D., 120 PP.

ACTIVE MAGNETIC BEARING/ DECOUPLING SYSTEM/
DECOUPLING CONTROL/ PID WITH HDC CONTROLLER

Active magnetic bearing systems (AMBSs) possess several advantages over conventional bearing, such as operation with no mechanical wear, low friction, less maintenance, and the absence of pollution by lubrication. However, the costs of purchase are several times higher compared with conventional bearings, and the open loop of an AMBS is an instability and nonlinearity. Further, the motions of rotor-AMBS are coupled from the translation and rotation of the geometric center of the rotor. The objective of this research is to design, build and test an overhung rotor supported by the radial AMBS. The pole polarization sequence of a radial AMBS on the order of 8 pole was designed for 1 millimeter of air-gap. The calibration results have been used to identify the linearization from which a load capacity of up to 198 N can be produced. An experimental test was conducted on the response to run under rotating speed 60 Hz (3,600 RPM), using a frequency response function (FRF) approach and a description of the overhung rotor from modal testing, finite element analysis model with genetic algorithm (FEM-GA) and waterfall diagrams. The decoupling control system was achieved using the relative geometry and phenomenon of an overhung rotor, which has been used to design a PID controller and harmonic disturbance compensator (HDC). The experimental results can be removed the harmonic disturbance excitation of the shaft orbit using compensation signals from

decoupling control. In case of the resonance frequencies, the average vibration of the displacements was achieved a reduction of about 60–83%, and the behaviors of overhung rotor supported by a radial AMBS symptoms were investigated by the orbital patterns and operating deflection shapes (ODSs) under the real operating system.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature

Atmanay Ni

Advisor's Signature

Santipol J.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการวิจัย และคอยเคียงข้างผู้วิจัยจนทำให้สามารถก้าวผ่านอุปสรรคต่าง ๆ ได้อย่างภาคภูมิใจ ตลอดจนยังเป็นแบบอย่างที่ดีให้แก่ผู้วิจัย ในด้านการสอน การวิจัย การดำรงชีวิต และการอุทิศตนต่อสังคม ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง และจักได้นำไปเป็นแบบอย่างในการทำงานและการดำรงชีวิต ในภายภาคหน้าต่อไป

กราบขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กীরติ สุกฤษณ์ และดร.ชโลธร ธรรมแท้ รวมถึงรองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทรเจริญ ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ซึ่งผู้วิจัยขอระลึกไว้ตลอดไป

ขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนร่วมกับบริษัท วมณีสุรณัฏ์ กรุ๊ป จำกัด ในโครงการพัฒนานักวิจัย และงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ที่ให้ศึกษานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอักษรวิทยา คุณสายฝน สิบพลกรัง และเจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านเอกสารต่าง ๆ

- ดร.พีจิราภรณ์ เวียงจันดา พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ สมาชิกในกลุ่มวิจัย System and Control Engineering Laboratory (SCE) ที่ให้คำแนะนำ กำลังใจ และช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอขอบพระคุณ คุณพ่อปัญญา และสมาชิกครอบครัวหุนมาน้อย และครอบครัวรักเมืองทุกท่าน ที่ได้ให้กำเนิดและอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความเอาใจใส่ และให้โอกาสทางการศึกษา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

นิติศักดิ์ หุนมาน้อย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย และขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์	4
2 ปรัชญาบรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 หลักการ และคุณสมบัติของแม่เหล็กไฟฟ้า.....	5
2.2 ระบบหนึ่งองศาอิสระ	9
2.3 ระบบหลายองศาอิสระที่ไม่มีความหน่วง	12
2.4 ผลการตอบสนองของระบบภายใต้การสั่นแบบบังคับที่ไม่มีความหน่วง.....	17
2.5 ผลการตอบสนองของระบบภายใต้การสั่นแบบบังคับที่มีความหน่วง.....	20
2.6 พลศาสตร์ของโรเตอร์.....	22
2.7 พลศาสตร์อิมเพคต์ของเพลา.....	24
2.8 การค้นหาด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม.....	28
2.9 ตัวควบคุมพีไอดี	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.10	พื้นฐานตัวกรอง.....	31
2.11	การวินิจฉัยรูปรางวงโคจร.....	32
2.12	เทคนิครูปรางการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน.....	33
2.12.1	การเก็บข้อมูลในการพิจารณาแบบจุดเดียว.....	34
2.12.2	การเก็บข้อมูลในการพิจารณาแบบหลายจุดวัด.....	35
2.13	ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	36
2.13.1	ความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น.....	37
2.13.2	ตัวควบคุมของระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็ก.....	38
2.13.3	การวินิจฉัยด้วยรูปรางการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน.....	41
3	ระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี.....	43
3.1	ระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี.....	43
3.2	ข้อกำหนด และกายภาพของระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี.....	45
3.3	การสอบเทียบกำลังขับเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น.....	49
3.4	การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดการกระจัด.....	51
3.5	ความเป็นเชิงเส้นของแรงลัพธ์ระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น.....	53
3.5.1	การกระจัดในช่องว่างอากาศ n คงที่ (1 มิลลิเมตร).....	54
3.5.2	กระแสควบคุม i_n คงที่.....	56
4	พฤติกรรมของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี.....	58
4.1	การทดสอบ โมดอล.....	58
4.2	ขั้นตอนการทดสอบ โมดอล.....	61
4.3	แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์.....	68
5	ออกแบบ และทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีด้วยการควบคุมแบบแยกอิสระ.....	78
5.1	พลศาสตร์แบบจำลองของระบบควบคุมแบบแยกอิสระ.....	78

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 วิเคราะห์เสถียรภาพการควบคุมแบบแยกอิสระ	83
5.3 ออกแบบตัวควบคุมแบบแยกอิสระพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี	86
5.4 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบแยกอิสระ	89
5.4.1 การวิเคราะห์ความถี่สั้นพ้องด้วยวิธีแผนภาพความเร็ว	89
5.4.2 ประสิทธิภาพในการควบคุมวงโคจรของตัวควบคุม พีไอดีร่วมกับเฮชดีซี	93
5.4.3 การวินิจฉัยรูปร่างวงโคจรในการควบคุมแบบแยกอิสระ	95
6 การวิเคราะห์การสั่นด้วยเทคนิครูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน	99
6.1 ขั้นตอนการเก็บค่าบนโดเมนเวลา	99
6.2 การวิเคราะห์ผลการสั่นด้วยเทคนิครูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน	101
7 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	109
รายการอ้างอิง	114
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รหัสคำสั่งการระบุเอกลักษณ์หาค่าตัวแปรแบบจำลอง ไฟไนต์อิลิเมนต์	115
ก.1 รหัสคำสั่งหลัก	116
ก.2 รหัสคำสั่งย่อย	117
ประวัติผู้เขียน	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี..... 30
2.2	ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองประเภทต่าง ๆ..... 31
2.3	เปรียบเทียบสาเหตุปัญหาการสั่นกับรูปร่างวงโคจร 33
2.4	งานวิจัยเกี่ยวกับความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 37
2.4	งานวิจัยเกี่ยวกับความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น (ต่อ)..... 38
2.5	งานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมของระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็ก 38
2.5	งานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมของระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็ก (ต่อ)..... 39
2.5	งานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมของระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็ก (ต่อ)..... 40
2.5	งานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมของระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็ก (ต่อ)..... 41
2.6	งานวิจัยเกี่ยวกับการวินิจฉัยด้วยรูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน 41
3.1	ข้อกำหนดในการออกแบบระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น..... 48
3.2	พารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางกายภาพที่ได้จากการออกแบบ..... 49
3.3	ค่าลักษณะเฉพาะของบอร์ดขับเคลื่อน และเซ็นเซอร์วัดการกระจัด..... 49
3.4	ค่าลักษณะเฉพาะของระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี..... 57
4.1	ค่าลักษณะเฉพาะของเครื่องมือ และอุปกรณ์ทดสอบ โมดอล 62
4.2	อิลิเมนต์ ขนาด พิกัดของโรเตอร์เบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นด้านเดียว 62
4.3	ผลจากการทดสอบ โมดอลของแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ 67
4.4	ข้อกำหนดกลยุทธ์วิวัฒนาการในการค้นหาคำตอบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม 73
4.5	ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองไฟต์ในอิลิเมนต์-จีเอกับการทดสอบ (แบบจำลองที่ 1)..... 74
4.6	ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองไฟต์ในอิลิเมนต์-จีเอกับการทดสอบ (แบบจำลองที่ 2)..... 75
4.7	ค่าตัวแปรการระบุเอกลักษณ์จากแบบจำลองไฟต์ในอิลิเมนต์-จีเอ..... 75
4.8	ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองไฟต์ในอิลิเมนต์-จีเอกับการทดสอบ (แบบจำลองที่ 3)..... 77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9	ค่าแปรการระบุนอกลักษณะจากแบบจำลองไฟในศัลลิเมนต์-จีเอ (แบบจำลองที่ 3)..... 77
5.1	ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ 79
5.2	ผลจากการตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีแผนภาพความเร็ว 91
5.3	เปอร์เซ็นต์ขนาดการสั่นที่ลดลงของแต่ละจุด..... 95
6.1	จุดวิกฤตที่มีสัมพันธ์กับอุปกรณ์ของระบบ..... 101



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วงจรพื้นฐานของเบริงแม่เหล็ก	7
2.2	แบบจำลองอย่างง่ายของระบบหนึ่งองศาอิสระ	9
2.3	ลักษณะเฉพาะของระบบความหน่วงต่ำ (a) การสั่นแบบอิสระบนโดเมนเวลา (b) การสั่นแบบบังคับบนโดเมนความถี่	11
2.4	แผนภาพ 3 มิติ ของระบบ (a) หนึ่งองศาอิสระ (b) หลายองศาอิสระ	12
2.5	การกำหนดพิกัดตำแหน่งในการพิจารณาอิลิเมนต์ของเพลลา	24
2.6	ระบบวงปิด (a) ตัวควบคุมพีไอดี และ (b) ผลการตอบสนองในโดเมนเวลา.....	30
2.7	แสดงคุณสมบัติของฟังก์ชันการตอบสนองเชิงขนาดเมื่อใช้ตัวกรองน็อคซ์.....	32
2.8	ตัวอย่างการจำลองการวัดแบบจุดเดียว.....	34
2.9	ตัวอย่างการวัดแบบหลายจุดของปล่องลมระบายความร้อนขนาดใหญ่.....	35
3.1	ลักษณะการขับเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี	45
3.2	แผนภาพ (a) ข้อกำหนดขนาดในการออกแบบ (b) ภาพตัดสามมิติ และ (c) ภาพถ่ายเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นที่ได้ออกแบบ	47
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุมกับค่ากระแสที่ป้อนให้กับแกนขั้ว.....	51
3.4	การติดตั้งเพื่อสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดการกระจัดแบบไม่สัมผัสทั้งสองทิศทาง.....	52
3.5	ผลการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดการกระจัดในช่องว่างอากาศ	53
3.6	การติดตั้งอุปกรณ์การสอบเทียบแรงลัพท์เบริงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวนอน.....	54
3.7	การติดตั้งอุปกรณ์การสอบเทียบแรงลัพท์เบริงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวตั้ง	55
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงลัพท์เบริงแม่เหล็กไฟฟ้ากับกระแสควบคุม.....	55
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสควบคุมกับการกระจัดในช่องว่างอากาศ ภายในเบริงแม่เหล็กไฟฟ้า	56
4.1	แผนภาพความสัมพันธ์ของโดเมนความถี่ และ โดเมน โมดอล	59
4.2	ความสัมพันธ์ (a) คุณสมบัติวงกลม โมดอลที่ความถี่ และ (b) วิธีการแอมพลิจูดสูงสุด	60
4.3	สัญญาณ (a) การกระตุ้น (b) ผลการตอบสนอง.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	การติดตั้งอุปกรณ์ และตำแหน่ง โหนดของแบบจำลองที่ (a) 1 และ (b) 2 64
4.5	การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ โมดูลของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายขึ้น ด้วยเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี (แบบจำลองที่ 3)..... 64
4.6	การตอบสนองเชิงความถี่จากการทดสอบ โมดูลของแบบจำลองที่ 1 65
4.7	การตอบสนองเชิงความถี่จากการทดสอบ โมดูลของแบบจำลองที่ 2 65
4.8	รูปร่างโหมคต่าง ๆ จากการทดสอบ โมดูลของแบบจำลองที่ (a) 1 และ (b) 2 66
4.9	การตอบสนองเชิงความถี่จากการทดสอบ โมดูลของระบบเบริงแม่เหล็ก ไฟฟ้าด้านเดียวแบบปลายขึ้น (แบบจำลองที่ 3)..... 66
4.10	รูปร่างที่ความถี่ต่าง ๆ จากการทดสอบ โมดูลของแบบจำลองที่ 3 67
4.11	แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ และตำแหน่ง โหนดของระบบเบริงแม่เหล็ก ไฟฟ้าด้านเดียวแบบปลายขึ้นของแต่ละแบบจำลอง 72
4.12	ไดอะแกรมอัลกอริทึมการค้นหาด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์-จีเอ 74
4.13	รูปร่างสามความถี่แรกจากไฟไนต์อีลิเมนต์-จีเอ แบบจำลองที่ (a) 1 และ (b) 2..... 76
4.14	รูปร่างห้าความถี่แรกจากไฟไนต์อีลิเมนต์-จีเอ ของแบบจำลองที่ 3 76
5.1	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งต่าง ๆ กับแรงกระทำของชุดทดสอบ 80
5.2	แผนภาพเสถียรภาพของอัตราขยาย g_p และ g_d 85
5.3	ไดอะแกรมตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี 87
5.4	การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบรองรับด้านเดียวแบบปลายขึ้นด้วยเบริงแม่เหล็ก แบบกระตุ้นในแนวรัศมี..... 90
5.5	ความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นที่ตำแหน่งเบริงทั่วไปเทียบกับความเร็วรอบ 91
5.6	แผนภาพวอเตอร์พอลลที่ตำแหน่งเบริงทั่วไป..... 92
5.7	การเปรียบเทียบการสั่นของทั้งสองตัวควบคุมที่ตำแหน่งเบริงแม่เหล็ก..... 92
5.8	แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจรของ (a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี (b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี ที่ตำแหน่งเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น..... 93
5.9	การเปรียบเทียบกระแสควบคุมในแต่ละทิศทางของตัวควบคุมพีไอดี ร่วมกับเฮชดีซี 94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10	การเปรียบเทียบกระแสควบคุมในแต่ละทิศทางของตัวควบคุมพีไอดี 94
5.11	แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจร เมื่อมีการควบคุม ณ จุดวัดที่ความถี่ 23.5 เฮิร์ต ของ (a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีและ (b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี 95
5.12	แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจร เมื่อมีการควบคุม ณ จุดวัดที่ความถี่ 35 เฮิร์ต ของ (a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีและ (b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี 96
5.13	แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจร เมื่อมีการควบคุม ณ จุดวัดที่ความถี่ 37.2 เฮิร์ต ของ (a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีและ (b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี 96
5.14	แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจรเมื่อมีการควบคุม ณ จุดวัดที่ความถี่ 50.3 เฮิร์ต ของ (a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีและ (b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี 97
5.15	แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจรเมื่อมีการควบคุม ณ จุดวัดที่ความถี่ 60 เฮิร์ต ของ (a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีและ (b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี 98
6.1	ขั้นตอนเก็บค่าด้วยเทคนิคการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานบนโดเมนเวลา..... 100
6.2	เฟรมภาพหนึ่งรูปร่างการเบี่ยงเบนสูงสุดเปรียบเทียบตัวควบคุม ที่ความถี่ 23.5 เฮิร์ต 102
6.3	เฟรมภาพหนึ่งรูปร่างการเบี่ยงเบนสูงสุดเปรียบเทียบตัวควบคุม ที่ความถี่ 35 เฮิร์ต 103
6.4	เฟรมภาพหนึ่งรูปร่างการเบี่ยงเบนสูงสุดเปรียบเทียบตัวควบคุม ที่ความถี่ 37.2 เฮิร์ต 104
6.5	เฟรมภาพหนึ่งรูปร่างการเบี่ยงเบนสูงสุดเปรียบเทียบตัวควบคุม ที่ความถี่ 50.3 เฮิร์ต 105
6.6	เฟรมภาพหนึ่งรูปร่างการเบี่ยงเบนสูงสุดเปรียบเทียบตัวควบคุม ที่ความถี่ 60 เฮิร์ต 106

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A, \mathbf{A}	=	พื้นที่ หรือพื้นที่ตั้งฉากใด ๆ
\mathbf{B}	=	เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก
c, \mathbf{C}	=	ตัวนำ หรือเมทริกซ์ตัวนำของระบบ
e	=	ระยะเยื้องความไม่สมดุล
E	=	โมดูลัส
E^k	=	พลังงานจลน์
E^p	=	พลังงานศักย์
f, \mathbf{f}	=	แรง หรือเวกเตอร์ของแรงกระทำใด ๆ
FEM	=	วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method)
FFT	=	การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (fast fourier transform)
FRF	=	ฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response function)
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
g_{\dots}	=	ค่าอัตราขยาย
GA	=	รหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm)
\mathbf{H}	=	สนามแม่เหล็ก (magnetic field)
HDC	=	ตัวชดเชยการรบกวนฮาร์โมนิกส์ (harmonic disturbance compensator)
i	=	กระแสที่ไหลผ่านขดลวด
i_n	=	กระแสความถี่ในทิศทาง n
I	=	โมเมนต์เฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด
I_p	=	โมเมนต์เฉื่อยมวลเชิงขั้ว
I_t	=	โมเมนต์เฉื่อยมวลตามขวาง
k, \mathbf{K}	=	ความแข็ง หรือเมทริกซ์ความแข็งของสปริงของระบบ
k_i	=	ค่าความแข็งแรงกระแสด
k_n	=	ค่าความแข็งแรงการกระจัดในทิศทาง n
l	=	ความยาว หรือระยะใด ๆ
L_0	=	การเหนี่ยวนำไฟฟ้า

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

L_e	=	ความยาวอิทธิเมนต์
m, \mathbf{M}	=	มวล หรือเมทริกซ์มวลของระบบ
MBS	=	ระบบแบริ่งแม่เหล็ก (magnetic bearing system)
MDOF	=	มากกว่าหนึ่งองศาอิสระ (multi degree of freedom)
n	=	ช่องว่างอากาศ หรือแทนทิศทางในแนวรัศมี (ทิศทาง y หรือ z)
N	=	จำนวนรอบของการพันขดลวด
ODS	=	เทคนิครูปร่างการเบี่ยงเบนขณะทำงาน (operating deflection shape)
PID	=	ตัวควบคุมพีไอดี (proportional-integral-derivative controller)
q, \mathbf{q}	=	พิกัดทั่วไป หรือเวกเตอร์พิกัดทั่วไป
Q	=	ประจุไฟฟ้า
s_l	=	ความยาวเส้นปลั๊กซ์
SDOF	=	หนึ่งองศาอิสระ (single degree of freedom)
v	=	สัญญาณควบคุม
v_0	=	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
\mathbf{v}	=	เวกเตอร์ความเร็ว
w	=	ระยะ หรือขนาดใด ๆ
W	=	พลังงานสนามแม่เหล็กในช่องว่าง
y, z	=	การกระจัดในทิศทาง y และ z
δ	=	เปอร์เซ็นต์ความกว้างสัญญาณ (duty cycle)
ε	=	อัตราขยายของตัวขยายเชิงเส้น
ζ	=	อัตราส่วนความหน่วง
η	=	เฟสเลื่อน
μ	=	ความสามารถในการเป็นแม่เหล็ก (permeability)
μ_0	=	ความสามารถในการเป็นแม่เหล็กของอากาศ
μ_r	=	ความสามารถในการเป็นแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability)
ρ	=	ความหนาแน่น
ϕ, Θ	=	อิทธิเมนต์รูปร่างโหมคบรรทัดฐาน หรือเวกเตอร์รูปร่างโหมคบรรทัดฐาน
Φ	=	ฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Ψ, Ψ	=	อิลิเมนต์รูปร่างโหมด หรือเวกเตอร์รูปร่างโหมด
α	=	มุมของแกนเหล็กเทียบกับแนวดิ่ง
Ω	=	ความเร็วเชิงมุมรอบแกนเพลลา
ω	=	ความถี่ใด ๆ
ω_n	=	ความถี่ธรรมชาติระบบ
ω_d	=	ความถี่ธรรมชาติของระบบความหน่วง
\forall	=	ปริมาตรสนามแม่เหล็กในช่องว่าง

ตัวห้อย

0	=	ค่าเริ่มต้น
a	=	ช่องว่างอากาศ
b	=	แบร์ริงทั่วไป
d	=	ดิกส์
fe	=	แกนเหล็ก
fl	=	การเกี่ยวคล้อง (linkage)
lo	=	แรงลอเรนซ์
m	=	แม่เหล็กไฟฟ้า
n	=	แทนทิศทางในแนวรัศมี (ทิศทาง y หรือ z)
r	=	เทียบกับการเคลื่อนที่เชิงมุม
s	=	เพลลา หรือเซ็นเซอร์
t	=	เทียบกับการเคลื่อนที่เชิงเส้น

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

เครื่องจักรหมุน (rotating machines) เป็นอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนไหวยาวแบบหมุน ถูกเชื่อมต่อการทำงานเข้ากับต้นกำลังในการส่งถ่ายกำลังต่าง ๆ เช่น เพลา (shafi) ล้อช่วยแรง (flywheel) ส่วนหมุนหรือโรเตอร์ (rotor) และส่วนหยุดนิ่งหรือสเตเตอร์ (stator) ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในการออกแบบตัวรองรับหรือแบริ่ง (bearing) โดยใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรองรับพฤติกรรมของเพลา และทดแทนขีดจำกัดของแบริ่งที่ต้องใช้สารหล่อลื่น (lubricant) เป็นส่วนประกอบ เนื่องจากการหมุนที่ความเร็วรอบสูงจะทำให้อุณหภูมิสารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเปลี่ยนไป ส่งผลให้เครื่องจักรไม่สามารถทำงานได้ตรงตามเงื่อนไขที่ต้องการ

ในช่วง 40 ปีที่ผ่านมา ระบบแบริ่งแม่เหล็ก (magnetic bearing system หรือ MBS) ได้เข้ามา มีบทบาทสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรม ด้วยคุณสมบัติอันเป็นเอกลักษณ์ และยังเป็นทางเลือกใหม่ในการแก้ปัญหาระหว่างส่วนหมุนกับส่วนหยุดนิ่งของเครื่องจักรที่มีการหมุนด้วยความเร็วรอบสูง สำหรับการออกแบบระบบแบริ่งแม่เหล็กนั้น มีจุดประสงค์เพื่อลดข้อบกพร่องของแบริ่งทั่วไป (journal bearing หรือ ball bearing) และช่วยเพิ่มความหลากหลายในการใช้งาน มีข้อได้เปรียบที่เป็นประโยชน์สำคัญ คือการไม่สัมผัสระหว่างส่วนหมุนกับส่วนหยุดนิ่ง จึงไม่ใช้สารหล่อลื่นในระบบ ทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ช่วยยืดอายุการทำงานของเครื่องจักร อีกทั้งยังสามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิที่สูงได้ ทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ของเครื่องจักรอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปัม্পดูดเทอร์โบ ล้อช่วยแรง แต่อย่างไรก็ดี การควบคุมระบบแบริ่งแม่เหล็กยังมีความซับซ้อนในแง่ของการใช้งานจริง เช่น ความเป็นเชิงเส้นของสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดการรบกวนจากภายนอกได้ง่าย ความไม่มีเสถียรภาพของแบบจำลองรูปแบบการควบคุมกำลัง (power) ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก การออกแบบอัลกอริทึมในการควบคุม พฤติกรรมทางพลวัตของเครื่องจักรหมุน รวมถึงการติดตั้งระบบแบริ่งแม่เหล็กเข้ากับระบบหลักที่มีปัญหาแฝง ทำให้ไม่สามารถจัดการระบบให้ทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้ ด้วยเหตุนี้ การประยุกต์ใช้จึงจำกัดอยู่ในวงแคบ และมีราคาสูง นอกจากนี้ ความเชื่อมั่นในเสถียรภาพการทำงานของระบบ เป็นอีกเหตุผลในการตัดสินใจ ทำให้การนำระบบแบริ่งแม่เหล็กมาใช้งานไม่แพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย

ด้วยเหตุผลข้างต้น การสร้างแม่เหล็กกระทำ หรือบังคับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในระบบเบริงแม่เหล็ก สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงภาระกรรมแบบทันทีทันใดได้ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงพลวัตในการหมุนที่สัมพันธ์กับขนาด และความเร็วรอบ ทำให้การพิจารณาระบบเพื่อคาดการณ์ผลการตอบสนองเป็นสิ่งจำเป็น ปัจจุบันได้มีการนำเอาวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณซึ่งเป็นวิธีการคำนวณที่เรียกว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) มาอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบที่รองรับด้วยเบริงแม่เหล็ก ทำให้สามารถทราบถึงลักษณะการสั่นของระบบจากคุณลักษณะเฉพาะทางกายภาพของโครงสร้างมูลฐานที่ประกอบด้วย มวล ความแข็งแรง ความหน่วง รวมถึงเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ ที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) และรูปร่างโหมดการสั่น (mode shape) เพื่อให้สามารถจัดการกับแรงกระทำจากภายนอก และหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์การสั่นพ้อง (resonance) ได้ วิธีการนี้ยังได้รับความนิยม และมีประโยชน์อย่างมากในการช่วยออกแบบ และวิเคราะห์ระบบ แต่เนื่องจากความไม่แน่นอนเชิงเส้นของระบบ อุปกรณ์หรือโครงสร้างต่าง ๆ ความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ที่มีหลายพิกัด ทำให้ผลการตอบสนองที่ได้มีความคลาดเคลื่อน และเกิดข้อผิดพลาดในการวินิจฉัยได้ จึงจำเป็นต้องมีการพิสูจน์ทราบความถูกต้องกับการระบุเอกลักษณ์ของระบบจริง ด้วยวิธีการทดสอบ โมดอล (modal testing) แต่เนื่องจากทั้งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบ โมดอลไม่ได้นำพลวัตของแรงภายนอกที่กระทำจริงมาพิจารณา เป็นเพียงการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของระบบเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถอธิบาย และวินิจฉัยพฤติกรรมจากการทำงานจริงได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็กมาใช้เพื่อควบคุมวงโคจรการหมุนที่ความถี่สั่นพ้อง และลดการสั่นที่เกิดจากพลวัตของแรงภายนอกที่มากระทำ โดยออกแบบและสร้างระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีที่มีการรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นเป็นชุดทดสอบ ในการอธิบายพฤติกรรมการตอบสนอง ได้ใช้ผลการทดสอบ โมดอลของระบบรองรับมาพิสูจน์ทราบ และตรวจสอบเอกลักษณ์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการค้นหาตัวแปรของโครงสร้างมูลฐานด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรมหรือ จีเอ เพื่อกำหนดขอบเขตในการทดสอบ นอกจากนี้ ได้นำเสนอการลดความเกี่ยวข้องในการควบคุมระบบรองรับเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น ซึ่งใช้เงื่อนไขทางกายภาพในการลดรูปสมการทางพลวัตของระบบ เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบแยกอิสระตามแนวรัศมีในแต่ละทิศทาง รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับการชดเชยความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุน โดยใช้ขอบเขตการทดสอบการควบคุมแบบแยกอิสระ ที่ความถี่สั่นพ้องจากวิธีแผนภาพความเร็วในการควบคุมการหมุน อีกทั้งได้นำการวัดที่เรียกว่า เทคนิครูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน (operating deflection shape หรือ ODS) มาพิจารณาพฤติกรรมที่เกิดจากภาระกรรมจริงขณะทำงานของระบบรองรับในรูปแบบการ

เคลื่อนไหว (animation) ที่เห็นจุดวิกฤต และลักษณะรูปร่างการตัดโค้งของเพลากับโรเตอร์ ณ ระยะเวลาใด ๆ ภายใต้อัตนัยที่เพิ่มขึ้น เพื่อประกอบการวินิจฉัยสาเหตุการสั่นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อลดการนำเข้าเทคโนโลยีด้านการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมแม่เหล็กแบบกระตุ้น
2. เพื่อออกแบบ และสร้างชุดทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี
3. เพื่อออกแบบ และสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่สามารถควบคุมวงโคจรการหมุน
4. เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี โดยใช้เทคนิคการเปรียบเทียบขณะปฏิบัติงานในการวินิจฉัยลักษณะรูปร่างของเพลากับโรเตอร์

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น และขอบเขตของการวิจัย

1. ชุดทดสอบ เป็นชุดเพลากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 900 วัตต์ ที่ความเร็วรอบในการทดสอบไม่เกิน 3,600 รอบต่อนาที (60 เฮิร์ต) ซึ่งปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแม่เหล็กแบบทั่วไป และอีกด้านรองรับด้วยแม่เหล็กในแนวรัศมีแบบกระตุ้น 8 ขั้ว มีช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ของแม่เหล็กไม่เกิน 1 มิลลิเมตร
2. ระบบรองรับด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีที่มี 8 ขั้ว แบบขั้วต่าง (heteropolar) มีการลำดับขั้วเป็น (N-S)-(S-N)-(N-S)-(S-N) ด้วยการขับเคลื่อนขั้วแบบความแตกต่างในแนวรัศมี ที่แต่ละขั้วมีกำลังขั้วสูงสุดไม่เกิน 600 วัตต์ ที่ไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ 25 แอมป์
3. ใช้เทคนิคการเปรียบเทียบขณะปฏิบัติงานมาอธิบาย วิเคราะห์ และวินิจฉัยลักษณะการสั่นสะเทือนแบบที่สามารถสร้างรูปแบบการเคลื่อนไหวให้เห็นลักษณะรูปร่างการตัดโค้ง เพื่อให้ทราบพฤติกรรมของเพลากับโรเตอร์ขณะทำงานจริง
4. การเขียนโปรแกรม และการควบคุมเป็นแบบเวลาจริง โดยใช้การจำลองฮาร์ดแวร์ภายในคู่ปรวมกับระบบความจริงเสมือน ด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB ในส่วน Simulink ที่เชื่อมต่อกับบอร์ดสำเร็จรูป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้แบรีนแม่เหล็กแบบกระตุ้นในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย และลดการพึ่งพาเทคโนโลยีแบรีนแม่เหล็กแบบกระตุ้นจากต่างประเทศ
2. ได้ชุดทดสอบรองรับด้วยแบรีนแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบรองรับแบบปลายยื่นอิสระ
3. ได้ระบบควบคุมอัตโนมัติที่สามารถควบคุมพฤติกรรมของชุดทดสอบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบรีนแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี
4. เป็นแนวทางในการวินิจฉัยลักษณะการสั่นสะเทือนของระบบแบรีนแม่เหล็กแบบกระตุ้น ที่สามารถสร้างการเคลื่อนไหวให้เห็นลักษณะรูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานจริงได้

1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท 1 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 หลักการพื้นฐานที่เกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้า ระบบหนึ่งองศาอิสระ ไปสู่หลักการวิเคราะห์โมดอลในระบบหลายองศาอิสระ พลศาสตร์ของโรเตอร์ และอิลิเมนต์ของเพลลา การค้นหาคำตอบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม ตัวควบคุมพีไอดี พื้นฐานตัวกรอง และเทคนิคการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบรีนแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี ข้อกำหนด และกายภาพของระบบแบรีนแม่เหล็กในแนวรัศมีในการออกแบบ การสอบเทียบกำลังขับ และเซ็นเซอร์วัดการกระจัด รวมถึงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของแรงลัพท์แบรีนแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี

บทที่ 4 กล่าวถึงพฤติกรรมของรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบรีนแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี ทั้งการทดสอบโมดอล และวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ร่วมกับจีเอ พร้อมทั้งสรุปผล

บทที่ 5 กล่าวถึงพลศาสตร์ของแบบจำลองชุดทดสอบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบรีนแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีด้วยการควบคุมแบบแยกอิสระ เสถียรภาพตัวควบคุมพีไอดี และตัวชดเชยการรบกวน การตรวจวิเคราะห์ด้วยแผนภาพความเร็ว และสรุปผลการควบคุม

บทที่ 6 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานมาวินิจฉัย และสรุปผล

บทที่ 7 บทสรุป และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี จำเป็นต้องเข้าใจถึงหลักการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อใช้ในการออกแบบ และสร้างระบบแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี รวมถึงพื้นฐานของระบบทางกลหนึ่งองศาอิสระ (single degree of freedom หรือ SDOF) ในการพิจารณาพลวัตที่เกิดขึ้นบนโดเมนเวลา (time domain) และ โดเมนความถี่ (frequency domain) จากฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response function, FRF หรือ เอฟอาร์เอฟ) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในผลการตอบสนองเบื้องต้น หลังจากนั้นจึงขยายความไปสู่ระบบที่มีองศาอิสระมากกว่าหนึ่ง (multi degree of freedom หรือ MDOF) ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโมดอล (modal) โดยมุ่งเน้นที่ฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการทดสอบ โมดอล ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โมดอลเชิงการทดลอง เพื่อหาความสัมพันธ์จากคุณสมบัติที่แท้จริงของระบบ นอกจากนี้แล้ว หลักการที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์พลศาสตร์ของโรเตอร์ อิลิเมนต์เพลลา และการค้นหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อใช้สร้างแบบจำลองโดยประมาณที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ในการอธิบายถึงพฤติกรรมของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี ที่มีโรเตอร์ติดตั้งอยู่ที่ปลายได้ อีกทั้งเสถียรภาพในการควบคุมระบบแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น มีพื้นฐานมาจากตัวควบคุมพีไอดี ในการควบคุมผลการตอบสนองของวงโคจรการหมุน และได้นำเสนอการชดเชยความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุนด้วยตัวกรองความถี่ เพื่อใช้จัดการสั่นพ้องที่เกิดขึ้น รวมถึงการวิเคราะห์การสั่นด้วยเทคนิคการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน สามารถช่วยวินิจฉัยหาจุดวิกฤตของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี ที่เกิดจากภาระกรรมจริงขณะทำงานได้ ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 หลักการ และคุณสมบัติของแม่เหล็กไฟฟ้า

แรงลอเรนซ์ (Lorentz) เป็นแรงที่เกิดตั้งฉากกับความเร็ว \mathbf{v} การเปลี่ยนแปลงประจุ Q กับเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก \mathbf{B} ดังนี้

$$\mathbf{f}_{lo} = Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.1)$$

มีความหมายว่า ความหนาแน่นฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก มีหน่วย เทสลา (tesla) หรือ $N/A \cdot m$ นั่นคือ ความสามารถในการสร้างแรง 1 นิวตัน ด้วยกระแส 1 แอมป์ ให้เคลื่อนที่ใน 1 เมตร โดยการที่ตัวนำส่งอำนาจแม่เหล็กออกมารอบตัวมันเอง มีทิศทางพุ่งจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้นั้น เส้นแรงแฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) ทั้งหมด Φ ที่ผ่านพื้นที่ผิว \mathbf{A} คือการอินทิเกรตความหนาแน่นฟลักซ์ตลอดพื้นที่ผิว

$$\Phi = \iint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.2)$$

สนามแม่เหล็ก (magnetic field, \mathbf{H}) สร้างโดยการเปลี่ยนแปลงกระแส ที่เกิดการสลับไปมาของสนามไฟฟ้า และการเกิดสนามแม่เหล็กสมมาตรโดยรอบของตัวนำเมื่อป้อนกระแส ดังนั้นความเข้มของสนามแม่เหล็กหาได้จากความหนาแน่นกระแสเทียบกับกึ่งกลางการพันรอบตัวนำ

$$\oint \mathbf{H} \cdot ds_l = Ni \quad (2.3)$$

เมื่อ N คือจำนวนรอบของการพันขดลวด i คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวด และ s_l คือความยาวเส้นฟลักซ์ โดย $Ni = mmf$ คือแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force) เป็นพลังงานรูปหนึ่งที่ใช้ในการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กให้วิ่งรอบวงจรมแม่เหล็กหนึ่งรอบ หรืออาจพิจารณาว่าเป็นความสามารถในการทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดใดขดลวดหนึ่ง ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวด กับจำนวนรอบของขดลวดนั้น และมีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นฟลักซ์ในปริมาณสเกลาร์ ดังนี้

$$B = \mu H \quad (2.4)$$

โดย $\mu = \mu_0 \mu_r$ คือความสามารถในการเป็นแม่เหล็ก (permeability) หรือค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติของสารแม่เหล็กแต่ละชนิดที่ยอมให้เกิดสนามแม่เหล็กได้มากหรือน้อย μ_0 คือ permeability ของอากาศ μ_r คือความสามารถในการเป็นแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability) หรือค่าความซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ของสารตัวกลาง

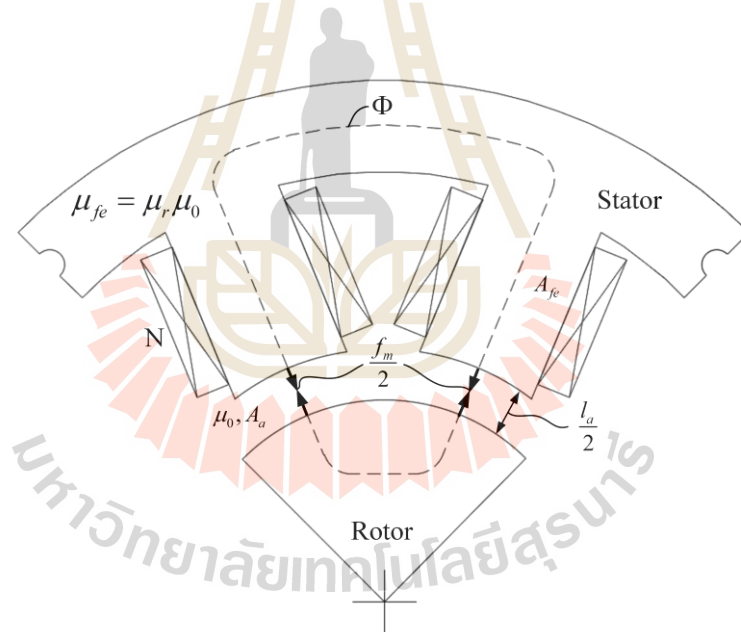
วงจรรพื้นฐานของแมริงแม่เหล็กมีสเตเตอร์ซึ่งเป็นแกนเหล็กไว้พัน และโรเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.1 หรือบางครั้งเรียกแม่เหล็กรูปตัวยู (U – shaped) เส้นวงปิดของฟลักซ์แม่เหล็กเป็นการสมมติ

ว่ามีค่าเท่ากันตลอดความยาวคงที่ ให้เส้นฟลักซ์ในแกนเหล็กเป็น l_{fe} และมีช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์หรือช่องว่างอากาศ $y = l_a / 2$ ถ้าจำนวนรอบของการพันแกนเหล็กและกระแส เรียกว่า ampere – turns จากสมการ (2.3) ได้ว่า

$$H_{fe} l_{fe} + H_a l_a = \Phi \left(\frac{l_{fe}}{\mu_r \mu_0 A_{fe}} + \frac{2y}{\mu_0 A_a} \right) = Ni \quad (2.5)$$

สมมติให้ Φ มีค่าคงที่รอบวงแม่เหล็กซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศ ดังนั้น

$$\Phi = B_{fe} A_{fe} = B_a A_a \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของแม่เหล็ก

สามารถเขียนสมการ (2.5) ได้ใหม่ว่า

$$B = \mu_0 \frac{Ni}{\left(\frac{l_{fe}}{\mu_r} + 2y \right)} \quad (2.7)$$

โดยที่ μ_r ของเหล็กอยู่ในช่วง 1,000 – 10,000 และ μ_r ของอากาศมีค่าประมาณ 1 จึงได้ว่า

$$B = \mu_0 \frac{Ni}{2y} \quad (2.8)$$

การเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance, L_0) คือองค์ประกอบที่ไม่สามารถรับ และคายพลังงานได้ ตลอดช่วงเวลา โดยพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำจะสะสมอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็ก และอธิบายอยู่ในเทอมของกระแสไฟฟ้าจากกฎของฟาราเดย์ (faraday's law) สรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในแต่ละรอบของขดลวด ซึ่งขดลวดมีจำนวนรอบ N คือ

$$v_0 = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dl_{fl}}{dt} \quad (2.9)$$

เมื่อ l_{fl} คือเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้อย (flux linkage) มีจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นในจำนวนรอบ N รอบคือ $N\Phi$ โดยขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด $N\Phi = L_0 i$ ดังนั้น

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A_a}{2y} \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) แสดงให้เห็นว่า ค่า L_0 จะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับค่ากระแส แต่ค่า L_0 จะมีค่าแปรผันตรงกับค่า N^2 และแปรผกผันกับค่า $2y$ ดังนั้น สามารถออกแบบค่า L_0 ได้ตามต้องการ เช่น ถ้าต้องการค่า L_0 เปลี่ยนแปลงมากก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด แต่ถ้าต้องการค่า L_0 เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ก็เปลี่ยนระยะช่องว่างอากาศให้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น หาได้จากพลั๊กซ์ภายในช่องว่างของอากาศกับแม่เหล็ก และโรเตอร์ โดยใช้กฎอนุรักษ์พลังงานที่เกิดขึ้น ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่เกิดในปริมาตร

$$W = \frac{1}{2} \int_{\forall} BH \cdot dV = \frac{\mu_0 A_a N^2}{4} \cdot \frac{i^2}{y} \quad (2.11)$$

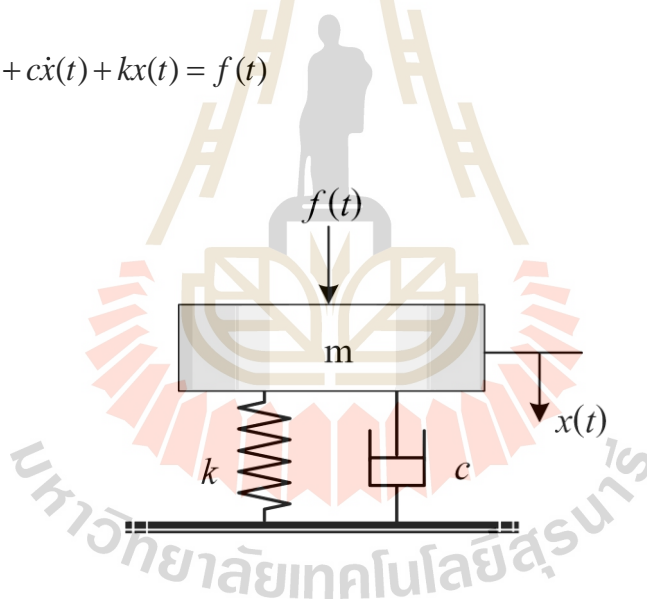
ในขณะที่ แรงแม่เหล็กเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของช่องว่างอากาศ ดังนี้

$$f_m = -\frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\mu_0 A_a N^2}{4} \cdot \frac{i^2}{y^2} \quad (2.12)$$

2.2 ระบบหนึ่งองศาอิสระ

โครงสร้างทางกลอย่างง่ายในอุดมคติ สามารถอธิบายได้ด้วยระบบหนึ่งองศาอิสระ ซึ่งหลักการของระบบนี้ จะเป็นรูปแบบพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบที่มากกว่าหนึ่งองศาอิสระต่อไป เริ่มต้นด้วยการพิจารณาระบบ ดังรูปที่ 2.2 ที่มีมวล (mass) สปริง (spring) และตัวหน่วง (damper) สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของระบบ (Rao 1995) ได้ว่า

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.2 แบบจำลองอย่างง่ายของระบบหนึ่งองศาอิสระ

เมื่อไม่มีแรงมากระทำ (free vibration) ทำให้ $f(t) = 0$ และกำหนดให้ผลการตอบสนองของระบบเป็นฟังก์ชันฮาร์โมนิกส์ $x_h(t) = Xe^{st}$ เป็นจริง และไม่เท่ากับศูนย์ ได้ว่า

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (2.14)$$

เมื่อ m คือมวลของระบบ k คือความแข็งของสปริงของระบบ ซึ่งมีรากของสมการเป็น

$$s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{\sqrt{c^2 - 4km}}{2m} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.15)$$

เมื่อ c คือตัวหน่วงของระบบ มี ω_n เป็นความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วง ζ มีค่าดังนี้

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m}, \zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (2.16)$$

เมื่อพิจารณาระบบความหน่วงต่ำ และนิยามความถี่ธรรมชาติความหน่วง ω_d ได้ว่า

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.17)$$

และจัดรูปสมการ (2.15) ได้เป็น

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} = -\sigma \pm j\omega_d \quad (2.18)$$

ซึ่งมี $j = \sqrt{-1}$ ทำให้ได้ผลเฉลยของระบบหนึ่งองศาอิสระที่ไม่มีแรงกระทำ ดังนี้

$$x_h(t) = e^{-\sigma t} (X_1 e^{j\omega_d t} + X_2 e^{-j\omega_d t}) \quad (2.19)$$

เมื่อ X_1 และ X_2 คือค่าคงที่ หาได้จากการกำหนดสภาพเริ่มต้นของการสั่น คือ $x_h(0) = x_0$ และ $\dot{x}_h(0) = \dot{x}_0$ บางครั้งเรียกผลเฉลยในลักษณะนี้ว่า ผลการตอบสนองชั่วคราว (transient response) หรือผลเฉลยเอกพันธ์ (homogeneous solution) คือเมื่อเวลาผ่านไป การตอบสนองในสมการ (2.19) จะหมดไป แสดงดังรูปที่ 2.3(a) ซึ่งจะเหลือผลการตอบสนองเนื่องจากแรงบังคับเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

ในลำดับถัดไปจะเป็นการพิจารณาระบบที่มีแรงกระทำ หากแรงกระทำแบบฮาร์โมนิกส์ เป็นฟังก์ชันของ $f(t) = Fe^{j\omega t}$ ด้วย เมื่อ $x_p(t) = Xe^{j\omega t}$ คือขนาดจำนวนเชิงซ้อน และแทนในสมการ (2.13) ได้ว่า

$$\alpha(\omega) = \frac{X}{F} = \frac{1}{(k - \omega^2 m) + j(\omega c)} \quad (2.20)$$

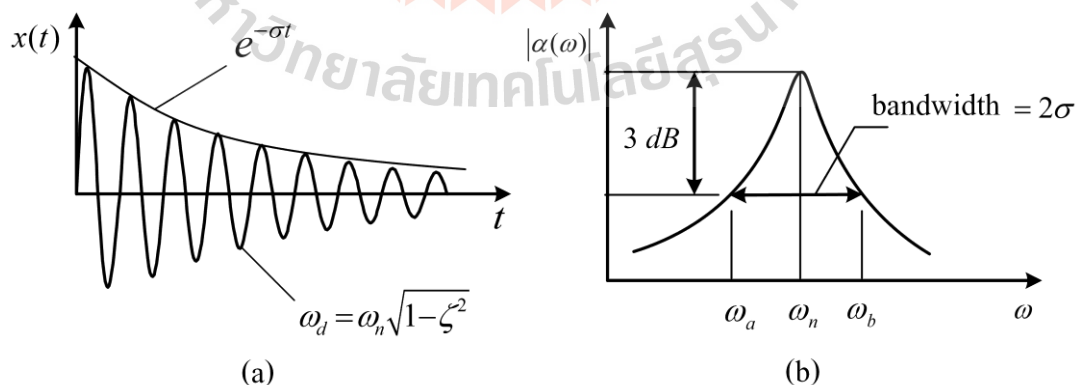
โดยที่ ω เป็นความถี่ใด ๆ ซึ่งอัตราส่วนนี้ถูกกำหนดด้วยฟังก์ชัน $\alpha(\omega)$ และเรียกว่า ฟังก์ชันผลการสนองเชิงความถี่ของระบบ แม้ว่าจะถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของการตอบสนองกับแรง แต่ทว่าทั้งฟังก์ชันของแรง และฟังก์ชันการตอบสนองนั้นกลับเป็นอิสระต่อกัน หากพิจารณาแยกในส่วนจริง (real part) และจินตภาพ (imaginary part) ของ $\alpha(\omega)$ ออกจากกัน สามารถทำได้ด้วยการสังยุคจำนวนเชิงซ้อนสมการ (2.17) และจัดรูปเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนได้ว่า

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2}} e^{-j \tan^{-1} \left(\frac{\omega c}{k - \omega^2 m} \right)} \quad (2.21)$$

ดังนั้น สามารถเขียนผลเฉลยของระบบหนึ่งองศาอิสระเมื่อมีแรงมากระทำ หรือผลการตอบสนองที่สถานะคงตัว (steady state response) ได้ว่า

$$x_p(t) = X e^{j\omega t} = \alpha(\omega) F e^{j\omega t} \quad (2.22)$$

ซึ่งเป็น ผลเฉลยเฉพาะ (particular solution) ของแรงที่มากระทำกับระบบ

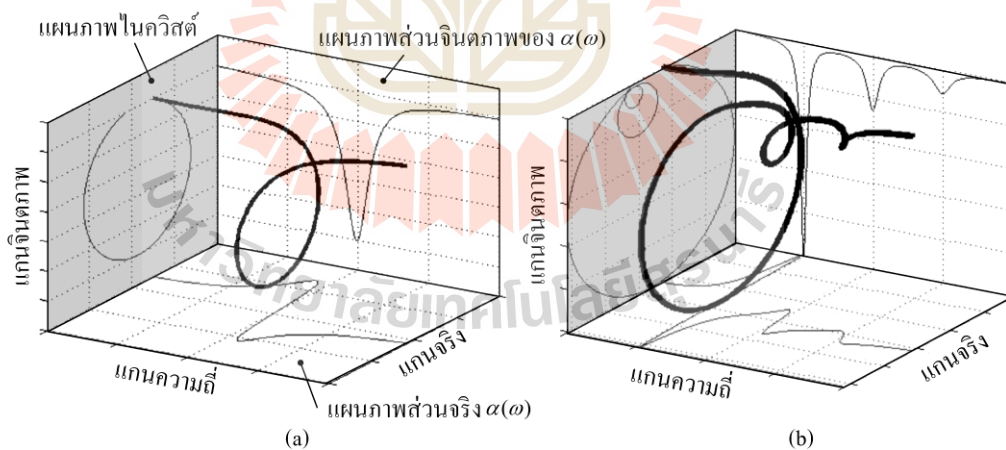


รูปที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะของระบบความหน่วงต่ำ (a) การสั่นแบบอิสระบนโดเมนเวลา
(b) การสั่นแบบบังคับบนโดเมนความถี่

สำหรับฟังก์ชันผลการสนองเชิงความถี่ $\alpha(\omega)$ เป็นฟังก์ชันในการอธิบายผลการตอบสนองของระบบภายใต้การสั่นแบบบังคับ ในทางทฤษฎีฟังก์ชันนี้จะถูกกำหนดด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของระบบความหน่วงต่ำบนโดเมนเวลา เมื่อพล็อตขนาดของฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ $|\alpha(j\omega)|$ และมีความถี่แบนด์วิดท์ (bandwidth) ขนาด $|\alpha(j\omega_n)|/\sqrt{2}$ (หรือเท่ากับ 3 เดซิเบล) ในช่วงความถี่ ω_a และ ω_b ที่เรียกว่า จุดครึ่งกำลังสอง (half power) แสดงดังรูปที่ 2.3(b) โดยความสัมพันธ์อัตราส่วนความหน่วงที่จุดสูงสุด หาได้ดังนี้

$$\omega_b - \omega_a = 2\zeta\omega_n = 2\sigma \quad (2.23)$$

นอกจากนี้ จากความสัมพันธ์ส่วนจริง และส่วนจินตภาพของฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ $\alpha(\omega)$ ของระบบหนึ่งองศาอิสระ เมื่อนำมาพล็อตเป็นแผนภาพ 3 มิติ จะปรากฏรูปร่างวงกลมขึ้นที่ระนาบของแกนจริง และแกนจินตภาพดังรูปที่ 2.4(a) เรียกว่า วงกลมไนควิสต์ (nyquist circle) ในทำนองเดียวกัน หากระบบมีองศาอิสระเพิ่มขึ้น รูปร่างวงกลมภายในระนาบจะเท่ากับจำนวนองศาอิสระนั้นด้วย และยิ่งไปกว่านั้น ขนาดของวงกลมจะเปลี่ยนแปลงตามส่วนจินตภาพ และส่วนจริง เมื่อความถี่มีการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.4(b)



รูปที่ 2.4 แผนภาพ 3 มิติ ของระบบ (a) หนึ่งองศาอิสระ (b) หลายองศาอิสระ

2.3 ระบบหลายองศาอิสระที่ไม่มี ความหน่วง

ในการวิเคราะห์พลวัตของระบบที่มีหลายองศาอิสระ ด้วยการขยายความตามระบบหนึ่งองศาอิสระ สำหรับระบบกลไกหรือโครงสร้างในหลาย ๆ ระบบ จะมีพิกัดมากกว่าหนึ่งพิกัดเพื่อ

อธิบายการเคลื่อนที่ และการสั่นสะเทือนของระบบได้อย่างเพียงพอ ทำให้ต้องพิจารณาแบบจำลองที่เป็นหลายองศาอิสระด้วย สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ ที่มี h องศาอิสระได้ว่า

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (2.24)$$

เมื่อเมทริกซ์มวล \mathbf{M} และเมทริกซ์ความแข็งของสปริง \mathbf{K} เป็นเมทริกซ์สมมาตรขนาด $h \times h$ โดยให้ $\mathbf{x}(t)$ คือเวกเตอร์การกระจัดขนาด $h \times 1$ และ $\mathbf{f}(t)$ คือเวกเตอร์แรงกระทำขนาด $h \times 1$ จะเห็นได้ว่าสมการการเคลื่อนที่ที่จะเกี่ยวโยง (couple) กันอยู่หลายสมการด้วยกัน นั่นคือ สมการการเคลื่อนที่หนึ่งสมการจะมีพิกัดอยู่มากกว่าหนึ่งพิกัด ทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยของสมการทีละสมการได้ และจำเป็นต้องหาผลเฉลยไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งในกรณีที่ระบบมีหลายองศาอิสระ การแก้สมการจะมีความยุ่งยาก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติทางเมทริกซ์เข้ามาร่วมวิเคราะห์

ถ้าหากพิจารณาระบบที่ไม่มีความหน่วง และเป็นระบบอนุรักษ์ คือไม่มีแรงมากระทำกับระบบ สามารถเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ได้ว่า

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{0} \quad (2.25)$$

โดยให้ $\mathbf{x}(t) = \mathbf{X}e^{j\omega t}$ คือฟังก์ชันผลเฉลยของเวกเตอร์การกระจัดขนาด $h \times 1$ ทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบที่ไม่มีความหน่วงภายใต้การสั่นอย่างอิสระ ซึ่งเรียกปัญหาที่มีลักษณะเฉพาะพิเศษนี้ว่า ปัญหาค่าเฉพาะ (eigenvalue problems) แสดงได้ว่า

$$(\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M})\mathbf{X} = \mathbf{0} \quad (2.26)$$

ผลเฉลยของสมการ (2.26) จะประกอบด้วย h สมการ ตามจำนวนองศาอิสระ มีค่า ω^2 เป็นค่าเฉพาะ (eigenvalue) เมื่อหารากของค่าเฉพาะจะได้ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ นอกจากนั้นยังสามารถแสดงให้เห็นได้ว่ารากทั้ง h รากของสมการค่าเฉพาะ (characteristic equation) นี้จะมีค่าเป็นจำนวนจริงบวกเท่านั้น ซึ่งในกรณีนี้ถ้าให้ค่า $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_h^2$ เป็นค่ารากทั้ง h ค่า และเรียงลำดับจากน้อยไปมาก จะทำให้เมื่อถอดรากแล้วได้ว่า $\omega_1 \leq \omega_2 \leq \dots \leq \omega_h$ เรียกค่าความถี่ธรรมชาติ โดยเรียกค่าที่ต่ำที่สุดว่า ความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) ส่วนเวกเตอร์ \mathbf{X} ซึ่งเป็นเวกเตอร์เฉพาะ (eigenvector) ขนาด $h \times 1$ ที่แสดงถึงรูปร่างการสั่นของระบบ อาจเรียกได้ว่า

รูปร่างโหมด (mode shape) หากรูปร่างโหมดมีคุณสมบัติการตั้งฉากกัน และที่ความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติระบบ ค่ารากทั้ง h รากของสมการค่าเฉพาะ จะได้รูปร่างโหมดที่ความถี่นั้น ๆ คือ Ψ_1 และ Ψ_2 ไปถึง Ψ_h ด้วย ซึ่งจะพิสูจน์ในลำดับถัดไป

คุณสมบัติที่สำคัญในการพิจารณารูปร่างโหมดอีกประการหนึ่งคือ การตั้งฉากกัน (orthogonally) ของโหมดบรรทัดฐาน (normal mode) สามารถพิสูจน์ทราบได้จากการพิจารณารูปร่างโหมดที่ r และ s โหมดของระบบ จากสมการ (2.26) เขียนใหม่ได้ว่า

$$(\mathbf{K} - \omega_r^2 \mathbf{M}) \Psi_r = \mathbf{0} \quad (2.27)$$

และ

$$(\mathbf{K} - \omega_s^2 \mathbf{M}) \Psi_s = \mathbf{0} \quad (2.28)$$

เริ่มต้นด้วยการคูณสมการ (2.28) ด้วย Ψ_r^T ได้ว่า

$$\Psi_r^T (\mathbf{K} - \omega_s^2 \mathbf{M}) \Psi_s = 0 \quad (2.29)$$

ในลักษณะเดียวกัน คูณสมการ (2.27) ด้วย Ψ_s^T และทำการทรานสโพส ทำให้

$$\Psi_s^T (\mathbf{K} - \omega_r^2 \mathbf{M}) \Psi_s = 0 \quad (2.30)$$

นำสมการ (2.30) ลบสมการ (2.29) ได้ว่า

$$(\omega_r^2 - \omega_s^2) \Psi_r^T \mathbf{M} \Psi_s = 0 \quad (2.31)$$

ซึ่ง ถ้าให้ $\omega_r^2 \neq \omega_s^2$ ทำให้สมการ (2.31) เป็นจริงก็ต่อเมื่อ

$$\Psi_r^T \mathbf{M} \Psi_s = 0 \quad (2.32)$$

หลังจากนั้นแทนสมการ (2.32) ในสมการ (2.30) ได้ว่า

$$\Psi_r^T \mathbf{K} \Psi_s = 0 \quad (2.33)$$

ก่อนหน้านี้นี้แสดงถึง รูปร่างโหมดที่ตั้งฉากกันของเมทริกซ์ \mathbf{M} และ \mathbf{K} ที่พิกัดใด ๆ ซึ่งจะเรียกรูปร่างโหมดที่ตั้งฉากกันว่า เวกเตอร์โหมด (modal vector)

สำหรับในกรณีที่ $\omega_r^2 = \omega_s^2$ หากคูณสมการ (2.27) ด้วย Ψ_r^T จะได้ว่า

$$\Psi_r^T \mathbf{K} \Psi_r = \omega_r^2 \Psi_r^T \mathbf{M} \Psi_r \quad (2.34)$$

โดยกำหนดให้

$$\Psi_r^T \mathbf{M} \Psi_r = m_r \quad \text{และ} \quad \Psi_r^T \mathbf{K} \Psi_r = k_r \quad \text{เมื่อ } r = 1, 2, \dots, h \quad (2.35)$$

ดังนั้นสามารถสรุปสมการ (2.34) ได้ความถี่โหมด (modal frequency) ว่า

$$\omega_r^2 = \frac{k_r}{m_r} \quad \text{เมื่อ } r = 1, 2, \dots, h \quad (2.36)$$

เมื่อ m_r และ k_r คือมวลโหมด (modal mass) และความแข็งของสปริงโหมด (modal stiffness) ของโหมด r ตามลำดับ ในรูปแบบเมทริกซ์ตามหลักการข้างต้นนี้ สามารถเขียนได้ว่า

$$\Psi^T \mathbf{M} \Psi = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & m_h \end{bmatrix}, \quad \Psi^T \mathbf{K} \Psi = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & k_h \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

และ

$$[\dot{\omega}_r^2] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \omega_h^2 \end{bmatrix} = [k_r][m_r]^{-1} \quad (2.38)$$

เมื่อ $[m_r]$ และ $[k_r]$ คือเมทริกซ์มวลโมดอล และเมทริกซ์ความแข็งของสปริงโมดอลตามลำดับ โดยที่ $[\Psi]$ คือเมทริกซ์รูปร่างโหมด (mode shape matrix) และนิยมเรียกเมทริกซ์นี้ว่าเมทริกซ์โมดอล (modal matrix) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยหลักเวกเตอร์โมดอลแต่ละค่า คือ

$$\Psi = [\Psi_1 \quad \Psi_2 \quad \dots \quad \Psi_h] \quad (2.39)$$

ในหลาย ๆ กรณีนิยมที่จะทำให้เวกเตอร์โมดอล เป็นค่าบรรทัดฐาน (normalized) โดยกำหนดให้

$$\Theta_r = \frac{1}{\sqrt{m_r}} \Psi_r \quad \text{เมื่อ } r = 1, 2, \dots, h \quad (2.40)$$

เมื่อ Θ_r เรียกว่า รูปร่างโหมดบรรทัดฐาน และเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ได้ว่า

$$\Lambda = \Psi [m_r]^{-1/2} \quad (2.41)$$

ทำให้จัดรูปสมการ (2.37) ได้ใหม่ว่า

$$[\dot{m}_r]^{-1/2} \Psi^T \mathbf{M} \Psi [\dot{m}_r]^{-1/2} = [\dot{m}_r]^{-1/2} [m_r] [\dot{m}_r]^{-1/2} \quad (2.42)$$

$$\Lambda^T \mathbf{M} \Lambda = \mathbf{I}$$

และ

$$\begin{aligned} [\dot{m}_r.]^{-1/2} \Psi^T \mathbf{K} \Psi [\dot{m}_r.]^{-1/2} &= [\dot{m}_r.]^{-1/2} [\dot{k}_r.] [\dot{m}_r.]^{-1/2} \\ \Lambda^T \mathbf{K} \Lambda &= [\dot{k}_r.] [\dot{m}_r.]^{-1} = [\dot{\omega}_r^2.] \end{aligned} \quad (2.43)$$

เมื่อ Λ คือเมทริกซ์รูปร่างโหนดมวลบรรทัดฐาน

เนื่องจากเวกเตอร์โหมดอล มีคุณสมบัติของการตั้งฉาก จะทำให้เวกเตอร์โหมดอลนี้มีคุณสมบัติอีกประการหนึ่ง คือมีคุณสมบัติที่เป็นอิสระเชิงเส้นต่อกัน โดยใช้ทฤษฎีการกระจาย (expansion theorem) ในการอธิบายเวกเตอร์ผลการตอบสนองของระบบ $\mathbf{x}(t)$ ให้อยู่ในรูปของผลรวมเวกเตอร์โหมดอล ได้ว่า

$$\mathbf{x}(t) = q_1(t) \Psi_1 + q_2(t) \Psi_2 + \dots + q_h(t) \Psi_h \quad (2.44)$$

เมื่อ $q_1(t), q_2(t), \dots, q_h(t)$ เป็นพิกัดทั่วไปหรือเรียกว่า พิกัดหลัก (principal coordinates) ที่ h รูปร่างโหนด หรือเขียนในรูปของเมทริกซ์โหมดอล ดังนี้

$$\mathbf{x}(t) = \Psi \mathbf{q}(t) \quad (2.45)$$

ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนพิกัดระหว่างผลการตอบสนอง $\mathbf{x}(t)$ ของระบบหรืออาจเรียกว่าเป็นพิกัดจริง กับพิกัดทั่วไป $\mathbf{q}(t)$

2.4 ผลการตอบสนองของระบบภายใต้การสั่นแบบบังคับที่ไม่มีความหน่วง

สำหรับการพิจารณาระบบที่มีแรงภายนอกมากระทำ เมื่อสมการการเคลื่อนที่ของระบบหลายองศาอิสระสำหรับระบบไม่มีความหน่วง ได้จาก

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (2.46)$$

เมื่อเวกเตอร์แรง $\mathbf{f}(t)$ ขนาด $h \times 1$ คือแรงภายนอกที่มากระทำ ถ้าแรงเป็นฮาร์โมนิกส์ซึ่งมีความถี่เดียวกัน และเฟสเป็นศูนย์ โดยกำหนดให้ F_r คือขนาดของแรงฮาร์โมนิกส์เป็นค่าจำนวนจริงที่ $r = 1, 2, \dots, h$ และให้ผลการตอบสนองเป็นการสั่นแบบฮาร์โมนิกส์ด้วย ได้ว่า

$$\begin{aligned}\mathbf{f}(t) &= \mathbf{F}e^{j\omega t} \\ \mathbf{x}(t) &= \mathbf{X}e^{j\omega t}\end{aligned}\quad (2.47)$$

หากแทนสมการ (2.47) ในสมการ (2.46) ได้ว่า

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{X}e^{j\omega t} = \mathbf{F}e^{j\omega t} \Rightarrow \mathbf{X} = \boldsymbol{\alpha}(\omega) \mathbf{F} \quad (2.48)$$

เรียกเมทริกซ์ $(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})$ นี้ว่า เมทริกซ์ความแข็งพลวัตของระบบหลายองศาอิสระ และเมทริกซ์ $\boldsymbol{\alpha}(\omega)$ เป็นเมทริกซ์ไม่เอกฐาน (non-singular matrix) นั่นคือหาดีเทอร์มิแนนต์ได้ และมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ หากอินเวอร์ส $\boldsymbol{\alpha}(\omega)$ จะได้นิยามเดียวกับระบบหนึ่งองศาอิสระตามสมการ (2.20) แต่เป็นรูปแบบของเมทริกซ์ฟังก์ชันผลการสนองเชิงความถี่ ที่ขึ้นกับแรงกระทำที่พิกัดใด ๆ เขียนได้ว่า

$$\boldsymbol{\alpha}(\omega) = (\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})^{-1} \quad (2.49)$$

เป็นจริงที่ว่า ผลการตอบสนองที่พิกัด b เทียบกับการกระตุ้นแรงที่พิกัด a มีค่าเหมือนกับผลการตอบสนองที่พิกัด a เทียบกับการกระตุ้นแรงที่พิกัด b และเมื่อพิจารณาอิลิเมนต์ทั่วไปสำหรับเมทริกซ์ฟังก์ชันผลการสนองเชิงความถี่ $\alpha_{ab}(\omega)$ หรือกำหนดให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของหนึ่งอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต ดังนี้

$$\alpha_{ab}(\omega) = \frac{X_a}{F_b} \quad (2.50)$$

หากใช้คุณสมบัติตั้งฉากกับระบบหลายองศาอิสระ เมทริกซ์ฟังก์ชันผลการสนองเชิงความถี่ สามารถพิสูจน์ได้โดยง่าย จากความถี่ธรรมชาติและเมทริกซ์รูปร่างโหมด เมื่อใช้รูปแบบการพิจารณาสมการ (2.42) และ (2.43) กับสมการ (2.49) ทำให้

$$\boldsymbol{\Lambda}^T \boldsymbol{\alpha}(\omega)^{-1} \boldsymbol{\Lambda} = [\cdot (\omega_r^2 - \omega^2) \cdot] \quad (2.51)$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$\alpha(\omega) = \Lambda \left[\cdot (\omega_r^2 - \omega^2) \cdot \right]^{-1} \Lambda^T \quad (2.52)$$

เมื่อ $\alpha(\omega) = [\alpha_1(\omega) \quad \alpha_2(\omega) \quad \cdots \quad \alpha_h(\omega)]$ หากแทน $\alpha(\omega)$ ลงในสมการ (2.48) และเขียนในอีลิเมนต์เมทริกซ์ ได้คือ

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_h \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(\omega) & \alpha_{12}(\omega) & \cdots & \alpha_{1h}(\omega) \\ \alpha_{21}(\omega) & \alpha_{22}(\omega) & \cdots & \alpha_{2h}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{h1}(\omega) & \alpha_{h2}(\omega) & \cdots & \alpha_{hh}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_h \end{Bmatrix} \quad (2.53)$$

จะเห็นได้ว่า $\alpha(\omega)$ เป็นเมทริกซ์สมมาตร ซึ่งบ่งบอกถึงการถ่ายโอนซึ่งกันและกัน และสามารถเขียนกระจายในเทอมของเมทริกซ์ (Ewins 2000) ได้ว่า

$$\begin{aligned} \alpha_{ab}(\omega) &= \frac{\phi_{a1}\phi_{b1}}{\omega_1^2 - \omega^2} + \frac{\phi_{a2}\phi_{b2}}{\omega_2^2 - \omega^2} + \cdots + \frac{\phi_{ah}\phi_{bh}}{\omega_h^2 - \omega^2} \\ &= \sum_{r=1}^h \frac{\phi_{ar}\phi_{br}}{\omega_r^2 - \omega^2} = \sum_{r=1}^h \frac{\Psi_{ar}\Psi_{br}}{m_r(\omega_r^2 - \omega^2)} \end{aligned} \quad (2.54)$$

หรือเขียนในรูปแบบผลรวมแยกเป็นเศษส่วนย่อย (partial fractions series form) ได้ว่า

$$\alpha_{ab}(\omega) = \sum_{r=1}^h \frac{r A_{ab}}{\omega_r^2 - \omega^2} \quad (2.55)$$

จะเห็นได้ว่าสมการ (2.55) มีการอ้างถึงรูปร่างโหมดที่ r ใด ๆ ที่เชื่อมโยงกับพิกัดเฉพาะระหว่าง a และ b โดย $r A_{ab} = \phi_{ar}\phi_{br}$ เรียกว่า ค่าคงที่โหมด (modal constant) ในที่นี้สามารถใช้หลักการของเศษส่วนเหลือ (residue) และ โพล (pole) ที่แทนด้วยความถี่ธรรมชาติที่โหมด r ใด ๆ ได้ด้วย

ดังนั้น หากพิจารณาฟังก์ชันผลการสนองเชิงความถี่ จำนวน p หลัก จะปรากฏจำนวนหลักเท่ากับ p ของเมทริกซ์ $\alpha(\omega)$ ด้วย และเขียนได้ว่า

$$\alpha_p(\omega) = \begin{Bmatrix} \alpha_{p1}(\omega) \\ \alpha_{p2}(\omega) \\ \vdots \\ \alpha_{ph}(\omega) \end{Bmatrix} = \mathbf{A}_p \left\{ \frac{1}{\omega_1^2 - \omega^2} \quad \frac{1}{\omega_2^2 - \omega^2} \quad \cdots \quad \frac{1}{\omega_h^2 - \omega^2} \right\}^T \quad (2.56)$$

เมื่อหลัก $p = 1, 2, \dots, h$ และ

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} {}_1A_{p1} & {}_2A_{p1} & \cdots & {}_nA_{p1} \\ {}_1A_{p2} & {}_2A_{p2} & \cdots & {}_nA_{p2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ {}_1A_{ph} & {}_2A_{ph} & \cdots & {}_nA_{ph} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{p1}\phi_{11} & \phi_{p1}\phi_{12} & \cdots & \phi_{ph}\phi_{1h} \\ \phi_{p1}\phi_{21} & \phi_{p2}\phi_{22} & \cdots & \phi_{ph}\phi_{2h} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{p1}\phi_{h1} & \phi_{p2}\phi_{h2} & \cdots & \phi_{ph}\phi_{hh} \end{bmatrix}$$

โดยที่ \mathbf{A}_p คือเมทริกซ์ค่าคงที่โมดอลสำหรับจำนวนฟังก์ชันผลการสนองเชิงความถี่ จำนวน p หลักของเมทริกซ์ $\alpha(\omega)$ ซึ่งแต่ละหลักของ $\alpha(\omega)$ จะมีค่าเมทริกซ์ค่าคงที่โมดอลขึ้นกับหลักนั้น

2.5 ผลการตอบสนองของระบบภายใต้การสั่นแบบบังคับที่มีความหน่วง

ก่อนหน้านี้นี้เป็นการพิจารณาผลการตอบสนองแบบบังคับของระบบที่ไม่มี ความหน่วงเท่านั้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าระบบที่เกิดการเคลื่อนที่นั้น จะมีความหน่วงเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของระบบหลายองศาอิสระ ได้ว่า

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (2.57)$$

เมื่อเมทริกซ์ความหน่วง \mathbf{C} สามารถแยกได้เป็นผลรวมเชิงเส้นของเมทริกซ์มวลและเมทริกซ์ความแข็งของสปริง ดังนี้

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (2.58)$$

เมื่อ α และ β เป็นค่าคงที่ เรียกความหน่วงนี้ว่า ความหน่วงแบบสัดส่วน (proportional damping) เพื่อให้ระบบไม่มีความเชื่อมโยงกันของเมทริกซ์ความหน่วง ต้องอาศัยคุณสมบัติ ดังนี้

$$\mathbf{KM}^{-1}\mathbf{C} = \mathbf{CM}^{-1}\mathbf{K} \quad (2.59)$$

จากรูปแบบสมการ (2.37) พิจารณานสมการ (2.58) ได้ว่า

$$\Psi^T \mathbf{C} \Psi = \alpha [\dot{m}_{r.}] + \beta [\dot{k}_{r.}] = [\dot{c}_{r.}] \quad (2.60)$$

มาถึงตรงนี้ก็คงเป็นเรื่องง่ายที่จะหาสมการการเคลื่อนที่ของระบบที่มีความหน่วงเมื่อไม่มีการกระตุ้นในพิกัดทั่วไป จากสมการ (2.45) แทนลงในสมการ (2.57) ได้ว่า

$$\mathbf{M}\Psi\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\Psi\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\Psi\mathbf{q}(t) = \mathbf{0} \quad (2.61)$$

หากคูณสมการ (2.61) ด้วย Ψ^T และใช้คุณสมบัติการตั้งฉากกัน ตามสมการ (2.37) และ (2.60) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$[\dot{m}_{r.}] \ddot{\mathbf{q}}(t) + [\dot{c}_{r.}] \dot{\mathbf{q}}(t) + [\dot{k}_{r.}] \mathbf{q}(t) = \mathbf{0} \quad (2.62)$$

ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการการเคลื่อนที่ในพิกัดหลัก โดยแต่ละสมการสามารถแยกออกจากกันได้ โดยเขียนสมการสำหรับ r สมการที่ไม่เกี่ยวข้องกัน ได้ว่า

$$m_r \ddot{q}(t) + c_r \dot{q}(t) + k_r q(t) = 0 \quad \text{เมื่อ } r = 1, 2, \dots, h \quad (2.63)$$

ซึ่งเรียกสมการข้างบนนี้ว่า สมการ โมดอล (modal equation) ทำให้สามารถเทียบกับรูปแบบผลเฉลยของระบบหนึ่งองศาอิสระได้ ซึ่งผลเฉลยจะอยู่บนพิกัด $\mathbf{q}(t)$ และสามารถแปลงพิกัดกลับไปเป็นพิกัดจริง $\mathbf{x}(t)$ ได้ด้วยความสัมพันธ์ตามสมการ (2.45) โดยผลการตอบสนองของการเคลื่อนที่ที่มีส่วนประกอบของสัมประสิทธิ์โมดอล ดังนี้

$$\omega_{dr} = \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2}, \quad \zeta_r = \frac{c_r}{2\sqrt{k_r m_r}} \quad (2.64)$$

เมื่อ ω_{dr} คือความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีตัวหน่วง โมดอล (modal damped natural frequency) และ ζ_r คืออัตราส่วนความหน่วง โมดอล (modal damping ratio) ที่ โหมด r สำหรับการพิจารณาเมทริกซ์ฟังก์ชันผลการสนองเชิงความถี่ ของระบบไม่มีความหน่วง สามารถเขียนใหม่ในรูปแบบทั่วไปของระบบหลายองศาอิสระที่มีความหน่วง โดยเปรียบเทียบสมการ (2.52) ได้ว่า

$$\alpha(\omega) = (\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C})^{-1} \quad (2.65)$$

และสามารถเขียนในเทอมฟังก์ชันผลการสนองเชิงความถี่ตัวเดียวแบบมีความหน่วง ได้ว่า

$$\alpha_{ab}(\omega) = \sum_{r=1}^h \frac{\Psi_{ar} \Psi_{br}}{(k_r - \omega^2 m_r) + j(\omega c_r)} = \sum_{r=1}^h \frac{\phi_{ar} \phi_{br}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + j(2\zeta_r \omega \omega_r)} \quad (2.66)$$

ซึ่งเป็นรูปแบบที่เหมือนกับฟังก์ชันผลการสนองเชิงความถี่ของระบบไม่มีความหน่วงโหมดที่ r ใดๆ แต่เพิ่มเติมส่วนของจำนวนเชิงซ้อนที่ปรากฏในเทอมส่วน ด้วยการเพิ่มความหน่วงเข้าไป หากมีฟังก์ชันผลการสนองเชิงความถี่จำนวน p โหมด สามารถใช้รูปแบบตามสมการ (2.56) ในการพิจารณาได้ด้วยเช่นกัน

2.6 พลศาสตร์ของโรเตอร์

สมมติให้โรเตอร์มีลักษณะเป็นดิสก์ (disk) แบบแข็งเกร็ง (rigid) ไม่ยืดหยุ่นหรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จึงไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ ทำให้เหลือเพียงพลังงานจลน์เท่านั้น โดยผลของพลังงานจลน์ของดิสก์จะประกอบด้วย การกระจัดเชิงเส้น และเชิงมุม ดังนี้

$$E_d^k = \frac{1}{2} m_d (\dot{w}_y^2 + \dot{w}_z^2) + \frac{1}{2} I_{d,y} (\dot{\theta}_{d,y}^2 + \dot{\theta}_{d,z}^2) + \frac{1}{2} I_{pd} \dot{\theta}_{d,x}^2 \quad (2.67)$$

เมื่อ m_d คือมวลของดิสก์ \dot{w}_y และ \dot{w}_z คือความเร็วเชิงเส้นในทิศทาง y และ z ตามลำดับ ถ้าสมมติให้ดิสก์สมมาตร โดยมี I_{pd} คือโมเมนต์เฉื่อยมวลเชิงขั้ว (polar mass moment of inertia) ของ

ดิกส์ และ I_{td} คือโมเมนต์เฉื่อยมวลตามขวาง (transverse mass moment of inertia) ของดิกส์ หากพิจารณาการแปลงมุมออยเลอร์ (Euler) จะได้เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมของดิกส์ (Friswell และคณะ 2010) กำหนดได้ว่า

$$\begin{Bmatrix} \dot{\theta}_{d,y} \\ \dot{\theta}_{d,z} \\ \dot{\theta}_{d,x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_y \cos \theta_x + \dot{\theta}_z \sin \theta_x \cos \theta_y \\ -\dot{\theta}_y \sin \theta_x + \dot{\theta}_z \cos \theta_x \cos \theta_y \\ \Omega - \dot{\theta}_z \sin \theta_y \end{Bmatrix} \quad (2.68)$$

เมื่อ θ_x , θ_y และ θ_z คือการกระจัดเชิงมุมรอบแกน x , y และ z ตามลำดับ ในขณะที่ $\Omega = \dot{\theta}_x$ คือความเร็วรอบของเพลารอบแกน x และมีค่าคงที่ หากแทนสมการ (2.68) ลงในสมการ (2.67) ได้ว่า

$$\begin{aligned} E_d^k &= \frac{1}{2} m_d (\dot{w}_y^2 + \dot{w}_z^2) + \frac{1}{2} I_{td} (\dot{\theta}_y^2 + \dot{\theta}_z^2 \cos^2 \theta_y) \\ &+ \frac{1}{2} I_{pd} (\Omega^2 - 2\Omega \dot{\theta}_z \sin \theta_y + \dot{\theta}_z^2 \sin^2 \theta_y) \end{aligned} \quad (2.69)$$

และสมมติให้ θ_y และ θ_z มีขนาดเล็กมากๆ ทำให้ $\sin \theta_y = \theta_y$ และ $\cos \theta_y = 1$ รวมถึงสามารถละเทอมอันดับสูงได้ ทำให้ลดรูปสมการได้เป็น

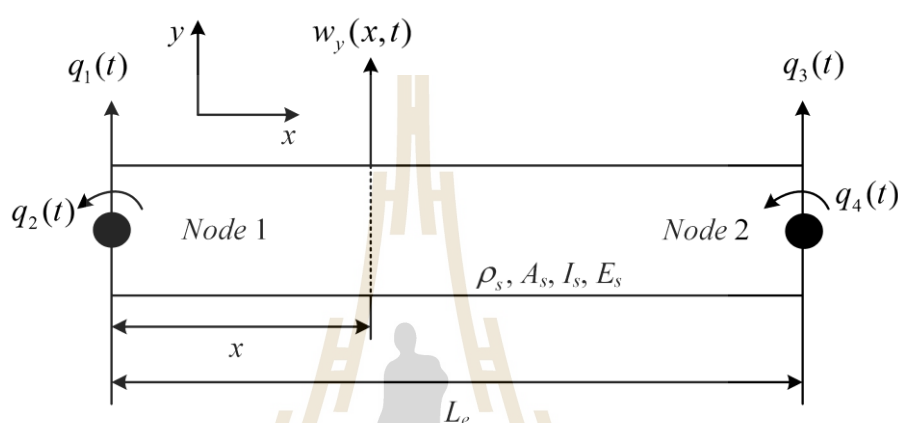
$$E_d^k = \frac{1}{2} m_d (\dot{w}_y^2 + \dot{w}_z^2) + \frac{1}{2} I_{td} (\dot{\theta}_y^2 + \dot{\theta}_z^2) + \frac{1}{2} I_{pd} (\Omega^2 - 2\Omega \dot{\theta}_z \theta_y) \quad (2.70)$$

เรียกเทอมสุดท้ายของสมการ (2.70) ว่า ผลกระทบจากไจโร (gyroscopic effect) ของดิกส์ และใช้สมการลากรองจ์ (Lagrange) อธิบายพลวัตของดิกส์ในรูปแบบเมทริกซ์ ได้ว่า

$$\begin{Bmatrix} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_d^k}{\partial \dot{w}_y} \right) - \frac{\partial E_d^k}{\partial w_y} \\ \vdots \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_d^k}{\partial \dot{\theta}_z} \right) - \frac{\partial E_d^k}{\partial \theta_z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{td} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{td} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{w}_y \\ \ddot{w}_z \\ \ddot{\theta}_y \\ \ddot{\theta}_z \end{Bmatrix} + \Omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{pd} \\ 0 & 0 & -I_{pd} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{w}_y \\ \dot{w}_z \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{Bmatrix} \quad (2.71)$$

2.7 พลศาสตร์อิลิเมนต์ของเพลลา

ในลำดับต่อไปเป็น การสร้างระบบสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ของเพลลา จำเป็นต้องพิจารณาการแบ่งอิลิเมนต์ออกเป็น ส่วน ๆ แต่ละส่วนมีความยาว L_e และกำหนดพิกัดจำนวน 4 พิกัดที่ส่วนปลายทั้งสองข้าง โดยมีพิกัดการกระจัดเชิงเส้นสองพิกัดคือ $q_1(t)$ กับ $q_3(t)$ และพิกัดการกระจัดเชิงมุมสองพิกัดคือ $q_2(t)$ กับ $q_4(t)$ เกิดขึ้นบนระนาบ $y-x$ แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การกำหนดพิกัดตำแหน่งในการพิจารณาอิลิเมนต์ของเพลลา

สมมติให้ x เป็นระยะตามแนวของเพลลา (ส่วนของอิลิเมนต์) และจากสมการออยเลอร์-แบร์นูลลี (Inman 2007) ได้การกระจัด $w_y(x, t)$ ของทั้งระนาบ $y-x$ ดังนี้

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E_s I_s \frac{\partial^2 w_y(x, t)}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (2.72)$$

จากสมมติฐานที่ว่า $E_s I_s$ มีค่าคงที่ เนื่องจากเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน โดย E_s คือโมดูลัสความยืดหยุ่นของเพลลา I_s คือโมเมนต์เฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดเพลลา ได้ว่า

$$\frac{\partial^4 w_y(x, t)}{\partial x^4} = 0 \quad (2.73)$$

ซึ่งผลเฉลยที่เป็นไปได้ จะอยู่ในรูปสมการโพลีโนเมียลกำลังสาม ซึ่งมีการกระจัดเชิงเส้น คือ

$$w_y(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 \quad (2.74)$$

และมีความสัมพันธ์กับการกระจัดเชิงมุม ดังนี้

$$\frac{\partial w_y(x)}{\partial x} = a_2 + 2a_3x + 3a_4x^2 \quad (2.75)$$

การตัดโค้งของเพลลาอิลิเมนต์ในระนาบ $y-x$ แสดงได้จากรวมกันเชิงเส้นทั้งหมด 4 กรณี ในแต่ละกรณี จะมีการกระจัด (ทั้งเชิงเส้นหรือเชิงมุม) เป็นหนึ่งหน่วยในพิกัดตามกรณีนั้น ๆ และมีการกระจัดเป็นศูนย์ในพิกัดอื่น ๆ ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตของทั้ง 4 กรณี ดังนี้

$$\begin{aligned} w_y(0,t) &= q_1(t), & \left. \frac{\partial w_y(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} &= q_2(t) \\ w_y(L_e,t) &= q_3(t), & \left. \frac{\partial w_y(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L_e} &= q_4(t) \end{aligned} \quad (2.76)$$

จากเงื่อนไขทั้งสองที่ แทนลงในสมการ (2.74) และ (2.75) จะแก้สมการหาสัมประสิทธิ์ ได้ว่า

$$\begin{aligned} a_1 &= q_1(t), & a_3 &= \frac{1}{L_e^2} (3\{q_3(t) - q_1(t)\} - L_e\{2q_2(t) + q_4(t)\}), \\ a_2 &= q_2(t), & a_4 &= \frac{1}{L_e^3} (2\{q_1(t) - q_3(t)\} + L_e\{q_2(t) + q_4(t)\}) \end{aligned} \quad (2.77)$$

และเขียนในเทอมของ $w_y(x,t)$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} w_y(x,t) &= \left[1 - 3\frac{x^2}{L_e^2} + 2\frac{x^3}{L_e^3} \right] q_1(t) + \left[x - 2\frac{x^2}{L_e} + \frac{x^3}{L_e^2} \right] q_2(t) \\ &+ \left[3\frac{x^2}{L_e^2} - 2\frac{x^3}{L_e^3} \right] q_3(t) + \left[-\frac{x^2}{L_e} + \frac{x^3}{L_e^2} \right] q_4(t) \\ &= \psi_1 q_1(t) + \psi_2 q_2(t) + \psi_3 q_3(t) + \psi_4 q_4(t) \end{aligned} \quad (2.78)$$

เมื่อ ψ_1 ψ_2 ψ_3 และ ψ_4 คือฟังก์ชันรูปร่าง เมื่อพิจารณาพลังงานความเครียด (strain energy) ได้ว่า

$$E_s^p = \frac{1}{2} \int_0^{L_e} \left(E_s I_s \left[\frac{\partial^2 w_y(x,t)}{\partial x^2} \right]^2 \right) dx \quad (2.79)$$

และแยกตัวประกอบได้เป็น

$$E_s^p = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{K}_s \mathbf{q} \quad (2.80)$$

และ

$$\mathbf{K}_s = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

เมื่อ $\mathbf{q} = \{q_1(t) \quad q_2(t) \quad q_3(t) \quad q_4(t)\}^T$ โดยมีอิลิเมนต์ความแข็งของสปริงคือ

$$k_{ij} = E_s I_s \int_0^{L_e} \psi_i''(x) \psi_j''(x) dx \quad (2.82)$$

เมื่อ $\psi''(x) = \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2}$ ทำให้ได้เมทริกซ์ความแข็งของสปริง ดังนี้

$$\mathbf{K}_s = \frac{E_s I_s}{L_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L_e & -12 & 6L_e \\ & 4L_e^2 & -6L_e & 2L_e^2 \\ & & 12 & -6L_e \\ & & & 4L_e^2 \end{bmatrix} \quad (2.83)$$

ในทำนองเดียวกัน การพิจารณาพลังงานจลน์ของเพลลา

$$E_s^k = \frac{1}{2} \int_0^{L_e} \left(\rho_s A_s \left[\frac{\partial w_y(x,t)}{\partial t} \right]^2 \right) dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_e} \left(\rho_s I_s \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_y(x,t)}{\partial t} \right) \right]^2 \right) dx \quad (2.84)$$

และแยกตัวประกอบได้เป็น

$$E_s^k = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T (\mathbf{M}_{s,t} + \mathbf{M}_{s,r}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.85)$$

และ

$$\mathbf{M}_{s,t} = \begin{bmatrix} m_{11}^t & m_{12}^t & m_{13}^t & m_{14}^t \\ m_{21}^t & m_{22}^t & m_{23}^t & m_{24}^t \\ m_{31}^t & m_{32}^t & m_{33}^t & m_{34}^t \\ m_{41}^t & m_{42}^t & m_{43}^t & m_{44}^t \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{s,r} = \begin{bmatrix} m_{11}^r & m_{12}^r & m_{13}^r & m_{14}^r \\ m_{21}^r & m_{22}^r & m_{23}^r & m_{24}^r \\ m_{31}^r & m_{32}^r & m_{33}^r & m_{34}^r \\ m_{41}^r & m_{42}^r & m_{43}^r & m_{44}^r \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

โดยมีอิทธิพลต่อมวลคือ

$$m_{ij}^t = \rho_s A_s \int_0^{L_e} \psi_i(x) \psi_j(x) dx, \quad m_{ij}^r = \rho_s I_s \int_0^{L_e} \psi_i'(x) \psi_j'(x) dx \quad (2.87)$$

จะได้เมทริกซ์มวล ดังนี้

$$\mathbf{M}_{s,t} = \frac{\rho_s A_s L_e}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L_e & 54 & -13L_e \\ & 4L_e^2 & 13L_e & -3L_e^2 \\ & & 156 & -22L_e \\ & & & 4L_e^2 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{s,r} = \frac{\rho_s I_s}{30L_e} \begin{bmatrix} 36 & 3L_e & -36 & 3L_e \\ & 4L_e^2 & -3L_e & -L_e^2 \\ & & 36 & -3L_e \\ & & & 4L_e^2 \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

เมื่อ ρ_s คือความหนาแน่น หรือมวลของอิลิเมนต์ต่อหน่วยความยาว A_s คือพื้นที่หน้าตัดของเพลลา จากสมการลากรองจ์ (Lagrange) อธิบายพลวัตของอิลิเมนต์ของเพลลาได้ว่า

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_s^k}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial E_s^k}{\partial q_1} + \frac{\partial E_s^p}{\partial q_1} \\ \vdots \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_d^k}{\partial \dot{q}_4} \right) - \frac{\partial E_d^k}{\partial q_4} + \frac{\partial E_s^p}{\partial q_4} \end{cases} = (\mathbf{M}_{s,t} + \mathbf{M}_{s,r}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_s \mathbf{q} \quad (2.89)$$

2.8 การค้นหาด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม

รหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (GA หรือ จีเอ) เป็นการค้นหาเลียนแบบการคัดเลือกโดยธรรมชาติ และปฏิบัติการทางสายพันธุ์ ตามทฤษฎีวิวัฒนาการของชาร์ล ดาร์วิน ด้วยการค้นหาคำตอบให้กับ โจทย์ปัญหานั้น ๆ โดยการพิจารณารูปแบบของปัญหาเลียนแบบประชากรในสังคม ซึ่งโดยปกติ ประชากรในสังคมจะถูกคัดเลือก และปรับเปลี่ยนพันธุกรรม เพื่อให้ลูกหลานมีลักษณะเหมาะสม กับสถานะแวดล้อมที่บีบบังคับ วัฏจักรของจีเอ ประกอบด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ คือ การคัดเลือกสายพันธุ์ ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ และการแทนที่ (สุจินต์ 2556) โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1. สร้างประชากร โดยการสุ่ม (random) ตามจำนวนที่ต้องการ
2. ประเมินค่าประชากรของกลุ่มประชากรทั้งหมดที่ดีที่สุดได้ (คือ การกำหนดให้ประชากร 1 คน ประกอบด้วย 1 โครโมโซมซึ่งแต่ละโครโมโซมแทนชุดค่าคงที่ของแบบจำลอง และยีนแต่ละตัวใน 1 โครโมโซม เป็นตัวแทนของค่าคงที่แต่ละพจน์ของแบบจำลอง) ในที่นี้คือ ค่าความคลาดเคลื่อน ระหว่างแบบจำลอง และผลการทดลอง
3. คำนวณหาค่าความเหมาะสมแล้วส่งกลับไปยังจีเอ
4. ใช้ค่าความเหมาะสมทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่มเพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวแทนในการถ่ายทอดสายพันธุ์ให้กับรุ่นถัดไป
5. นำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำการสร้างลูกหลาน ด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์ โครโมโซมที่ได้ในขั้นตอนนี้ก็คือโครโมโซมลูกหลาน
6. คำนวณหาค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลาน โดยใช้ขั้นตอนเดียวกับข้อ 3
7. โครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยลูกหลานที่ได้จากข้อ 5 ประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ

8. เริ่มต้น ทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ คำตอบที่ได้จะมาจาก โครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มประชารนั้นเอง โดยสามารถใช้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่า คำตอบที่ได้เป็นไปตามที่ต้องการ

รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมจะดำเนินการไปเรื่อย จนพบคำตอบที่ดีขึ้นจากคำตอบวงแคบ เฉพาะถิ่น ไปยังคำตอบวงกว้าง รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมจะยุติ เมื่อเงื่อนไขการค้นหาสอดคล้องกับ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยทั่วไปจะอาศัยเงื่อนไขเกี่ยวกับจำนวนรุ่นที่ต้องการ หรือค่า ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ คำตอบที่ดีที่สุดที่พบคือ โครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มของประชาร

2.9 ตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมพีไอดี (proportional-integral-derivative controller หรือ PID) เป็นตัวควบคุมที่ ได้รับความนิยมนเป็นอย่างมากในการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งพบว่ามีมากกว่าร้อยละ 90 ของระบบ ควบคุมในภาคอุตสาหกรรมที่ใช้ควบคุมนี้ เป็นตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ และได้มีความเหมาะสม ในการประยุกต์ใช้งาน (วิบูลย์ 2548 และ สรวาธุ 2546) เนื่องจากมีหลักการออกแบบที่ไม่ยุ่งยาก เมื่อพิจารณาทางคณิตศาสตร์ ตัวควบคุมพีไอดี มีกลไกปฏิบัติการที่เป็นการปรับสัดส่วน (proportional) การอินทิเกรต (integral) และการอนุพันธ์ (derivative) สัญญาณที่สัมพันธ์กัน ดังนี้

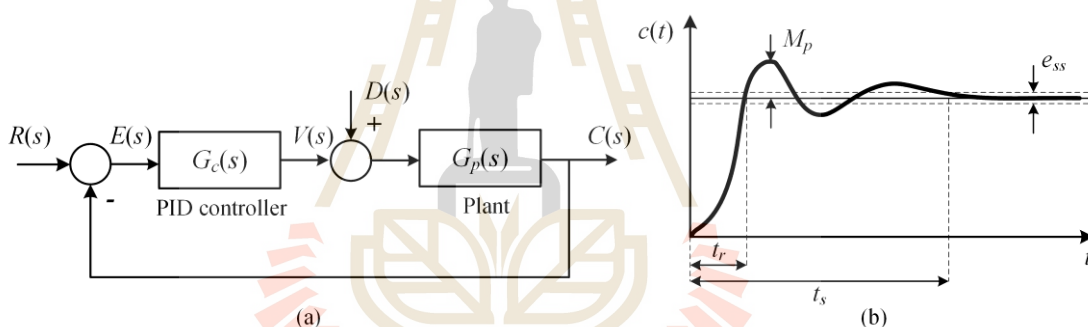
$$v(t) = g_p e(t) + g_i \int_0^t e(\tau) d\tau + g_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.90)$$

เมื่อ $e(t)$ เป็นสัญญาณอินพุต ในที่นี้คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณ และ $v(t)$ คือสัญญาณ เอาต์พุตหรือเป็นสัญญาณควบคุม โดยมี g_p คืออัตราขยายปรับสัดส่วน (proportional gain) g_i คือ อัตราขยายอินทิเกรต (integral gain) และ g_d คืออัตราขยายอนุพันธ์ (derivative gain) สามารถเขียน ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน ได้ว่า

$$G_c(s) = g_p + \frac{g_i}{s} + g_d s = \frac{g_d s^2 + g_p s + g_i}{s} \quad (2.91)$$

ในระบบควบคุมวงปิด (closed loop) ดังรูปที่ 2.6(a) เป็นการพิจารณาตัวควบคุมพีไอดี $G_c(s)$ จะรับสัญญาณความคลาดเคลื่อน (error signal) $E(s)$ มาประมวลผลเพื่อกระตุ้นสัญญาณควบคุม (control signal) $V(s)$ และส่งไปควบคุมระบบหรือพลานต์ (plant) $G_p(s)$ ให้สัญญาณตอบสนอง

หรือเอาต์พุต (output) $C(s)$ หลังจากนั้นจะเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตอ้างอิง (reference input signal) $R(s)$ เพื่อป้อนให้กับตัวควบคุมต่อไป หากระบบมีการรบกวนจากสัญญาณภายนอก (disturbance signal) $D(s)$ จะมีการรวมสัญญาณก่อนส่งไปยังระบบด้วย จากสมการ (2.91) จะเห็นว่าตัวควบคุมพีไอดี จะมีโพล (pole) ที่จุดกำเนิดจำนวนหนึ่งตัว และซีโร (zero) จำนวนสองตัว วางอยู่ทางด้านซ้ายของแกนจินตภาพ เมื่อนำตัวควบคุมพีไอดีมาวางที่ตำแหน่งป้อนไปข้างหน้า (forward path) ของวงรอบการควบคุม (control loop) ในลักษณะต่ออนุกรม ทำให้ระบบที่รับการควบคุมจากตัวควบคุมพีไอดีจะมีอันดับ (order) เพิ่มขึ้นหนึ่งอันดับไปด้วย ทำให้ได้ผลการตอบสนองในโดเมนเวลาเป็นไปดังรูปที่ 2.6(b) ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับระบบที่มีอันดับเป็นศูนย์ ผลกระทบจากการตอบสนองเมื่อมีการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี แสดงดังตารางที่ 2.1 เมื่อ t_r คือเวลาขึ้น (rise time) t_s คือเวลาเข้าขอบเขตกำหนด (settling time) M_p คือการพุ่งเกินสูงสุด (maximum overshoot) และ e_{ss} คือความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (steady-state error)



รูปที่ 2.6 ระบบวงปิด (a) ตัวควบคุมพีไอดี และ (b) ผลการตอบสนองในโดเมนเวลา

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบจากการปรับเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี

อัตราขยาย	t_r	t_s	M_p	e_{ss}
g_p	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลดลง
g_i	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ขอบเขตจำกัด
g_d	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลดลง	ลดลง	ไม่มีผลกระทบ

2.10 พื้นฐานตัวกรอง

สำหรับฟังก์ชันกรองความถี่ใด ๆ ที่มีอันดับเท่ากับสอง สามารถเขียนสมการในรูปแบบทั่วไปได้ว่า

$$D(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 (\omega_c / Q_b) s + k_0 \omega_c^2}{s^2 + (\omega_c / Q_b) s + \omega_c^2} \quad (2.92)$$

เมื่อ ω_c คือความถี่ของโพล (pole frequency) หรืออาจเรียกได้ว่า ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) และ Q_b คือค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ สำหรับสัมประสิทธิ์ k_0 , k_1 และ k_2 จะเป็นตัวกำหนดชนิดของตัวกรองสัญญาณประเภทต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองประเภทต่าง ๆ

ประเภทตัวกรอง	k_0	k_1	k_2	ฟังก์ชันถ่ายโอน
ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter)	1	0	0	$D(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + (\omega_c / Q_b) s + \omega_c^2}$
ตัวกรองความถี่สูงผ่าน (high-pass filter)	0	0	1	$D(s) = \frac{s^2}{s^2 + (\omega_c / Q_b) s + \omega_c^2}$
ตัวกรองแถบความถี่ผ่าน (band-pass filter)	0	1	0	$D(s) = \frac{(\omega_c / Q_b) s}{s^2 + (\omega_c / Q_b) s + \omega_c^2}$
ตัวกรองก้ำจืดแถบความถี่ (band-reject filter)	1	0	1	$D(s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + (\omega_c / Q_b) s + \omega_c^2}$

หากแทน $s = j\omega$ ลงในสมการ (2.92) ได้ว่า

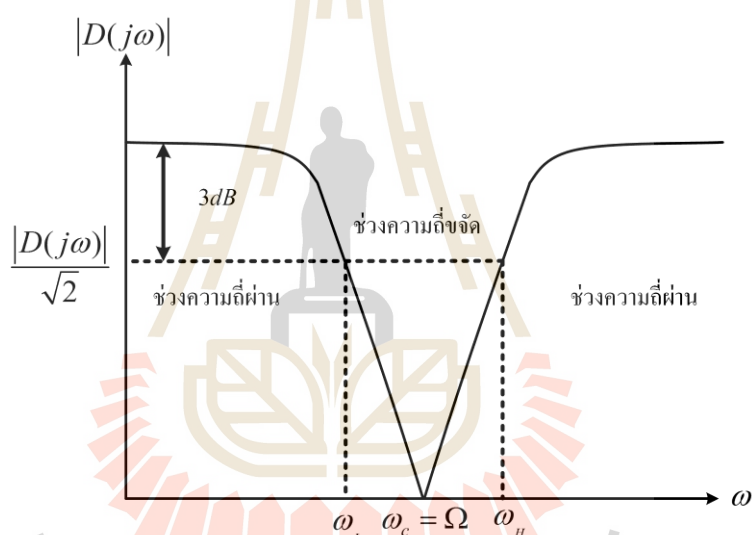
$$D(j\omega) = \frac{k_0 \omega_c^2 - k_2 \omega^2 + j k_1 (\omega_c / Q_b) \omega}{\omega_c^2 - \omega^2 + j (\omega_c / Q_b) \omega} \quad (2.93)$$

โดยที่ Q_b สัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ (BW) ดังนี้

$$Q_b = \frac{\omega_c}{BW} = \frac{\omega_c}{\omega_H - \omega_L} \quad (2.94)$$

เมื่อ ω_H คือความถี่ตัดด้านสูง (high cutoff frequency) และ ω_L คือความถี่ตัดด้านต่ำ (low cutoff frequency) เกิดที่ความถี่ 3 เดซิเบล ทั้งด้านสูง และด้านต่ำ

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ตัวกรองขจัดแถบความถี่ (band-reject filter หรือ band-stop filter) นั่นคือ สามารถยอมให้ความถี่ที่นอกเหนือจากความถี่ที่กำหนดไว้ผ่านได้ หรือในบางครั้งเรียกว่า ตัวกรองนอตช์ (notch filter) มีลักษณะการขจัดดังรูปที่ 2.7 แสดงฟังก์ชันการตอบสนองเชิงขนาด ที่ตัดความถี่คutoff ในช่วงความถี่รอบของการหมุน Ω



รูปที่ 2.7 คุณสมบัติของฟังก์ชันการตอบสนองเชิงขนาดเมื่อใช้ตัวกรองนอตช์

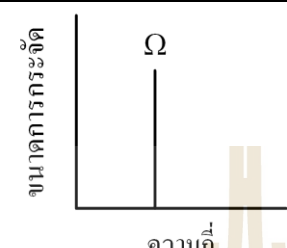
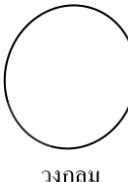
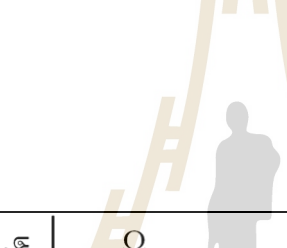

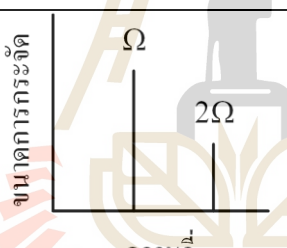
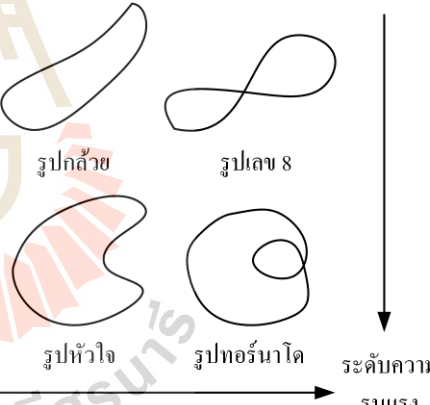
2.11 การวินิจฉัยรูปร่างวงโคจร

สัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ถูกกระตุ้นจากความถี่รอบการทำงานคงที่ สามารถพิจารณาความสัมพันธ์บนโดเมนความถี่ได้จากสเปกตรัม ซึ่งมีเพียงความถี่เดียว และไม่สามารถจำแนกได้ว่าอยู่ในสภาพปกติ (Vance และคณะ 2010) แต่เมื่อนำรูปร่างวงโคจรมาร่วมพิจารณา จะทำให้ทราบข้อมูลของปัญหา และระดับความรุนแรงของการสั่นจากรูปร่างที่เกิดขึ้นได้

ในทางปฏิบัติสามารถใช้รูปร่างวงโคจรในการวินิจฉัย และมีประโยชน์อย่างมาก เนื่องจากรูปร่างวงโคจรเป็นพฤติกรรมที่การกระทำกระทำกับเบริง หรือตัวรองรับโดยตรง ทำให้มีรูปแบบที่

สามารถเข้าใจได้ชัดเจนกว่าการวิเคราะห์สเปกตรัม โดยมีรูปแบบของวงโคจรที่เกิดจากสาเหตุของเครื่องจักรหมุน (Maurice 2010) แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางเปรียบเทียบสาเหตุปัญหาการสั่นกับรูปร่างวงโคจร

สาเหตุอาการ	สเปกตรัม	รูปร่างวงโคจร
สภาพปกติ (normal)	 <p>ขนาดการกระจัด</p> <p>Ω</p> <p>ความถี่</p>	 <p>วงกลม</p>
ไม่สมดุล (unbalance)	 <p>ขนาดการกระจัด</p> <p>Ω</p> <p>ความถี่</p>	 <p>วงรี</p>
เยื้องแนวแกน (misalignment)	 <p>ขนาดการกระจัด</p> <p>Ω</p> <p>2Ω</p> <p>ความถี่</p>	 <p>รูปกล้วย</p> <p>รูปเลข 8</p> <p>รูปหัวใจ</p> <p>รูปทอร์นาโด</p> <p>ระดับความรุนแรง</p> <p>ความเร็ว</p>

2.12 เทคนิคการปรับการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน

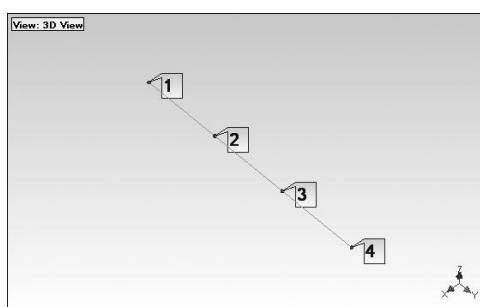
เมื่อพิจารณาผลเฉลย หรือผลการตอบสนองของระบบหนึ่งองศาอิสระเมื่อมีแรงกระทำที่สถานะคงตัว ดังสมการ (2.22) ซึ่งเป็น ผลเฉลยเฉพาะที่เกิดของแรงภายนอกที่มากกระทำกับระบบเมื่อแรง F เป็นค่าที่ทราบ หรือสามารถกำหนดได้ เป็นอินพุตในการกระตุ้นให้เกิดการสั่นขึ้นเทอมของ ฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ $\alpha(\omega)$ จะขึ้นกับฟังก์ชันของแรงนั้น ๆ โดยตรง ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการอธิบายคุณลักษณะทางกายภาพของระบบ เรียกการพิจารณาลักษณะนี้ว่าการทดสอบโมดอล ที่ได้อธิบายหลักการทางทฤษฎีมาโดยละเอียดแล้ว

แต่หากแรง F เป็นค่าที่ไม่ทราบ หรือไม่สามารถกำหนดได้ในขณะทำงาน จึงเป็นเรื่องยากที่จะหาฟังก์ชันการตอบสนอง $\alpha(\omega)$ นี้ได้ จึงได้มีเทคนิคการวัดรูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน (ODS) ในทางปฏิบัติขึ้น เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของจุดใด ๆ บนโครงสร้างหรือเครื่องจักรเทียบกับจุดอื่น ๆ โดยนำข้อมูลในแต่ละตำแหน่งซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่มีทั้งขนาด และทิศทางของผลการตอบสนองจริงที่ได้จากการวัด แล้วส่งผ่านข้อมูลการสั่นที่ได้จากการทำงานไปยังจุดต่าง ๆ บนโครงสร้างในการอธิบายพฤติกรรม มีรูปแบบการเก็บข้อมูลดังนี้

2.12.1 การเก็บข้อมูลในการพิจารณาแบบจุดเดียว

ใช้เครื่องมือวัดเพื่อทำการเก็บข้อมูลจากหัววัดการสั่นสะเทือน และใช้ตัววัดความเร็วรอบ (tachometer) ด้วยการจับตำแหน่ง (trigger) การหมุนของเพลลา สำหรับอ้างตำแหน่งหรือเฟส โดยสัญญาณพัลส์ (pulse) จากตัววัดความเร็วรอบ จะให้ความถี่ที่เท่ากับความถี่ของการหมุนของเพลลา และการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือน ทำได้โดยการเคลื่อนย้ายหัววัดไปยังตำแหน่งที่ต้องการวัด หรือบริเวณจุดต่าง ๆ ของโครงสร้าง ซึ่งต้องสอดคล้องกับจุดข้อมูลในแบบจำลองที่ออกแบบไว้ และทุกจุดวัด ต้องเก็บข้อมูลพร้อมกับตัววัดความเร็วรอบ

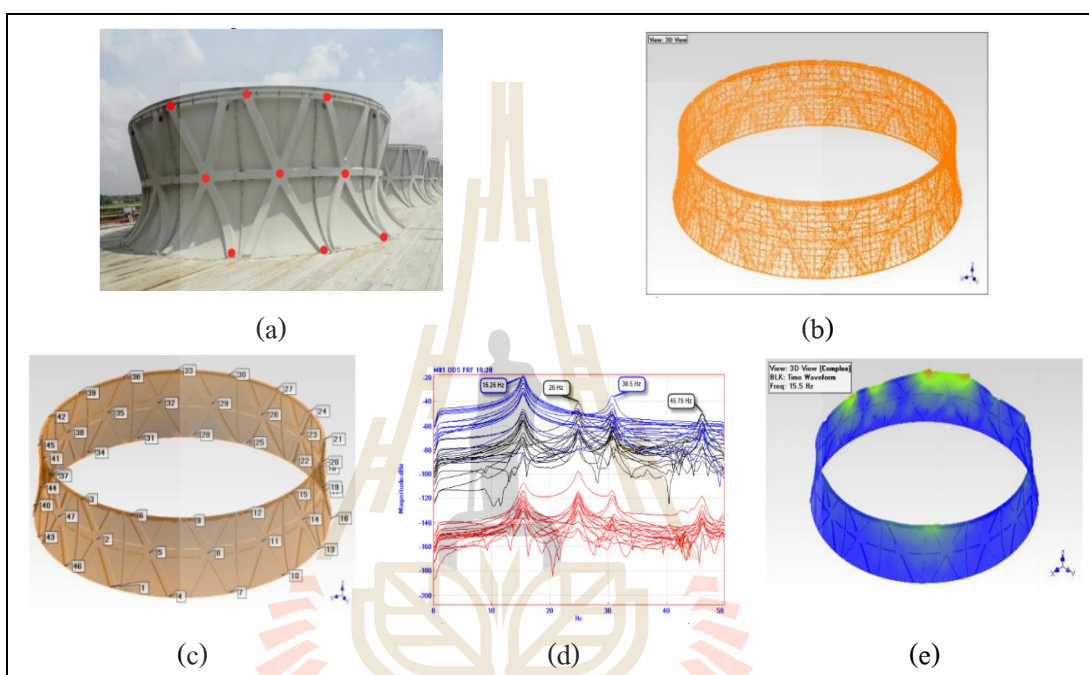
ตัวอย่างการทดสอบรูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน โดยกำหนดจุดข้อมูล 4 จุด และสามารถวัดข้อมูลได้ทุกจุด ซึ่งแบบจำลองโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งมีการกำหนดหมายเลขไว้ในแต่ละจุด คือ 1 ถึง 4 โดยการวัดขนาดการสั่นสะเทือนในแต่ละองศาอิสระของจุดวัด พร้อมทั้งเฟสสัมพันธ์ (relative) ของแต่ละองศาอิสระของจุดวัดนั้นเทียบกับองศาอิสระของจุดอ้างอิง โดยเฟสสัมพันธ์ขององศาอิสระสามารถคำนวณได้จาก เฟสเทียบกับตัววัดความเร็วรอบของจุดวัดใหม่กับเฟสเทียบตัววัดความเร็วรอบของจุดวัดอ้างอิง โดยใช้หัววัดความเร่ง (accelerometer sensor) ทำการวัดการสั่นสะเทือนในแต่ละจุดทั้ง 3 ทิศทาง แล้วใช้ซอฟต์แวร์รูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานทั่วไปได้ โดยตัวอย่างนี้ใช้ซอฟต์แวร์ ME'scopeVES ในการสร้างการเคลื่อนไหว



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการจำลองการวัดแบบจุดเดียว

2.12.2 การเก็บข้อมูลในการพิจารณาแบบหลายจุดวัด

เป็นการเก็บข้อมูลที่เหมาะกับการนำไปวิเคราะห์บน โดเมนความถี่ หรือบางครั้งเรียกว่า สเปกตรัม (spectrum) นิยมนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลที่มีจำนวนจุดวัดมาก ๆ โดยการวัดจะทำการเก็บข้อมูลที่เป็นฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งเป็นการถ่ายโอนระหว่างอินพุตเทียบกับเอาต์พุต (เอาต์พุต/อินพุต) กล่าวคือ การเก็บข้อมูลที่จุดหนึ่งเทียบกับอีกจุดหนึ่ง ควบคู่กันไปตลอด



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการวัดแบบหลายจุดของปล่องลมระบายความร้อนขนาดใหญ่

ในกรณีการวัดที่ไม่สามารถวัดแรงกระทำต่าง ๆ กับ โครงสร้างทั้งหมดได้ จะใช้การวัดการสั่นสะเทือนเปรียบเทียบกันระหว่างสองตำแหน่ง (หรือมากกว่า) โดยเอาต์พุตคือการสั่นจากหัววัดการสั่นสะเทือนที่เคลื่อนย้ายไปยังจุดต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ (roving response) ส่วนอินพุตจะเป็นการสั่นที่วัดจากหัววัดการสั่นสะเทือนในตำแหน่งที่กำหนดเป็นจุดอ้างอิง ซึ่งติดอยู่ในตำแหน่งเดิมตลอดการวัด (fixed reference response) ข้อมูลฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากการวัดแบบนี้เรียกว่า การส่งผ่าน ซึ่งปกติการวัดการสั่นสะเทือนในองศาอิสระอ้างอิงจะใช้หัววัดแบบแกนเดียว (single axis) เพื่อวัดเพียงหนึ่งองศาอิสระเพียงพอ โดยเลือกวัดในตำแหน่ง และทิศทางที่มีการสั่นชัดเจนตลอดย่านความถี่ที่วัดแล้วใช้ช่องสัญญาณที่เหลือสำหรับวัดการสั่นจากหัววัดการสั่นสะเทือน ที่วางในตำแหน่งที่ต้องการเคลื่อนหัววัดไป การเก็บข้อมูลในตำแหน่งต่าง ๆ ควรเก็บให้ครบทั้งสาม

ทิศทาง สำหรับตำแหน่ง และทิศทางใดที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลหรือเข้าถึงได้ เนื่องจากความปลอดภัยหรือข้อจำกัดต่าง ๆ สามารถเลือกเก็บได้ตามแบบจำลองที่สร้างขึ้น และในซอฟต์แวร์จะมีความสามารถในการใช้ข้อมูลที่เก็บได้จากตำแหน่งอื่น ๆ ข้างเคียง มาทำการประมาณค่า (interpolation) และกำหนดค่าให้กับจุดวัดที่ไม่มีข้อมูล เพื่อแสดงการเคลื่อนไหวที่สมจริง

ตัวอย่างการวัดแบบหลายจุดของปล่องลมระบายความร้อนขนาดใหญ่ (วินัย และคณะ 2012) แสดงดังรูปที่ 2.9 เริ่มต้นด้วย (a) การสำรวจจุดวัดจริงที่เป็นไปได้ (b) สร้างแบบจำลองโดยประมาณ (c) กำหนดจุดวัดในแบบจำลองที่สัมพันธ์กับจุดวัดจริง (d) เก็บข้อมูลการวัด ในรูปแบบฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่การส่งผ่าน (e) พิจารณาภาพเคลื่อนไหวประกอบการวิเคราะห์ผล

2.13 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปแล้วสามารถจำแนกแบริ่งแม่เหล็กออกเป็น 2 ลักษณะตามการกระตุ้นคือ แบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น (active magnetic bearing หรือ AMB) จะอาศัยการควบคุมป้อนกลับไปยังแกนแม่เหล็ก ทำให้สามารถกระตุ้นแรงแม่เหล็กภายในแบริ่งได้ หากไม่มีการกระตุ้นหรือควบคุมป้อนกลับ จะเรียกว่า แบริ่งแม่เหล็กแบบไม่กระตุ้น (passive magnetic bearing หรือ PMB) ซึ่งอาศัยการเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กถาวรเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถที่จะรักษาเสถียรภาพของสนามแม่เหล็กถาวรที่มีได้ อย่างไรก็ตาม การรวมกันระหว่าง active กับ passive สามารถที่จะแก้ปัญหาที่เป็นประโยชน์ได้มาก หรืออาจจำแนกตามทิศทางการรับภาระกรรมคือ แบบแนวแกน (axial หรือ thrust) และแบบแนวรัศมี (radial หรือ journal) เป็นต้น (Knospe และคณะ 2007)

การออกแบบโครงสร้างต่าง ๆ ของระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น ถูกสร้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีที่ไม่ต้องการใช้สารหล่อลื่น และไม่มีการสัมผัสระหว่างโรเตอร์กับตัวรองรับ (Bleuler 1992 และ Okada 2002) ในระบบจะประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมระบบทางไฟฟ้า เช่น ตัวขยายกำลัง (power amplifier) ระบบควบคุม และเซ็นเซอร์เมื่อโรเตอร์ลอยอยู่ในอากาศอย่างเป็นอิสระ เซ็นเซอร์วัดการกระจัดของโรเตอร์จากตำแหน่งอ้างอิงเพื่อป้อนสัญญาณไปควบคุมหรือรักษาตำแหน่งของโรเตอร์ให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการโดยใช้สมดุลของแรงแม่เหล็กที่ได้จากการป้อนกระแสเทียบกับน้ำหนักของโรเตอร์หรือแรงที่กระทำกับโรเตอร์ ซึ่งตัวควบคุมจะปรับตัวขยายกำลัง ผ่านกระแสไปยังขดลวดที่พันอยู่กับแบริ่งแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันสนามแม่เหล็กจะปรับแรงแม่เหล็กได้ตามจุดสมดุลที่อ้างอิงไว้ ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น โดยต้องมีการควบคุมการป้อนกลับของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะให้โรเตอร์ลอยตัวภายใต้เงื่อนไขที่ไม่สัมผัสกัน แต่เนื่องจากความไม่มีเสถียรภาพ

และไม่เป็นเชิงเส้นของโรเตอร์ที่รองรับด้วยเบริงแม่เหล็ก จึงต้องออกแบบระบบควบคุมให้สามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ (Schweitzer 2009) นอกจากนี้ ความเกี่ยวข้องจากแบบจำลองของระบบรองรับ ปัญหาความไม่สมดุลที่พบในเครื่องจักรหมุน ลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นอื่น ๆ ทั้งสนามแม่เหล็ก ผลกระทบจากใจโร และรูปร่างโหมคในการทำงาน (Li และคณะ 2006) สามารถจำแนกผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แบ่งออกเป็นกลุ่ม ๆ ดังนี้

2.13.1 ความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น

ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น เพื่อนำไปพิจารณา ออกแบบ และสร้างระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีที่มีการรองรับด้านเดียวแบบปลายอื่น แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น

คณะผู้วิจัย/ปีที่วิจัย	ที่มา/จุดประสงค์การศึกษา	วิธีการ/เทคนิค
Setiawan และคณะ 1999	ความไม่เป็นเชิงเส้นของสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเซ็นเซอร์ที่วัดจากพื้นผิวของเพลลา	ใช้เทคนิคป้อนไปข้างหน้า (feed-forward) เพื่อหักล้างเทอมการรบกวนของสัญญาณ โดยออกแบบการปรับตัวเพื่อชดเชยสัญญาณเซ็นเซอร์ด้วยหลักการเสถียรภาพของ Lyapunov
Ji และ Hansen 2001	ความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเบริงแม่เหล็ก ทำให้ไม่สามารถอธิบายในแบบจำลองเชิงเส้นได้	ใช้การกำหนด 4 อันดับแรกของสมการอนุพันธ์สามัญเพื่อปรับแอมพลิจูด และเฟสของการสั่น
Castro และคณะ 2007	ศึกษาความไม่เป็นเชิงเส้นของพื้นผิวของการกระตุ้น ทั้งแบบเรียบ และ โคง	ใช้อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดกระตุ้นกับช่องว่างอากาศ ด้วยการประมาณความหนาแน่นของฟลักซ์จากการวัดด้วยเซ็นเซอร์ hall

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น (ต่อ)

คณะผู้วิจัย/ปีที่วิจัย	ที่มา/จุดประสงค์การศึกษา	วิธีการ/เทคนิค
Sivrioglu 2007	นำเสนอการหาพารามิเตอร์ของระบบแม่เหล็กที่ไม่สามารถหาค่าได้ เพื่อออกแบบตัวควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพ	ใช้การควบคุมการปรับตัวประเภทเอาต์พุตแบคสเต็ป (output –type adaptive back stepping) เพื่อประมาณค่าการปรับตัวของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า จากการอนุพันธ์กฎการควบคุม

2.13.2 ตัวควบคุมของระบบรองรับด้วยแม่เหล็ก

ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมของระบบรองรับด้วยแม่เหล็ก เพื่อออกแบบตัวควบคุม และชดเชยความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุน แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมของระบบรองรับด้วยแม่เหล็ก

คณะผู้วิจัย/ปีที่วิจัย	ที่มา/จุดประสงค์การศึกษา	วิธีการ/เทคนิค
Lum และคณะ 1996	การทำงานของความเร็วการหมุนที่เปลี่ยนแปลง จะทำให้ไม่สามารถหาค่าความไม่สมดุลของโรเตอร์ได้	ใช้การระบุเอกลักษณ์ออนไลน์ของระบบที่มีความไม่สมดุล ด้วยการชดเชยการปรับตัวป้อนไปข้างหน้า (adaptive feed-forward)
Herzog และคณะ 1996	ศึกษาการแก้ปัญหาความไม่สมดุลของโรเตอร์แม่เหล็กที่ลอยอยู่ในอากาศ	ใช้การกรองสัญญาณช่วงแคบจากตัวกรองนอตช์ (notch) ที่ถูกแทรกเพื่อประมาณป้อนกลับรอบ
Kasarda 2000	การเชื่อมโยงกัน (coupling) ในแต่ละทิศทางเคลื่อนที่ ทำให้ระบบมีความซับซ้อนในการออกแบบตัวควบคุม	ใช้ตัวควบคุมติดตามตำแหน่งอ้างอิงการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนแยกอิสระต่อกัน ทำงานได้ในช่วงรอบจำกัด

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมของระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็ก (ต่อ)

คณะผู้วิจัย/ปีที่วิจัย	ที่มา/จุดประสงค์การศึกษา	วิธีการ/เทคนิค
Zhuravlyov และคณะ 2000	ศึกษาตัวควบคุมกำลังสองเชิงเส้น (LQR) ในการควบคุมระบบเบริงแม่เหล็ก	ใช้การหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าสถานะทั้งหมด และต้องเป็นค่าวัดได้ ด้วยการเลือกเมทริกซ์น้ำหนัก (weighting matrices) และการจำกัดแบนด์วิดท์
Choi 2002	ศึกษาความไม่สมดุลเนื่องจากมวลเมื่อแกนเฉื่อยของเพลานำไม่ตรงกับแกนทางเรขาคณิต ทำให้เพลานำหมุนเกิดแรงหนีศูนย์กลางส่งผ่านไปยังจุดรองรับ ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบการหมุน	ใช้ช่องว่างระหว่างเบริงกับโรเตอร์ในการอธิบายผลที่ก่อให้เกิดการเสียหายเมื่อทำงานที่ความเร็วรอบสูง
Hong และคณะ 2003	ศึกษาพลวัตของระบบเบริงแม่เหล็ก ที่ค่าสถานะทั้งหมดวัดได้	ใช้การเลือกโพล (pole placement) ของระบบปิด เพื่อจำกัดแบนด์วิดท์ และจัดการสัญญาณรบกวนของเซ็นเซอร์
Li และคณะ 2003	สัญญาณฮาร์โมนิกส์จากตำแหน่งที่วัดเพื่อชดเชย หรือลดทอนในทิศทางตรงกันข้ามกับความไม่สมดุล ทำให้การหมุนรอบจุดศูนย์กลางการหมุน และจุดศูนย์กลางมวลไม่มีความแม่นยำ	เพิ่มการชดเชยตัวแปรความเร็วการหมุน และเปลี่ยนตัวแปรเพิ่มลดเข้าไปซ้ำมา
Polajzer และคณะ 2006	ศึกษาตัวควบคุมพีดี พีไอ และพีไอดี ในการควบคุมระบบเบริงแม่เหล็ก	ใช้การเปรียบเทียบ และปรับตัวควบคุมให้เหมาะสมกับฮาร์ดแวร์

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมของระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็ก (ต่อ)

คณะผู้วิจัย/ปีที่วิจัย	ที่มา/จุดประสงค์การศึกษา	วิธีการ/เทคนิค
Matras และคณะ 2006	ศึกษาการรบกวนความไม่สมดุล	ใช้การควบคุมปรับตัวได้ (adaptive control) ในเทอมความเร็วการทำงาน
Sabirin และคณะ 2007	เสนอแบบจำลองในการ simulation และควบคุมระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี	ใช้ตัวควบคุมพีไอดีบนบริภูมิสถานะ ร่วมกับวิธีการควบคุมกำลังสองเชิงเส้น (LQR)
De Queiroz และคณะ 2008	ศึกษาความไม่สมดุลของการหมุน	ใช้การระบุเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบจากขนาดความไม่สมดุล
Inoue และคณะ 2009	ศึกษาความไม่สมดุลที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องในหลายๆ จุดของที่ความเร็ววิกฤตที่สอดคล้องกับรูปร่างการสั่นที่แตกต่างกัน	ใช้ตัวสังเกตการรบกวนในการหักล้าง โดยใช้เทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้น อธิบายขนาดของความไม่สมดุล
Chen และคณะ 2009	เสนอตัวควบคุมพีดีบนแบบจำลองเชิงเส้น	ใช้ fuzzy ในการจูนหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเพื่อชดเชยความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น
Kang และคณะ 2010	ศึกษาการควบคุมแบบเลื่อน (sliding mode control) สำหรับแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น และระบบที่มีการรบกวน	ใช้การกำหนดโพลของลูปวงปิด เพื่อออกแบบพื้นผิวเลื่อน (sliding surfaces) ด้วยการ switching การทำงานของรีเลย์
Kejian และคณะ 2012	เสนอการสร้างความสัมพันธ์ภายใน สำหรับการชดเชยความไม่สมดุล	ใช้การควบคุมความเสมือนด้วยการสลับตัวควบคุมตำแหน่ง ในวงลูปการควบคุม

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมของระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็ก (ต่อ)

คณะผู้วิจัย/ปีที่วิจัย	ที่มา/จุดประสงค์การศึกษา	วิธีการ/เทคนิค
Kejian และคณะ 2015	เสนอการเวียนซ้ำ (recursive seeking) เพื่อหาตำแหน่งของมวลที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลในระบบโรเตอร์ที่มีเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น	ใช้เงื่อนไขความแตกต่างของเฟสความไม่สมดุล และความแตกต่างของ step sizes ในการเวียนซ้ำ เพื่อดูความแตกต่างของสัญญาณรบกวนที่ความเร็วรอบคงที่
Pesch และคณะ 2015	เสนอตัวควบคุม H_∞ บนแบบจำลองระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (MIMO)	ใช้ฟังก์ชันน้ำหนัก (weighting function) บนโดเมนความถี่ ในการออกแบบตัวควบคุม H_∞

2.13.3 การวินิจฉัยด้วยรูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน

ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องรูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน เพื่อเป็นแนวทางในการวินิจฉัยพฤติกรรมของระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีที่มีการรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่น แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยเกี่ยวกับการวินิจฉัยด้วยรูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน

คณะผู้วิจัย/ปีที่วิจัย	ที่มา/จุดประสงค์การศึกษา	วิธีการ/เทคนิค
Hu และคณะ 2017	เกิดความเสียหายของสายพานในกระบวนการผลิต	ทำนาย และพยากรณ์พฤติกรรมจากวัดการโก่งของสายพานการผลิต
Surendra และคณะ 2009	ศึกษาความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุน	ตรวจสอบจากแนวการหมุนของเพลลา
วินัย และคณะ 2012	วิเคราะห์การสั่นของปล่องลมระบายความร้อนขนาดใหญ่	ตรวจสอบจากรูปร่างการสั่น

จากผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สรุปได้ว่า

พารามิเตอร์ของระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น สัญญาณเซ็นเซอร์วัดการกระจัด และกำลังขับเคลื่อน มีผลต่อความเป็นเชิงเส้น และเสถียรภาพของระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น ดังนั้น ต้องมีการกำหนดการระดมทุนสูงสุดในการออกแบบที่สามารถรองรับได้ และต้องสอบเทียบหาช่วงการทำงานเชิงเส้น เพื่อใช้เป็นข้อกำหนดขอบเขตในการออกแบบตัวควบคุมเชิงเส้นของระบบที่สามารถควบคุมได้จริง

ความเกี่ยวโยงกันของระบบสมการในแต่ละทิศทางเคลื่อนที่ เกิดจากการเคลื่อนที่เชิงเส้น และเชิงมุมที่สัมพันธ์กับผลกระทบจากไจโร และตำแหน่งการรองรับ ทำให้แบบจำลองของระบบรองรับมีความซับซ้อน ดังนั้น การนำเงื่อนไขทางกายภาพของโรเตอร์ และขนาดการสั่นที่ตำแหน่งรองรับมาพิจารณา ซึ่งสามารถลดรูปสมการทางพลวัตของระบบรองรับที่เกี่ยวข้องกันได้ ทำให้ได้สมการที่แยกอิสระในแต่ละทิศทาง เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบแยกอิสระที่มีการชดเชยความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุนได้

การวินิจฉัยด้วยรูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน สามารถนำไปใช้ตรวจสอบพฤติกรรมที่เกิดจากภาระจริงขณะทำงานของระบบรองรับด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้น ในแนวรัศมีที่มีการรองรับด้านเดียวแบบเปลี่ยนได้



บทที่ 3

ระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี

การป้อนกระแสไฟฟ้าที่พันรอบแกนเหล็ก ทำให้เกิดแรงจากสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับแกนเพียงอย่างเดียว หากนำมาประกอบเป็นระบบ จะสามารถบังคับหรือควบคุมทิศทางได้อย่างอิสระ (ทิศทางบวกหรือลบ) ในตำแหน่งสมมูลได้ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ และงานวิจัยนี้ได้นำระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยความสัมพันธ์ทางไฟฟ้า และคุณสมบัติแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างของการกระตุ้นระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ เพื่อสร้างแรงแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกัน ด้วยการรวมแรงในทิศทางหลัก โดยพิจารณาลักษณะของแรงที่เป็นอิสระต่อกันในแต่ละทิศทาง ในบทนี้จะอธิบายการออกแบบ การคำนวณโครงสร้างทางกายภาพต่าง ๆ และสร้างระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี ที่มีความสามารถรองรับภาระกรรมสถิติสูงสุดได้ 200 นิวตัน แล้วสอบเทียบเพื่อหาอัตราขยายของทั้งกำลังขับ และอัตราขยายจากเซ็นเซอร์วัดการกระตุ้น รวมทั้งพิจารณาคุณลักษณะเฉพาะเชิงเส้นของแรงลัพท์ระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น ในการกำหนดขอบเขตในการควบคุมเชิงเส้น เพื่อใช้ในการทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี

การพิจารณาระบบเบริงแม่เหล็กแบบแยกทิศทางได้ โดยให้ตัวบ่งบอกทิศทางการอ้างอิงเรียกแทนด้วย แนวรัศมี ประกอบด้วยแนวนอน (horizontal) คือทิศทาง y และแนวตั้ง (vertical) คือทิศทาง z ของการรองรับ ถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ n ซึ่งการกระตุ้นของโรเตอร์จากตำแหน่งศูนย์กลาง คือ $n_0 = y_0 = z_0$ โดยมีทิศทางของกระแส คือ

$$i_+ = i_0 + i_n \quad \text{และ} \quad i_- = i_0 - i_n \quad (3.1)$$

แต่เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของแรงแม่เหล็ก โดยทั่วไปจะทำการลดหรือเพิ่มกระแสเริ่มต้น i_0 และให้การควบคุมกระแสคือ i_n เมื่อพิจารณาให้ i_0 มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของกระแสสูงสุด หรือกระแสอิ่มตัว (saturation) เพื่อใช้ควบคุมภายในช่วงทั้งหมดของการขยายกำลัง หรือสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแรงแม่เหล็กที่กระทำกับโรเตอร์ในแต่ละทิศทาง คือ

$$f_{mm} = f_{n+} - f_{n-} = k_m \left[\left(\frac{i_0 + i_n}{n_0 - n} \right)^2 - \left(\frac{i_0 - i_n}{n_0 + n} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

เมื่อ k_m คือค่าคงที่ของเบริงแม่เหล็ก และ α คือมุมของแกนเหล็กเทียบกับแนวตั้ง มีค่าเท่ากับ

$$k_m = \frac{\mu_0 A_a N^2 \cos(\alpha)}{4} \quad (3.3)$$

การทำให้เป็นเชิงเส้นของแรงแม่เหล็กสามารถใช้อนุกรมเทเลอร์อธิบายรอบจุดการทำงาน (operating) จากสมการ (3.2) จะเห็นได้ว่า มีเศษส่วนระหว่างค่ากระแส และการกระจัดเป็นฟังก์ชันกำลังสอง ดังนั้น สมการเชิงเส้นที่จุดการทำงานในทิศทางบวก ได้ว่า

$$f_{mm}(n_0 + n, i_0 + i_n) \cong f_{mm}(n_0, i_0) + n \frac{\partial f_{mm}(n_0, i_0)}{\partial n_0} + i_n \frac{\partial f_{mm}(n_0, i_0)}{\partial i_0} \quad (3.4)$$

เมื่อพิจารณา $i_n = 0$ และ $n = 0$ ทำให้แรงแม่เหล็กที่เป็นเชิงเส้นสำหรับกระแสควบคุม และการกระจัดในช่วงขนาดเล็ก ๆ มีสมการเชิงเส้น คือ

$$f_{mm} = k_i i_n - k_n n \quad (3.5)$$

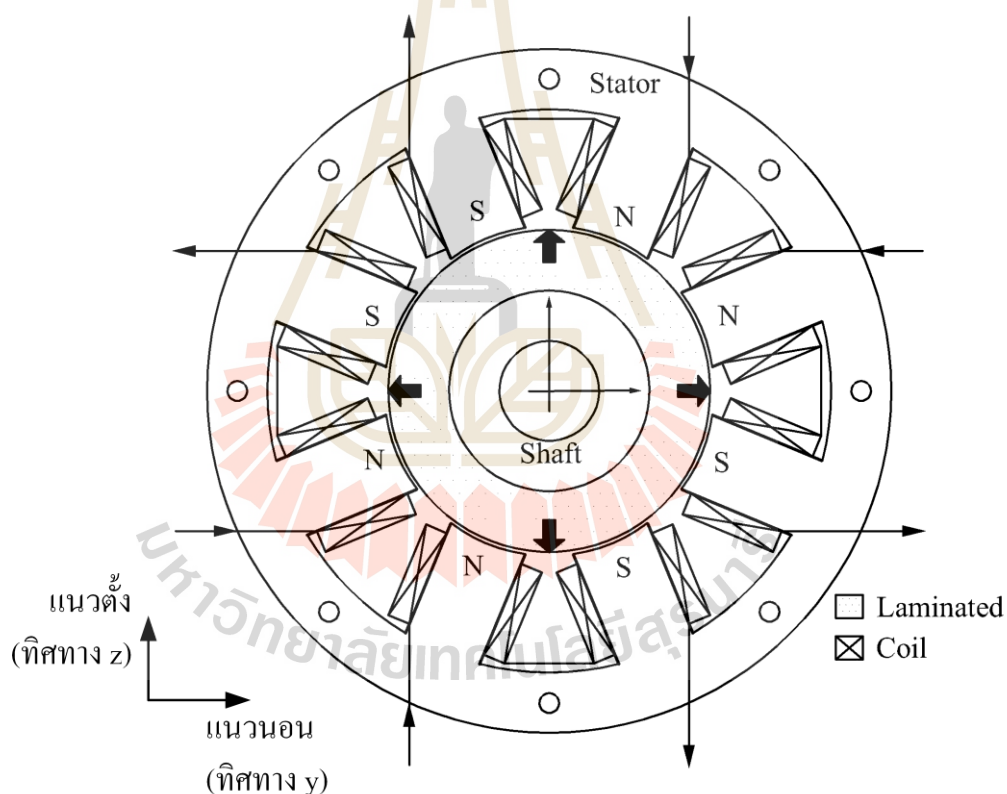
เมื่อ

$$\begin{aligned} k_i &= 4k_m \frac{i_0}{n_0^2} \\ k_n &= -4k_m \frac{i_0^2}{n_0^3} \end{aligned} \quad (3.6)$$

โดยที่ k_i เรียกว่า ค่าความแข็งแรงกระแส (current stiffness) และ k_n เรียกว่า ค่าความแข็งแรงการกระจัด (displacement stiffness) ของเบริงแม่เหล็ก

3.2 ข้อกำหนด และกายภาพของระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี

การพิจารณารูปแบบการพันขดลวดเข้ากับแกนขั้วแม่เหล็ก และการเชื่อมต่อการพันขดลวดไปยังแกนขั้วแม่เหล็กในแต่ละแกน ขึ้นกับการเลือกรูปแบบโหมดการขับเคลื่อนแรงแม่เหล็ก โดยมีข้อกำหนดในการพันคือ ขดลวดที่ถูกจัดเรียงต้องรักษาการคู่กลับของโรเตอร์ให้อยู่ในตำแหน่งสมดุลเท่าที่เป็นไปได้ เมื่อโรเตอร์มีการหมุน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้รูปแบบการขับเคลื่อนแรงแม่เหล็กแบบผลต่างกัน (Schweitzer 2009) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการควบคุม และไม่ซับซ้อน เนื่องจากมีกระแสในการควบคุมร่วมกันในแต่ละทิศทางเทียบกับระยะการกระตุ้นในทิศทางนั้น ๆ โดยกำหนดรูปแบบลำดับการจัดเรียงเป็น (N-S)-(S-N)-(N-S)-(S-N) เพื่อใช้ในการกำหนดทิศทาง การพันแกน และการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะการขับแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี

ในขั้นตอนแรก งานวิจัยนี้คำนึงความสามารถในการรับภาระกรรมของแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี ที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศที่มีพื้นที่สม่ำเสมอ สำหรับการประเมินความสามารถในการรับภาระกรรมสูงสุด เกิดจากความสามารถในการรับภาระกรรมสถิต f_{max} ของ

แม่เหล็กแบบกระตุ้น ซึ่งหาได้จากการพิจารณาพื้นที่ในรูปที่ 3.1 มีพื้นที่เพียง 50% ของพื้นที่ผิวที่สามารถสร้างแรงได้ คือ

$$A_a = 0.5 \frac{\pi r_p h}{8} \quad (3.7)$$

เมื่อ $r_p = r_d + n$ เป็นรัศมีของแกนเหล็กที่อยู่กับโครงสร้างเพื่อใช้ในการพันขดลวดทองแดง และ r_d คือรัศมีของแกนเหล็กที่หมุนไปกับแกนของเพลลา หรือรัศมีของโรเตอร์แม่เหล็ก มี h คือความยาวแนวแกนของขั้ว สำหรับการออกแบบได้เลือกใช้เหล็กแผ่นซิลิกอน (silicon steel sheet) ที่มีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1 ในการเรียงเป็นชั้น ๆ สำหรับทำโรเตอร์ และแม่เหล็กแบบกระตุ้น เนื่องจากมีความสามารถเชิงแม่เหล็กสูง ซึ่งแสดงถึงปริมาณเส้นฟลักซ์ข้ามผ่านช่องว่างอากาศจากแม่เหล็กมายังโรเตอร์ โดยทั่วไปแผ่นเหล็กซิลิกอนจึงมีความหนาแน่นฟลักซ์อยู่ในช่วง 1.7 – 2 เทสลา (tesla)

สำหรับการคำนวณความสามารถในการรับภาระกรรมสถิติสูงสุดของแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี และข้อกำหนดต่าง ๆ ในการออกแบบระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้นแสดงดังตารางที่ 3.1 สามารถแทนสมการ (3.7) ลงในสมการ (2.12) ได้ว่า

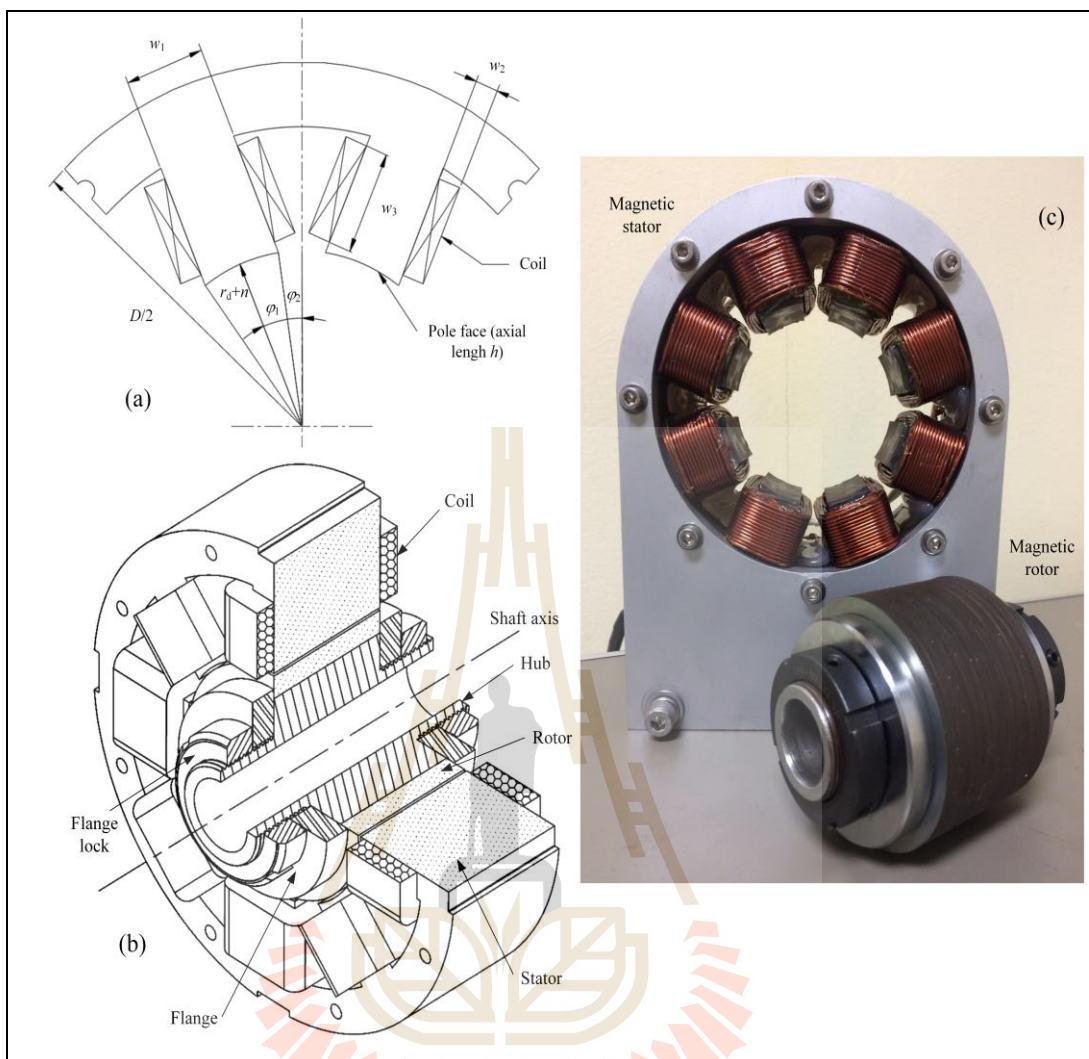
$$f_{\max} = \frac{0.5\pi r_p h B_{\max}^2}{8\mu_0} \cos \alpha \quad (3.8)$$

โดยค่า B_{\max} สัมพันธ์กับสมการ (2.8) เมื่อ i ถูกแทนด้วยค่าการทนกระแสชั่วขณะสูงสุด i_{\max}

ขั้นตอนถัดไปเป็นการพิจารณาลักษณะทางกายภาพของแม่เหล็กแบบกระตุ้น ดังรูปที่ 3.2 เพื่อใช้ในการออกแบบ ให้ w_1 คือความหนาของแกนขั้วแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นฟลักซ์ ดังนี้

$$w_1 = 2r_p \sin(\varphi_1) \quad (3.9)$$

ให้ w_2 คือความหนาสูงสุดของการพันขดลวด



รูปที่ 3.2 แผนภาพ (a) ข้อกำหนดขนาดในการออกแบบ (b) ภาพตัดสามมิติ และ (c) ภาพถ่ายเบร็งแม่เหล็กแบบกระตุ้นที่ได้ออกแบบ

เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถพันขดลวดในแกนขั้วแม่เหล็กได้ โดยใช้เป็นสัมประสิทธิ์ในการออกแบบ มีความสัมพันธ์ทางกายภาพ เขียนได้ว่า

$$w_2 \leq \{r_p \cos(\varphi_1)\} \tan(\alpha) - \frac{1}{2} w_1 \quad (3.10)$$

เมื่อ $\alpha = \varphi_1 + \varphi_2$ และให้ w_3 เป็นความยาวในการพันขดลวด ดังนั้น

$$w_3 = -r_p \cos(\varphi_1) + \left\{ \left(\frac{D}{2} - w_1 \right)^2 - \left(\frac{w_1 + w_2}{2} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (3.11)$$

โดย D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเบร้งแม่เหล็ก หรือขนาดของสเตเตอร์ด้านนอก ทำให้จำนวนรอบในการพันขดลวดสัมพันธ์กับพื้นที่ ดังนี้

$$N = \frac{w_2 w_3}{A_c^2} \quad (3.12)$$

ให้ A_c คือพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงที่ใช้พัน ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางกายภาพที่ได้จากการออกแบบ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดในการออกแบบระบบเบร้งแม่เหล็กแบบกระตุ้น

คำอธิบาย	พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
ความสามารถรับภาระกรรมสถิติสูงสุด	f_{\max}	200	N
จำนวนแกนขั้ว	n_p	8	-
จำนวนคู่ขั้วแรงแม่เหล็กไฟฟ้า	n_m	4	-
ช่องว่างอากาศ	n	1	mm
ครึ่งมุมระหว่างคู่ขั้ว	α	22.5	degree
รัศมีของโรเตอร์	r_d	40	mm
ความหนาของแกนขั้ว	w_1	20	mm
ความยาวแนวแกนของขั้ว (ความหนาโรเตอร์)	h	50	mm
เส้นผ่านศูนย์กลางสเตเตอร์ด้านนอก	D	170	mm
ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดต่อคู่ขั้ว	B_{\max}	≥ 0.822	tesla
กระแสควบคุมชั่วขณะสูงสุด	$i_{\max} = 2i$	10.6	A
จำนวนรอบการพันต่อคู่ขั้ว	$2N$	~ 120	rev
เบร้งลวดทองแดงมาตรฐาน S.W.G -17			
เส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองแดง	ϕ_c	1.4	mm
พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดง	A_c	1.54	mm ²
ทนกระแสต่อเนื่อง	i	5.3	amp
วัสดุทำโรเตอร์และเบร้งแม่เหล็กเหล็ก			
แผ่นซิลิกอน (50CS1500)	-	0.5/แผ่น	mm

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางกายภาพที่ได้จากการออกแบบ

คำอธิบาย	พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
พื้นที่แรงแม่เหล็กต่อแกนขั้ว	A_a	402 ^C	mm ²
จำนวนรอบการพันต่อแกนขั้ว	N	60	rev
ครึ่งมุมมองศาความหนาของแกนขั้ว	ϕ_1	14.12 ^C	degree
มุมมองศาสูงสุดพื้นที่พันขดลวด	ϕ_2	8.38 ^C	degree
ความหนาการพันขดลวด	w_2	≤ 6.46 ^C	mm
ความยาวในการพันขดลวด	w_3	≤ 23.12 ^C	mm
ความเหนี่ยวนำต่อคู่ขั้ว	L_s	9.7 – 9.8 ^M	mH
ความต้านทานต่อคู่ขั้ว	R_s	0.42 – 0.44 ^M	Ω

ตัว C คือค่าที่ได้จากการคำนวณ และ M คือค่าที่ได้จากการวัด

3.3 การสอบเทียบกำลังขับแบรีงแม่เหล็กแบบกระตุ้น

การเชื่อมต่อการสื่อสารเพื่อรับหรือส่งข้อมูล รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมระบบแบรีงแม่เหล็กแบบกระตุ้นนั้น ได้ใช้ MATLAB/Simulink ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในสาขาวิศวกรรมการควบคุม และมีความสามารถในการเชื่อมต่อกับบอร์ดประมวลผลข้อมูลที่เกิดจากบริษัทต่าง ๆ มีลักษณะการจำลองฮาร์ดแวร์ภายในคู่ปรวมกับระบบความจริงเสมือน (hardware-in-the-loop simulation) และทำงานบนซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้งานร่วมกับบอร์ดประมวลผลข้อมูลที่ทำแบบเวลาจริงบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ได้ โดยมีกล่องเครื่องมือเป็นซอฟต์แวร์เสริมอยู่ด้วย ทำให้สามารถจำลองการทำงานของกระบวนการได้ เมื่อสัญญาณเข้า และออกจากกระบวนการที่จำลองขึ้นเป็นสัญญาณจริงที่สามารถตรวจวัดได้ อีกทั้งยังมีความสามารถในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ทำงานแบบเวลาจริงได้ด้วย

ตารางที่ 3.3 ค่าลักษณะเฉพาะของบอร์ดขับกำลัง และเซ็นเซอร์วัดการกระจัด

บอร์ดขับกำลัง ¹		เซ็นเซอร์วัดการกระจัด ²	
โมเดล SE-HB40-1 แบบ H - Bridge		โมเดล FESTO – SIEA-M8B-PU-S แบบ ไม่สัมผัส	
ขนาดกำลังขับ	1000 Watt	ช่วงเชิงเส้น	0 – 4 mm
อินพุตขับ	3 – 5 V ไม่น้อยกว่า 8 mA	ช่วงความถี่ทำงาน	ไม่เกิน 1,600 Hz
เอาต์พุตขับ	24 V และ 40 amp (สูงสุด)	ความละเอียดในการวัด	น้อยกว่า 1 μ m
แบนด์วิดท์	400 – 20,000 Hz	เอาต์พุตเชิงเส้น	0 – 10 V และ 4 – 10 mA

ผลิตภัณฑ์ของ ¹บริษัท มณีสุรย์ จำกัด และ ²บริษัท เฟสโต้ จำกัด

สำหรับวงจรขับกำลังจะแปลงแรงดันไฟฟ้าขาออก ซึ่งแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่สัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายพลังงาน เพื่อสร้างการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า ป้อนให้กับเบร็งแม่เหล็ก ในทางปฏิบัติการพิจารณาพลศาสตร์ต่าง ๆ ของวงจรขับกำลังมีความซับซ้อน อีกทั้งไม่มีนัยสำคัญที่จะลงรายละเอียด เนื่องจากในปัจจุบันได้มีวงจรขับสำเร็จรูปมากมายในท้องตลาด อีกทั้งยังมีให้เลือกใช้หลากหลายขนาด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะพิจารณาฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรขับกำลังในรูปของสัดส่วนของสัญญาณควบคุมกับค่ากระแสที่ป้อนให้กับแกนขั้วแม่เหล็กเท่านั้น

แกนขั้วแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่สามารถดึงกระแสไฟฟ้าได้เกินกว่าที่พิกัดของไมโครคอนโทรลเลอร์จ่ายให้ได้ หากเชื่อมต่อขาเอาต์พุตไปยังแกนขั้วแม่เหล็กโดยตรงจะส่งผลให้วงจรที่ขับเอาต์พุตเสียหาย ดังนั้นต้องมีการควบคุมแกนขั้วแม่เหล็ก โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ป้อนเพียงสัญญาณควบคุม ไปยังตัวควบคุมกำลังกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงป้อนให้กับแกนขั้วแม่เหล็ก ซึ่งวงจรขับมอสเฟต (H-bridge) ที่สร้างจากทรานซิสเตอร์ 4 ตัว ที่มีวงจรการเรียงเต็มคลื่น (full-bridge) เป็นตัวควบคุมกำลัง แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.3 ส่วนสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นการควบคุมแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (pulse width modulation หรือ PWM) ส่งสัญญาณแบบแอนะล็อกจากซอฟต์แวร์ไปเป็นสัญญาณดิจิทัล ที่มีลักษณะสัญญาณเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมออกมา โดยสัญญาณที่สร้างออกมาจะสลับกันระหว่างเปิด (high) กับปิด (low) รูปแบบสัญญาณเปิด-ปิดนี้มีแรงดันไฟฟ้าระหว่างเปิด (5 โวลต์) กับปิด (0 โวลต์) ซึ่งช่วงของเวลาที่สัญญาณเปิด เมื่อเทียบกับช่วงเวลาที่สัญญาณออกมาทั้งหมด จะเรียกช่วงเวลาดังนี้ว่า ความกว้างของสัญญาณ ดังนั้นเพื่อให้ได้สัญญาณแบบดิจิทัลที่ต่างกัน จะใช้ความกว้างของสัญญาณที่แตกต่างกันในการบ่งบอกค่าของสัญญาณแอนะล็อก หากทำการป้อนสัญญาณควบคุม v จากไมโครคอนโทรลเลอร์ให้แกนขั้วแต่ละทิศทาง โดยใช้เทคนิคพัลส์วิดท์มอดูเลชันออกจากบอร์ดควบคุมเพื่อควบคุมชุดขับกำลัง ที่มี duty cycle (δ) จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความกว้างสัญญาณ มีความสัมพันธ์ ดังนี้

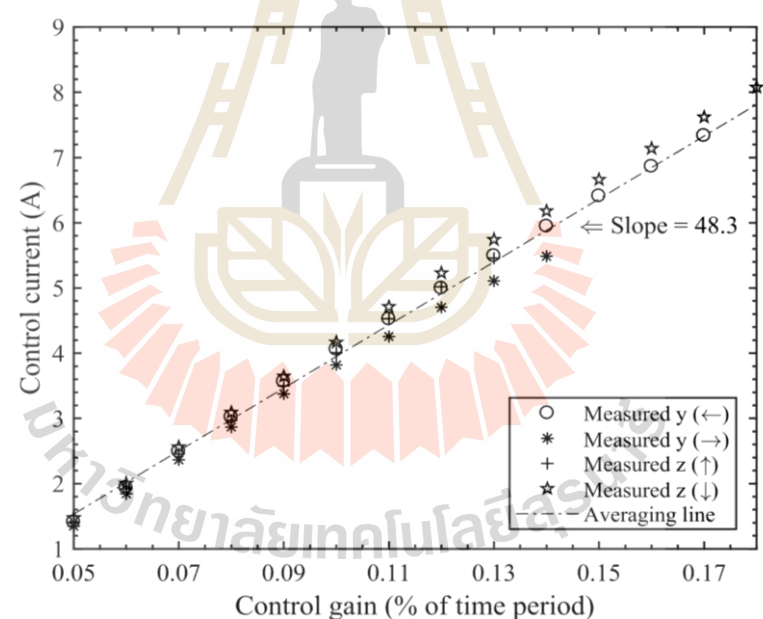
$$\delta \approx \begin{cases} 1, & v \geq 1 \\ v, & 0 < v < 1 \\ 0, & v \leq 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

จากสมการ (3.13) จะเห็นได้ว่า ถ้าค่าสัญญาณควบคุม v อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 จะทำให้ค่าสัญญาณควบคุม v มีค่าประมาณได้เท่ากับ δ ของสัญญาณควบคุมนั้น หากกำหนดความถี่ f ที่ใช้

คือ 1 กิโลเฮิร์ตจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะมีความกว้างสัญญาณ T เท่ากับ 1 มิลลิวินาที ในการควบคุม โดยจะทำการป้อนค่าสัญญาณควบคุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.05 (หมายความว่า δ จะเท่ากับ 5% ของ T) และเพิ่มขึ้นทีละ 0.01 โดยป้อนทีละคู่ซ้ำจนกว่าโรเตอร์จะเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับโครงสเตเตอร์ของเบริงแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม v กับค่ากระแส i ที่ป้อนให้กับแกนขั้วแม่เหล็กแต่ละคู่ มีค่าเป็นเชิงเส้น จึงสามารถนำมาเขียนเป็นสมการวงจรถับกำลัง มีสัดส่วนของสัญญาณควบคุมกับค่ากระแสที่ป้อนให้กับแกนขั้วแม่เหล็ก ดังนี้

$$i(t) = g_a v(t) \quad (3.14)$$

เมื่อค่าอัตราขยายของตัวขับเคลื่อนกำลังคือ g_a ซึ่งมีค่าเท่ากับความชัน คือ 48.3 แอมป์ต่อโวลต์ ที่วงจรถับรักษาพิคัดแรงดันคงที่ที่ 24 โวลต์



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุมกับค่ากระแสที่ป้อนให้กับแกนขั้ว

3.4 การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดการกระจัด

การเลือกเซ็นเซอร์ในการวัดการกระจัดนั้น ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้กับเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น ทั้งช่วงการวัด ความเป็นเชิงเส้น ค่าความไว (อัตราขยายเซ็นเซอร์) ความละเอียดในการวัด และช่วงความถี่ในการทำงาน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงเรื่อง อุณหภูมิ การรบกวนจากสนามแม่เหล็ก

ชุดขับกำลัง และการสั่นจากภายนอก เป็นต้น ดังนั้นการพิจารณาพลศาสตร์ของเซ็นเซอร์วัดการกระจัดของโรเตอร์จะใช้เซ็นเซอร์แบบไม่สัมผัสในแนวรัศมี ซึ่งเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ที่เป็นสัดส่วนของแรงดัน เทียบกับการกระจัดที่ตรวจวัดได้ รายละเอียดทางเทคนิคของเซ็นเซอร์ และสัญญาณสำหรับเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.3 โดยติดตั้งเซ็นเซอร์แบบไม่สัมผัสเทียบการกระจัดจริง และสอบเทียบกับไดอัลเกจ (มีช่วงการวัด 10 มิลลิเมตร ความเร็วในการตอบสนอง 2,000 มิลลิเมตรต่อวินาที) แสดงดังรูปที่ 3.4 ในที่นี้ยังคงใช้การปรับจูนค่าสัญญาณควบคุม v มีขั้นตอน ดังนี้

1. ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดการกระจัดแบบไม่สัมผัสให้อ่านแรงดันเซ็นเซอร์ v_s เท่ากับ 2.5 โวลต์ ซึ่งเป็นค่ากลางของสัญญาณเซ็นเซอร์ทั้งสองทิศทาง (โดยปรับให้อยู่ในช่วง 0 – 5 โวลต์ เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับค่าสัญญาณได้)
2. ใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ และให้ความถี่คัทออฟ f_c เท่ากับ 50 เฮิร์ต ในการกรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อป้องกันการรบกวนสัญญาณการวัด
3. ปรับค่าสัญญาณควบคุม v เพิ่มขึ้นหรือลดลง เพื่อควบคุมแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับโรเตอร์เบริงแม่เหล็กในแต่ละทิศทาง ทำให้โรเตอร์เข้าใกล้หรือออกห่างเบริงแม่เหล็ก ส่งผลให้ค่าแรงดันเซ็นเซอร์ v_s วัดการกระจัดเพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วย โดยให้เปลี่ยนแปลงทีละ 0.05 โวลต์
4. อ่านค่าเทียบกับการเปลี่ยนแปลงที่ไดอัลเกจ ซึ่งเป็นค่าการกระจัดของโรเตอร์ในช่องว่างอากาศ

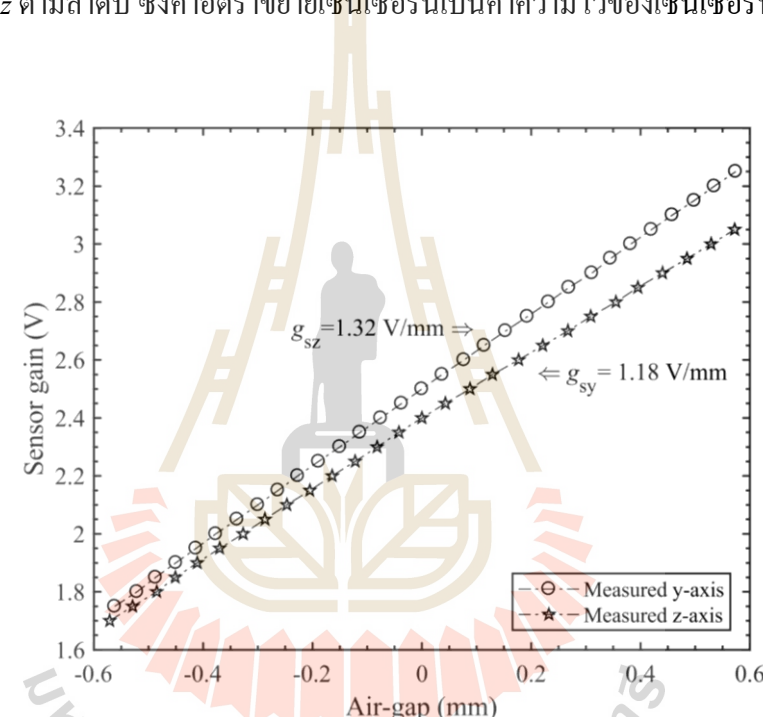


รูปที่ 3.4 การติดตั้งเพื่อสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดการกระจัดแบบไม่สัมผัสทั้งสองทิศทาง

จากรูปที่ 3.5 แสดงผลการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดการกระจัดแบบไม่สัมผัส จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซ็นเซอร์ v_s กับการกระจัดของโรเตอร์ n ในแต่ละทิศทาง สามารถเขียนสัดส่วนของสัญญาณเซ็นเซอร์กับการกระจัดของโรเตอร์ ได้ว่า

$$v_s(t) = g_{sn}n(t) \quad (3.15)$$

เมื่อค่าอัตราขยายเซ็นเซอร์คือ g_{sn} เป็นค่าความชัน มีค่าเท่ากับ 1.18 และ 1.32 โวลต์ต่อมิลลิเมตร ในทิศทาง y และ z ตามลำดับ ซึ่งค่าอัตราขยายเซ็นเซอร์นี้เป็นค่าความไวของเซ็นเซอร์นั่นเอง



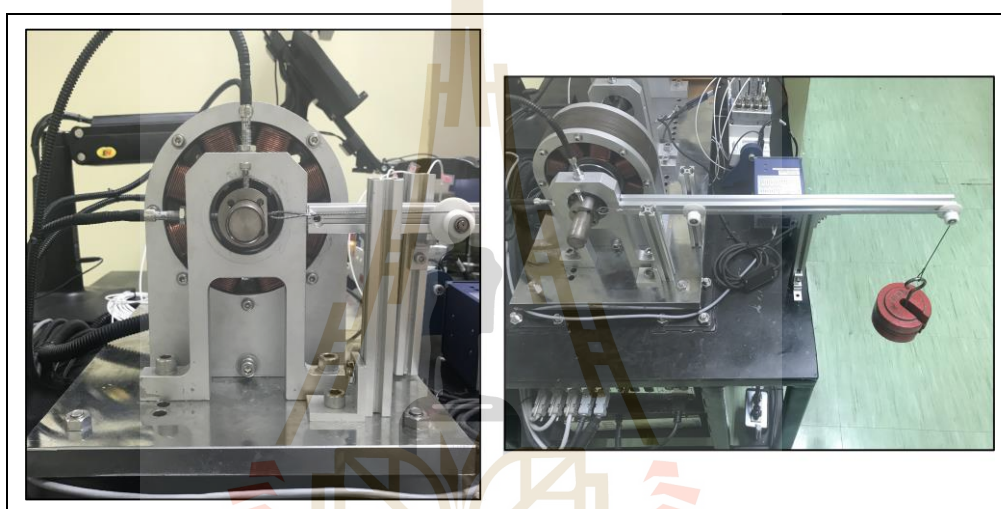
รูปที่ 3.5 ผลการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดการกระจัดในช่องว่างอากาศ

3.5 ความเป็นเชิงเส้นของแรงลัพท์ระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น

การหาความสัมพันธ์แรงแม่เหล็ก ณ จุดทำงาน สามารถอธิบายได้ตามสมการ (3.5) ซึ่งเป็นสมการทางทฤษฎี แต่บางครั้งมีหลายปัจจัยที่มีผลให้ค่าที่ได้จากทฤษฎีมีความคลาดเคลื่อน ทำให้ในทุก ๆ การทดลอง ต้องตรวจสอบหรือสอบเทียบ และกำหนดขอบเขตในการทำงานที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ก่อน ดังนั้น ในส่วนนี้จะเป็นการสอบเทียบความสามารถในการควบคุมแรงแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังเป็นการพิสูจน์ทราบความเป็นเชิงเส้น ณ จุดสมดุลที่เป็นคุณลักษณะเฉพาะของเบริงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบกระตุ้น

3.5.1 การกระจัดในช่องว่างอากาศ n คงที่ (1 มิลลิเมตร)

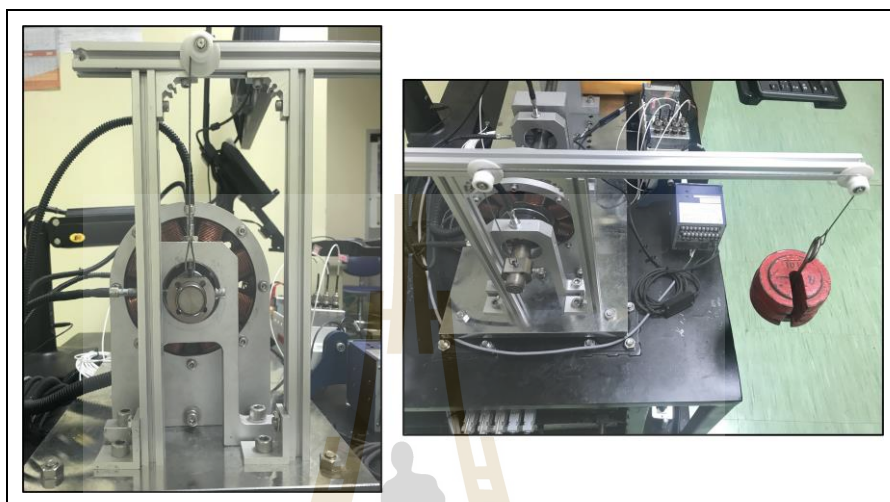
สมมติให้ กระแสควบคุม i_n ในทิศทางที่พิจารณา มีค่าเท่ากับกระแสไบแอส (bias current) หรือกระแสเริ่มต้น (nominal current) i_0 โดยใช้การปรับกระแสในการควบคุมเพื่อรักษา ระยะช่องว่างให้สมดุลตลอดเวลา และได้ประยุกต์ใช้เทคนิคแรงดึงในทิศทางตั้งฉาก ด้วยการใส่ โหลดน้ำหนักที่ทราบค่าจาก 10 ถึง 140 นิวตัน (กำหนดให้เป็นค่าสูงสุดที่สามารถสอบเทียบได้) และเพิ่มขึ้นทีละ 10 นิวตันตามลำดับ มีการติดตั้งอุปกรณ์การสอบเทียบแรงลัพธ์แบร์ริง แม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละแนวแกนแสดงดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ



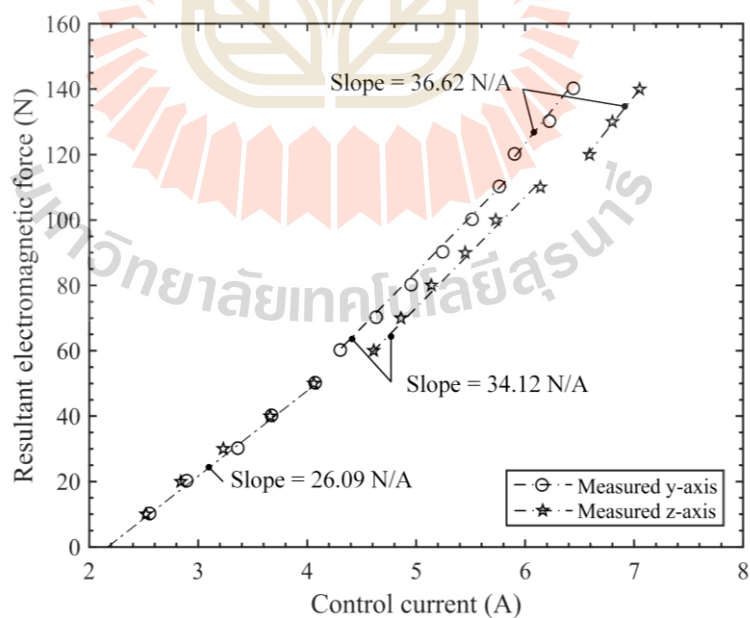
รูปที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์การสอบเทียบแรงลัพธ์แบร์ริงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวนอน

จากรูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงลัพธ์แบร์ริงแม่เหล็กไฟฟ้ากับกระแสควบคุม ซึ่งเป็นการควบคุมแรงลัพธ์แบร์ริงแม่เหล็กไฟฟ้าภายในช่องว่างอากาศคงที่ มีความเป็นเชิงเส้นในการควบคุมเป็นช่วง ๆ ทั้งในแนวนอน (ทิศทาง y) และแนวตั้ง (ทิศทาง z) ตามลำดับ โดยสัมพันธ์กับสัญญาณควบคุมกับค่ากระแสควบคุมที่ป้อนให้กับแกนขั้วแม่เหล็ก จากตารางที่ 3.2 การทนกระแสต่อเนื่องไม่เกิน 5.3 แอมป์ ที่สอดคล้องกับการทดสอบจึงใช้ช่วงกระแสควบคุมต่อเนื่องไม่เกิน 4 แอมป์ อธิบายเชิงเส้นดังสมการ (3.5) ที่มีความชัน 26.09 นิวตันต่อแอมป์ หลังจากช่วงนี้เปลี่ยนแปลงความชันเป็น 34.12 และ 36.62 นิวตันต่อแอมป์ รวมถึงมีการออฟเซต (offset) ระหว่างแนวแกนที่ต่างกันตามลำดับ เป็นผลมาจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเบี่ยงเบนการกระจัดของโรเตอร์แบร์ริงแม่เหล็กมากขึ้นอย่างไม่สมมาตร นั้นหมายความว่าแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งสูงกว่า ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงเชิงเส้นใหม่ ดังนั้นกระแสควบคุมจะสามารถควบคุมความเป็น

เชิงเส้นได้เป็นช่วง ๆ ขึ้นกับสมมูลแรงลัพท์ในช่วงนั้น ๆ ด้วยเหตุนี้ จึงใช้ช่วงกระแสควบคุมต่อเนื่องไม่เกิน 4 แอมป์ ถ้าให้การกระจัดในช่องว่างอากาศเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และประมาณค่า i_0 เป็นครึ่งหนึ่งของค่าต่ำสุดของค่ากระแสควบคุมสูงสุดต่อเนื่องหรือค่ากระแสอิ่มตัว



รูปที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์การสอบเทียบแรงลัพท์เบริงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวตั้ง

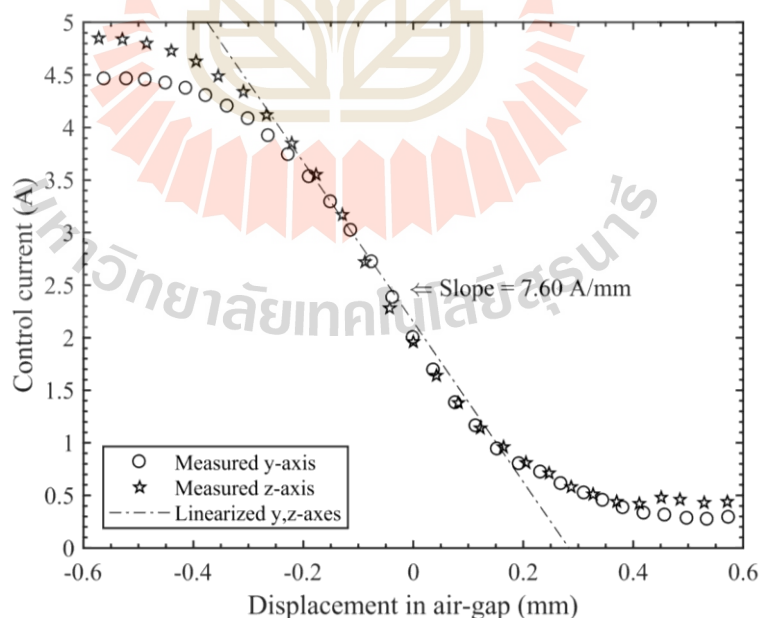


รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงลัพท์เบริงแม่เหล็กไฟฟ้ากับกระแสควบคุม

3.5.2 กระแสควบคุม i_n คงที่

ในลำดับถัดไปเป็นการพิสูจน์ทราบความเป็นเชิงเส้น โดยสมมติให้กระแสเริ่มต้น i_0 เท่ากับ 2 แอมป์ (กระแสเริ่มต้นเป็นครึ่งหนึ่งของกระแสควบคุมสูงสุดต่อเนื่อง) โดยให้สัญญาณแรงดันเซ็นเซอร์วัดการกระจัด v_s เท่ากับ 2.5 โวลต์ ซึ่งเป็นค่ากลางของสัญญาณที่สัมพันธ์กับการกระจัด n ดังรูปที่ 3.5 โดยปรับค่าสัญญาณควบคุม v เพิ่มขึ้นหรือลดลงสัมพันธ์กับค่ากระแส i_n ที่ป้อนให้กับแกนขั้วแม่เหล็ก ทำให้ค่าแรงดันที่เซ็นเซอร์วัดการกระจัด v_n อ่านค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วย โดยให้เปลี่ยนแปลงทีละ 0.05 โวลต์

จากรูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสควบคุมกับการกระจัดในช่องว่างอากาศภายในเบร็งแม่เหล็กไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าในช่วงกระแสควบคุมประมาณ 0.5 – 4 แอมป์ มีความชันเป็นลบ และเป็นเส้นตรง มีค่าเท่ากับ 7.6 แอมป์ต่อมิลลิเมตร ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานในการควบคุมเชิงเส้นมีค่าอยู่ในช่วง 4 แอมป์ และมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นนอกช่วงกระแสควบคุมตามทฤษฎีที่ได้อธิบายไว้แล้ว โดยมีการกระจัดในช่องว่างอากาศของระบบเบร็งแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถควบคุมเชิงเส้นได้จำกัดเพียง ± 0.2 มิลลิเมตร นั้นหมายความว่า ระบบเบร็งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีในงานวิจัยนี้ มีความสามารถควบคุมเชิงเส้น ที่ใช้ตัวควบคุมทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อมีการกระจัดไม่เกิน ± 0.2 มิลลิเมตร (200 ไมครอน) เท่านั้น



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสควบคุมกับการกระจัดในช่องว่างอากาศภายในแบบแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 3.4 ค่าลักษณะเฉพาะของระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวนอน

คำอธิบาย	พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
กระแสเริ่มต้น	i_0	2	A
ค่าความแข็งแรงกระแส	k_i	26.09	N/A
ค่าความแข็งแรงการกระตุ้น	$-k_n$	$26.09(7.6) = 198.28$	N/mm

ผลการพิสูจน์ทราบความเป็นเชิงเส้นของแรงลัพท์แม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ได้ค่าลักษณะเฉพาะของระบบแม่เหล็กแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวนอน แสดงดังตารางที่ 3.4

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบ และสร้างระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวนอนที่สามารถบังคับหรือรองรับภาระกรรมได้ 198 นิวตัน ภายในช่องว่าง 1 มิลลิเมตรของการกระตุ้นระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ในแต่ละทิศทางได้อย่างอิสระ ซึ่งผลการสอบเทียบมีความเป็นเชิงเส้นทั้งตัวขยายกำลัง การกระตุ้นของเซ็นเซอร์ รวมถึงมีแรงลัพท์ในการควบคุมกระแสเชิงเส้นต่อเนื่องที่ 0.5 ถึง 4 แอมป์ และสามารถควบคุมการกระตุ้นได้ไม่เกิน 200 ไมครอน (0.2 มิลลิเมตร) เพื่อใช้เป็นข้อกำหนดขอบเขตในการควบคุมเชิงเส้น สำหรับการทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นต่อไป

บทที่ 4

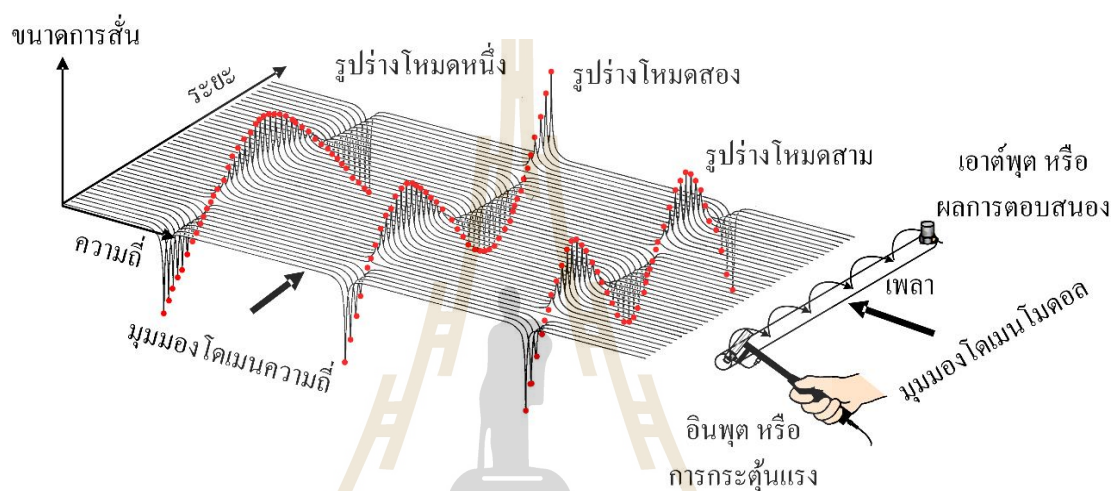
พฤติกรรมของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี

บทนี้จะกล่าวถึง พฤติกรรมของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี โดยพิสูจน์ทราบระบบผ่านฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ ที่ได้จากการทดสอบโมดอล และเปรียบเทียบผลการตรวจสอบระบบกับแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ที่ประยุกต์การค้นหาคูณลักษณะเฉพาะทางกายภาพของ โครงสร้างมูลฐานด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบเมื่อ ไม่มีภาระกรรมภายนอกมากระทำ ทำให้สามารถอธิบาย พฤติกรรมการตอบสนอง และบ่งชี้ความถี่ธรรมชาติ รวมถึงรูปร่างโหมดการสั่น เพื่อใช้เป็นข้อกำหนดขอบเขต และระบุความถี่สั่นพ้องในการทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การทดสอบโมดอล

การทดสอบ โมดอล เป็นเทคนิคการกระตุ้น และจัดการสัญญาณในทางปฏิบัติเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึมการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (FFT หรือ เอฟเอฟที) การทำเอฟเอฟทีจะทำให้ได้สเปกตรัมความถี่ (frequency spectrum) ของสัญญาณ ในสัดส่วนสัญญาณที่มีหลากหลายรูปแบบ อาทิเช่น สัญญาณแบบสุ่ม สัญญาณไซน์ความถี่เพิ่ม (swept sine) และสัญญาณการตอบสนองชั่วคราว โดยกระตุ้นด้วยความถี่จำนวนมากภายในครั้งเดียว ให้กับโครงสร้าง และวัดการผลตอบสนองของสัญญาณเหล่านั้น ซึ่งการทดสอบแรงกระแทก (impact testing) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน สามารถทดสอบได้รวดเร็ว โดยใช้เพียง ค้อน โมดอล (modal hammer) เป็นอินพุต (input) ในการกระตุ้นแรง และตัววัดความเร่ง (accelerometer) เป็นเอาต์พุตในการรับผลการตอบสนอง การวิเคราะห์เอฟเอฟทีต้องมีการรับสัญญาณจำนวน 2 ช่องสัญญาณ และซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลหลังการทดสอบ อีกทั้งตัวแปลงสัญญาณมีหลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้ ทั้งที่เป็นระบบเก็บข้อมูลภายในตัวแบบพกพา หรือแบบคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ทำให้การทดสอบโมดอลเป็นเทคนิคที่สะดวกกับผู้ใช้ปฏิบัติงานในปัจจุบัน ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม เพล่าจะเกิดการสั่นในแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้เกิดรูปร่างการเคลื่อนไหวการสั่นพ้อง หรือเรโซแนนซ์ (resonance) ขึ้น เป็นผลจากปฏิริยาระหว่างความเฉื่อย หรือมวลกับความยืดหยุ่นของวัสดุภายในเพล่าโดยตรง

แผนภาพความสัมพันธ์ของโดเมนความถี่ และ โดเมน โมดอล (ที่มา Brüel & Kjaer) แสดงดังรูปที่ 4.1 นั่นคือ ภายใต้งี้อื่นไขที่เหมะสม เพลาจะเกิดการสั่นในแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้เกิดรูปร่างการเคลื่อนไหวกการสั่นพ้อง หรือเรโซแนนซ์ (resonance) ขึ้น เป็นผลจากปฏิกริยาระหว่างความถี่ หรือมวลกับความยืดหยุ่นของวัสดุภายในเพลลาโดยตรง นอกจากนี้การสั่นพ้องยังเป็นสาเหตุของปัญหาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของระบบรองรับเพลลาด้วย ส่งผลให้เกิดความเสียหาย และมีเสียงรบกวน ไม่สามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ และการใช้งานสั้นลง

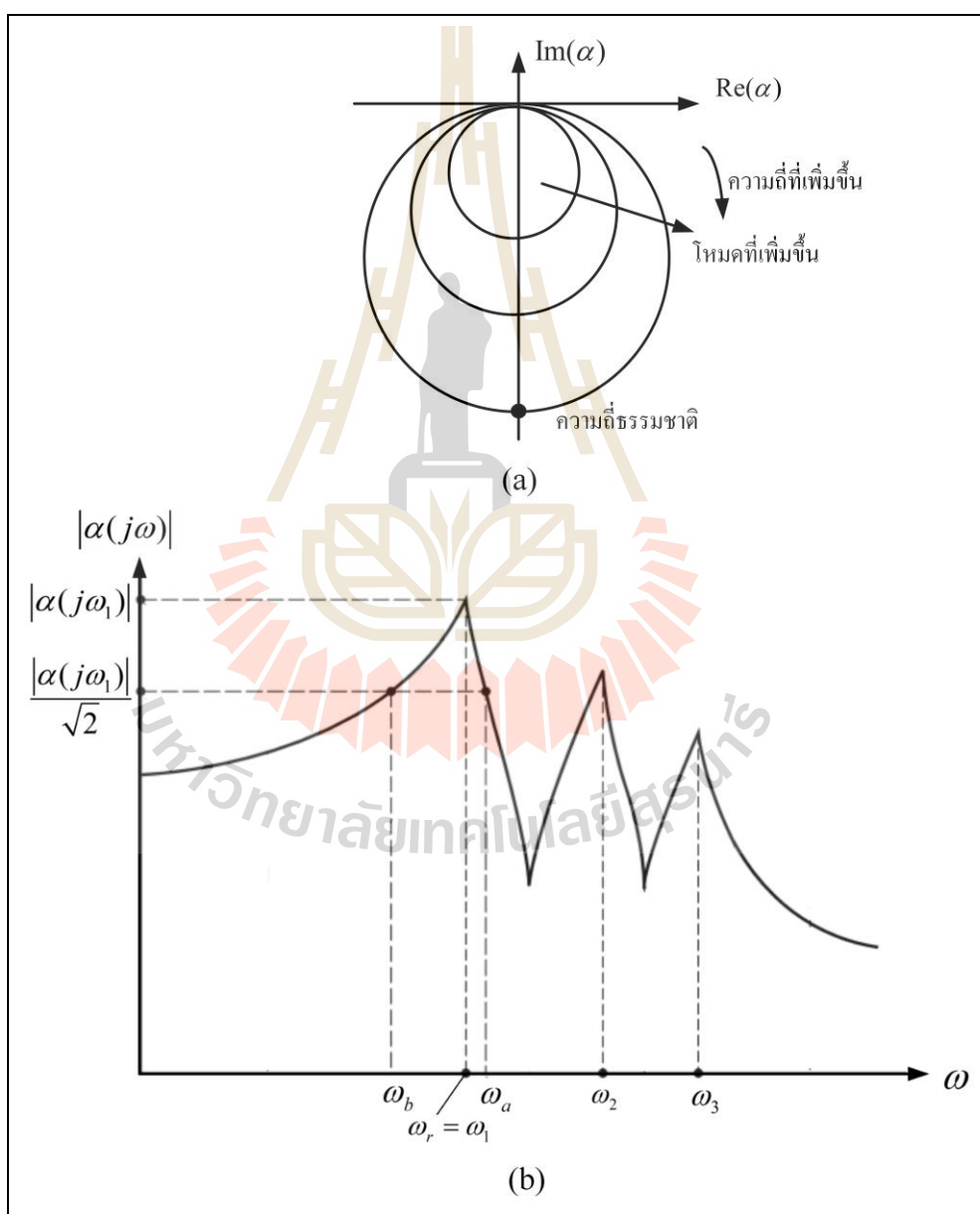


รูปที่ 4.1 แผนภาพความสัมพันธ์ของโดเมนความถี่ และ โดเมน โมดอล

รูปร่างโหมด จึงเป็นคุณสมบัติทางธรรมชาติของโครงสร้าง ไม่ขึ้นกับแรง หรือภาระกรรมที่กระทำต่อโครงสร้าง และเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (มวล ความแข็งของสปริง และความหน่วง) หรือเงื่อนไขขอบเขต (การติดตั้ง) ของโครงสร้างที่เปลี่ยนไป ด้วยเหตุนี้ทำให้ การเคลื่อนไหวกจากจุดหนึ่งไปยังจุดอื่น ๆ ที่สั่นพ้อง เป็นเอกลักษณ์ที่ไม่ซ้ำกัน ซึ่งการอภิปรายเช่นนี้ เป็นจริง และสามารถพิสูจน์ทราบจากการนิยามทางคณิตศาสตร์ของรูปร่างของโหมดการสั่นในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2 เป็นต้นไป

สำหรับการวิเคราะห์เพื่อให้หาคุณลักษณะเฉพาะของ โมดอลพารามิเตอร์ ได้แก่ ความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และรูปร่างโหมด โดยใช้หลักการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) มาช่วยในการพิจารณา สามารถแบ่งได้ 2 วิธีการหลัก ๆ ที่นิยม ดังนี้ วงกลมโมดอล (modal circle) เป็นแผนภาพที่พล็อตความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริง และส่วนจินตภาพ ที่เรียกว่า วงกลมไนควิสต์ ของฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ $\alpha(\omega)$ ที่ซึ่งแสดงโหมดหรือความถี่ต่าง ๆ สัมพันธ์กับความถี่เป็นอิสระของระบบที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2(a) และอีกวิธีที่นิยมใช้ คือ วิธีการแอมพลิจูดสูงสุด

(peak-picking) หาได้จากการนำส่วนจริง และส่วนจินตภาพของฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่มาหาขนาด (magnitude) หรืออาจเรียกว่า สเปกตรัม รวมถึงเฟส (phase) แล้วนำมาพล็อตเทียบกับความถี่ จากนั้นระบุความถี่ธรรมชาติเทียบกับทุก ๆ แอมพลิจูดความถี่ธรรมชาติสูงสุดของโหมคที่ r ใด ๆ โดยสังเกตจากแผนภาพที่ได้จากการพล็อตขนาดของ $|\alpha(j\omega)|$ ดังรูปที่ 4.2 (b) ซึ่งปรากฏ 3 จุดสูงสุด หรือการสั่นพ้องที่บอกเป็นนัยว่า ระบบที่ได้รับการทดสอบสามารถจำลองให้เป็นระบบสามองศาอิสระที่สัมพันธ์กับจุดสูงสุดที่เกิดขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ (a) คุณสมบัติวงกลม โมดอลที่ความถี่ และ (b) วิธีการแอมพลิจูดสูงสุด

หลักการพื้นฐานในการหาข้อมูลต่าง ๆ จากการทดสอบ โมดอล เริ่มต้นจากการระบุจุดสูงสุดเฉพาะที่ได้จากการพล็อตขนาดของฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ $|\alpha(j\omega)|$ ในที่นี้พิจารณาที่ความถี่ $\omega_r = \omega_1$ ซึ่งเป็นความถี่ธรรมชาติของโหมคหนึ่ง หลังจากนั้นกำหนดค่าสูงสุดพื้นที่ย่อย (local) ฎุกระบุด้วย $|\alpha(j\omega_r)|$ ที่ความถี่ของโหมคหนึ่ง และมีความถี่แบนด์วิดท์ขนาด $|\alpha(j\omega_r)|/\sqrt{2}$ (3 เดซิเบล) ในช่วงความถี่ ω_a และ ω_b ที่เรียกว่า จุดครึ่งกำลังสอง (half-power points) โดยมีความสัมพันธ์อัตราส่วนความหน่วงที่จุดสูงสุดของโหมค r ใด ๆ ซึ่งเป็นความถี่สั้นพ้อง ω_r ที่ได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 2.2 ได้ว่า

$$\zeta_r = \frac{\omega_a - \omega_b}{2\omega_r} \quad (4.1)$$

หลังจากที่ได้ อัตราส่วนความหน่วง โมดอล ก็จะนำไปหาเศษส่วนเหลือ ที่เกิดจากอนุกรมของฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ที่สัมพันธ์กับสมการ (2.66) ได้ว่า

$$A_r = 2\zeta_r \omega_r^2 |\alpha(j\omega_r)| \quad (4.2)$$

ซึ่งเป็นเศษส่วนเหลือของการตอบสนองที่ความถี่กระทำเท่ากับความถี่ธรรมชาติ

4.2 ขั้นตอนการทดสอบโมดอล

ค่าลักษณะเฉพาะของเครื่องมือ และอุปกรณ์ทดสอบ โมดอลแสดงในตารางที่ 4.1 เพื่อใช้ตัวบ่งชี้การสั่นสะเทือนด้วยที่ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ เพื่อเก็บค่าสัญญาณการกระตุ้นจากค้อนโมดอล ผลการตอบสนองจากเซ็นเซอร์ความเร่ง และแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็วในรูปของวัตต์ฟังก์ชันถ่ายโอน หรือที่เรียกว่าฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ด้วยซอฟต์แวร์ DEWESoftTM หลังจากนั้นจะนำค่าต่าง ๆ ที่ได้ ไปทำการตรวจวิเคราะห์โมดอลด้วยซอฟต์แวร์ ME'scopeVES อีกครั้ง เพื่อหารูปร่างโหมค ความถี่ธรรมชาติ และความหน่วงจากฟังก์ชันถ่ายโอนนั้น โดยใช้เครื่องมือสำเร็จในซอฟต์แวร์เพื่อทำการปรับเส้นโค้ง ให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่เหมาะสมในการหาค่าพารามิเตอร์โมดอล สำหรับการพิจารณาโครงสร้างเพื่อกำหนดคิโลิเมนต์ต่าง ๆ ทางเรขาคณิตให้สอดคล้องกับโครงสร้างโรเตอร์จริง จากนั้นเลือกจุดสำหรับการกระตุ้น และการตอบสนอง โดยเพลลาจะถูกแขวนในแนวตั้งที่ส่วนท้ายด้วยเชือก (ภายใต้สมมติฐานคือ ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน และที่ปลายทั้งสองด้านเคลื่อนที่อย่างอิสระในแนวรัศมีของเพลลา คือแนวแกน y และ z) มีเซ็นเซอร์ความเร่ง 3 แกน

หนึ่งตัวถูกติดตั้งอยู่ที่ปลายโรเตอร์ แล้วใช้ก้อนโมคคอสในการเคาะกระตุ้นในทุกจุดที่พิจารณา ตามแนวแกนของเพลาทังหมด 13 จุด ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าลักษณะเฉพาะของเครื่องมือ และอุปกรณ์ทดสอบ โมคคอส

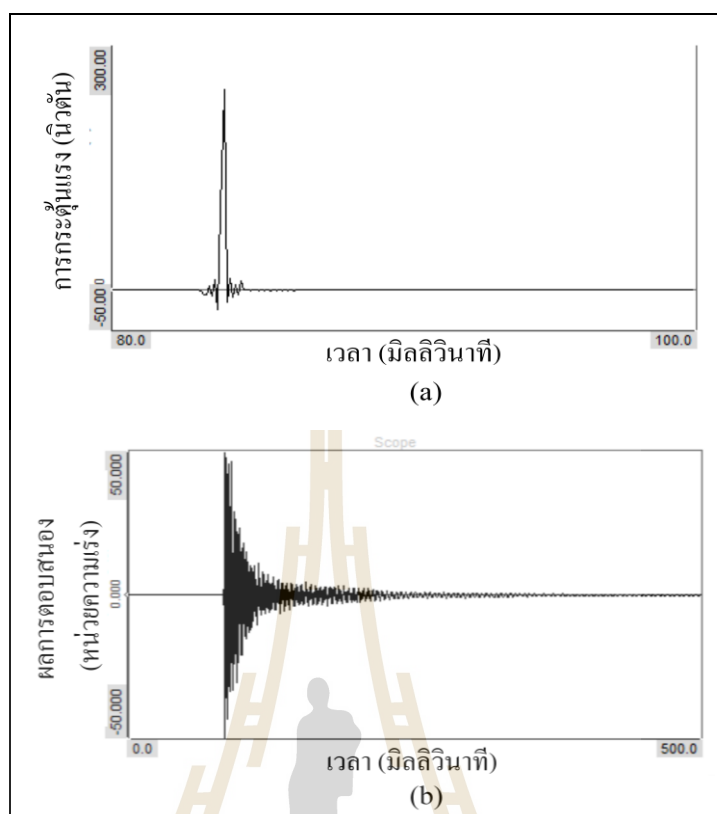
เครื่องมือ/อุปกรณ์	ผู้ผลิต/ผู้จำหน่าย (โมคคอส)	คำอธิบาย
เพลาทดสอบ (I)	Misumi	เหล็กกล้าไร้สนิม- เกรด 304
เซ็นเซอร์ความเร่ง (II)	Kistler (8763B100AT)	ช่วงวัดความเร่ง $\pm 100g$ ค่า Sensitivity $50 \pm 15\% mV/g$ ช่วงความถี่ทำงาน 0.5...7 kHz
ก้อนโมคคอส (III)	Kistler (9722A500)	ช่วงวัดแรง 0...100 lbf (500N) ค่า Sensitivity 50 mV/lbf
เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (IV)	DEWESoft (Minitaur: DEWE-101)	8 ช่องแอนะล็อกอินพุต

ตารางที่ 4.2 แสดงอิลิเมนต์ ขนาด พิกัดของโรเตอร์เบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นด้านเดียว

อิลิเมนต์ (โหนด - โหนด)	ขนาดอิลิเมนต์			อิลิเมนต์ (โหนด - โหนด)	ขนาดอิลิเมนต์		
	พิกัด เริ่ม โหนด	พิกัดท้าย โหนด	พิกัด เส้นผ่าน ศูนย์กลาง		พิกัด เริ่ม โหนด	พิกัด ท้าย โหนด	พิกัด เส้นผ่าน ศูนย์กลาง
1 (N1 - N2)	0	90	25	7 (N7 - N8)	340	390	25
2 (N2 - N3)	90	120	25	8 (N8 - N9)	390	426	25
3 (N3 - N4)	120	150	25	9 (N9 - N10)	426	476	25
4 (N4 - N5)	150	230	25	10 (N10 - N11)	476	570	80
5 (N5 - N6)	230	310	25	11 (N11 - N12)	570	620	25
6 (N6 - N7)	310	340	25	12 (N12 - N13)	620	675	25

หน่วย มิลลิเมตร

การใช้ก้อนโมคคอส ด้วยการเปลี่ยนจุดเคาะนั้น จะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ให้กับซอฟต์แวร์ DEWESoft™ เช่น การเลือกหัวเคาะให้เหมาะสมกับโครงสร้าง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความหน่วงของสัญญาณการเคาะ การกำหนดขอบเขตของแรงที่เคาะ การกำหนดความยาวหน้าต่างในการคำนวณ โดยมีสัญญาณการเคาะจากก้อนโมคคอส และผลการตอบสนองของเซ็นเซอร์วัดความเร่งบนโดเมนเวลา แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละกรณี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์ปรับแต่งค่าต่าง ๆ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในหัวข้อการจัดการสัญญาณ



รูปที่ 4.3 สัญญาณ (a) การกระตุ้น (b) ผลการตอบสนอง

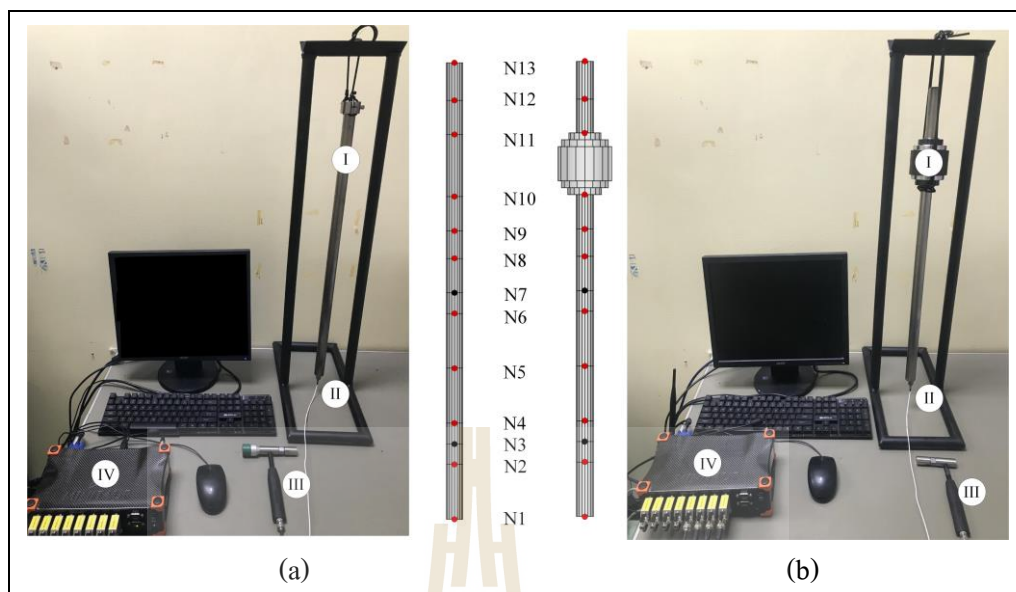
สำหรับการทดสอบนี้ ได้กำหนดอัตราการสุ่มตัวอย่าง ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต และปรับค่าละเอียดจำนวน 8,192 ช่อง ในการตั้งค่าฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่จากหลักการของ Nyquist สามารถวัดอัตราการสุ่มตัวอย่างได้เพียงครั้งเดียว (10 กิโลเฮิร์ต) ดังนั้น จะให้ความละเอียดความถี่ (Df) การวัดทุก ๆ 0.61 เฮิร์ต และเวลาการคำนวณต่อการแสดงแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็วทั้งหมด t เท่ากับ 1.63 วินาที ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการตรวจวิเคราะห์เพลาในการทดสอบ โมดอลออกเป็น 3 แบบจำลอง คือ

แบบจำลองที่ 1 เพลาอย่างเดียว มีเงื่อนไขแบบปลายอิสระทั้งสองด้าน

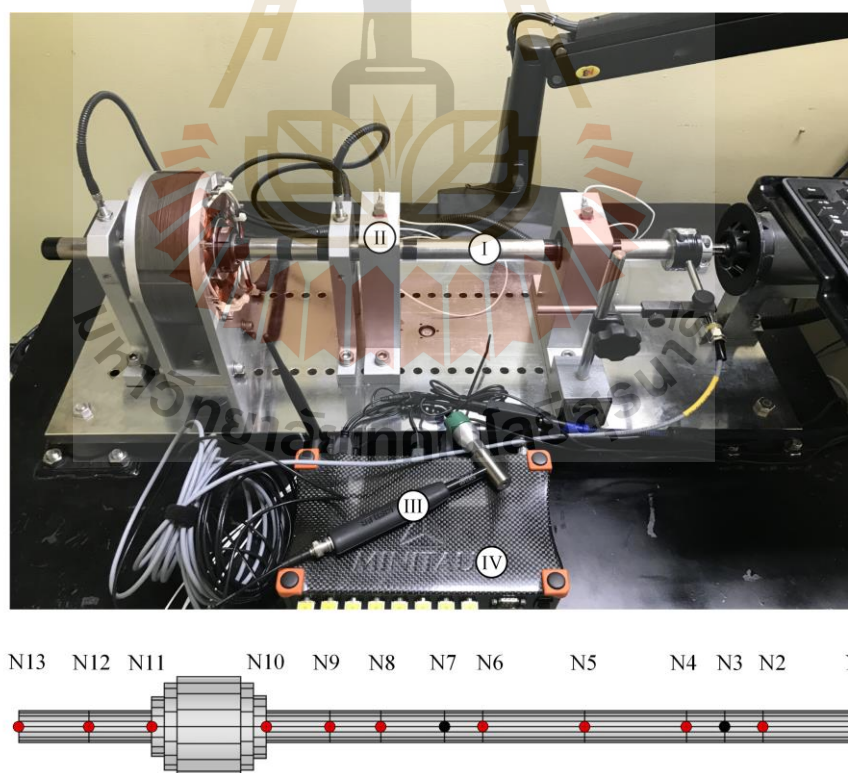
แบบจำลองที่ 2 เพลา กับ โรเตอร์ แบริง แม่เหล็ก ไฟฟ้า มีเงื่อนไขแบบปลายอิสระทั้งสองด้าน

แบบจำลองที่ 3 ระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี

การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ โมดอลแบบปลายอิสระทั้งสองด้านของทั้งแบบจำลองที่ 1 และ 2 แสดงในรูปที่ 4.4 ส่วนการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ โมดอลของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี แสดงดังรูปที่ 4.5 (แบบจำลองที่ 3)

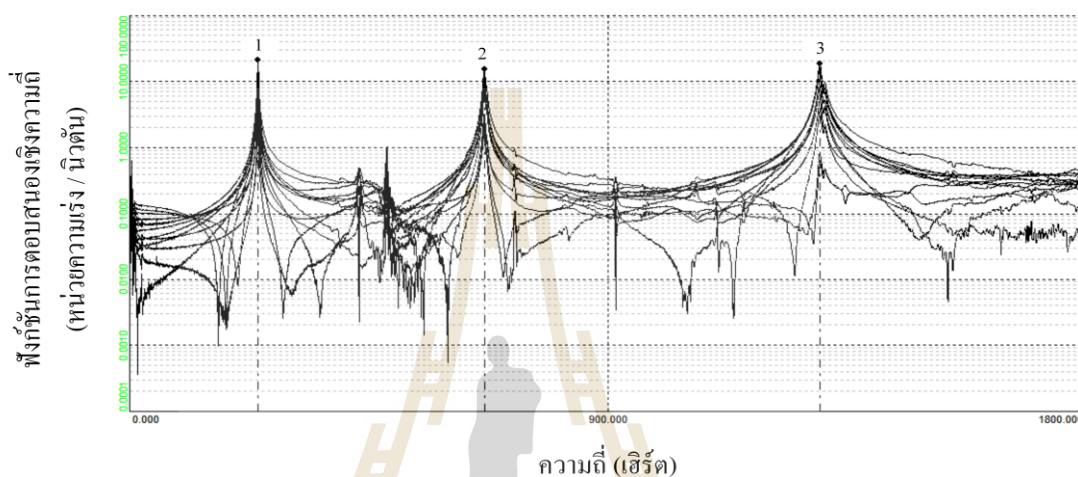


รูปที่ 4.4 การติดตั้งอุปกรณ์ และตำแหน่งโหนดของแบบจำลองที่ (a) 1 และ (b) 2

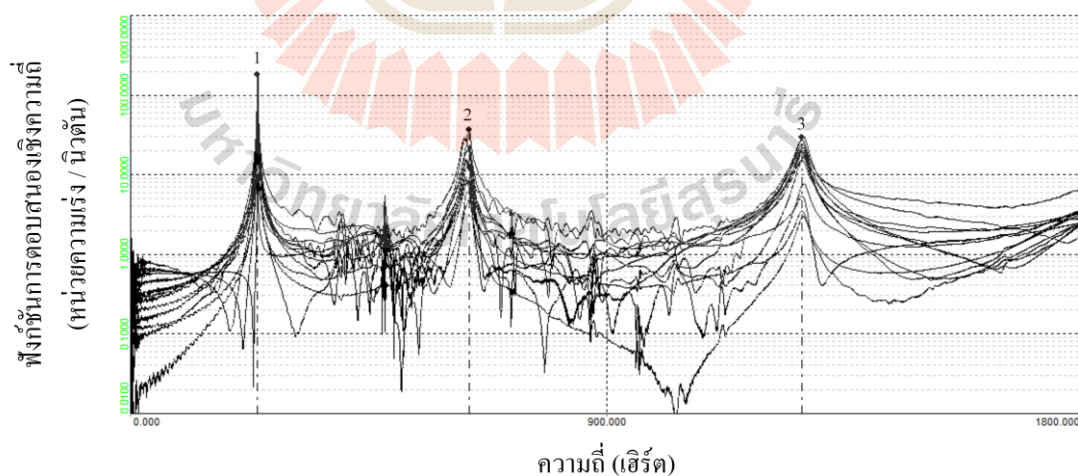


รูปที่ 4.5 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบโมดอลของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วย
แบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี (แบบจำลองที่ 3)

ผลการตอบสนองเชิงความถี่ในหน่วย $g/$ นิวตัน ที่ได้จากการทดสอบ โมดอลสามโหมดแรก ของแบบจำลองที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 โดยมีรูปร่างโหมดจากการตรวจวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ ME'scopeVES ของแบบจำลองที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ทั้งสองแบบจำลองในแต่ละความถี่ แสดงถึงพฤติกรรมทางธรรมชาติของรูปร่างโหมดการดัด (bending mode) ได้อย่างชัดเจนทั้งสาม โหมด แสดงดังรูปที่ 4.8

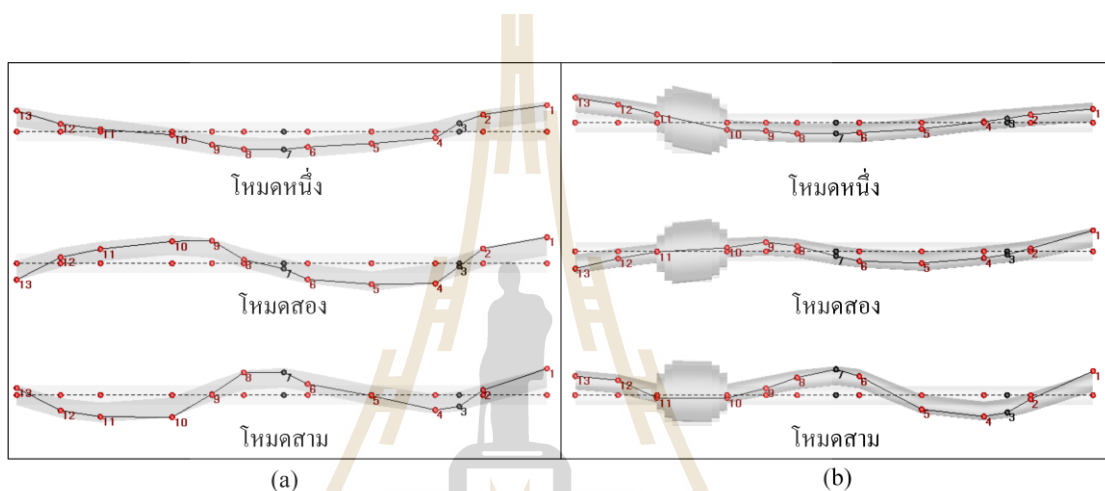


รูปที่ 4.6 การตอบสนองเชิงความถี่จากการทดสอบ โมดอลของแบบจำลองที่ 1

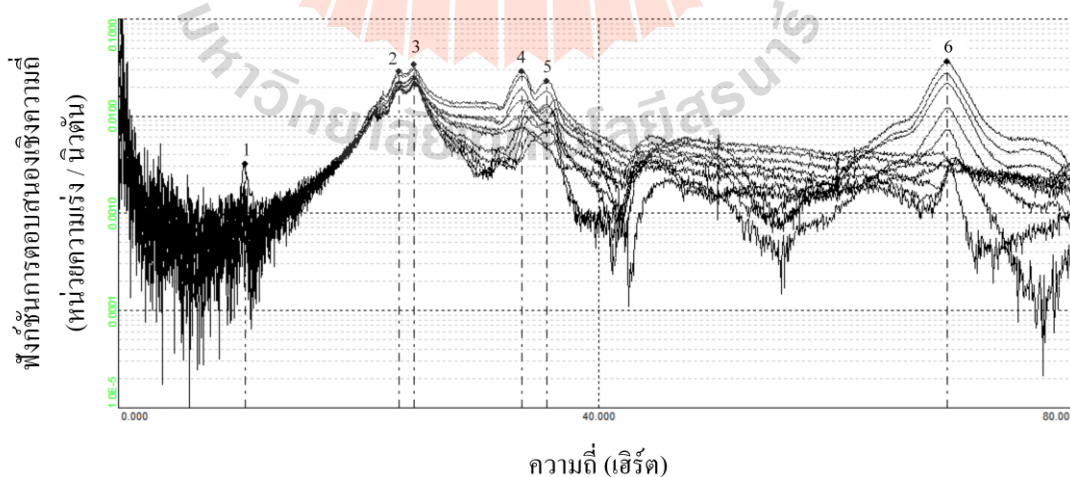


รูปที่ 4.7 การตอบสนองเชิงความถี่จากการทดสอบ โมดอลของแบบจำลองที่ 2

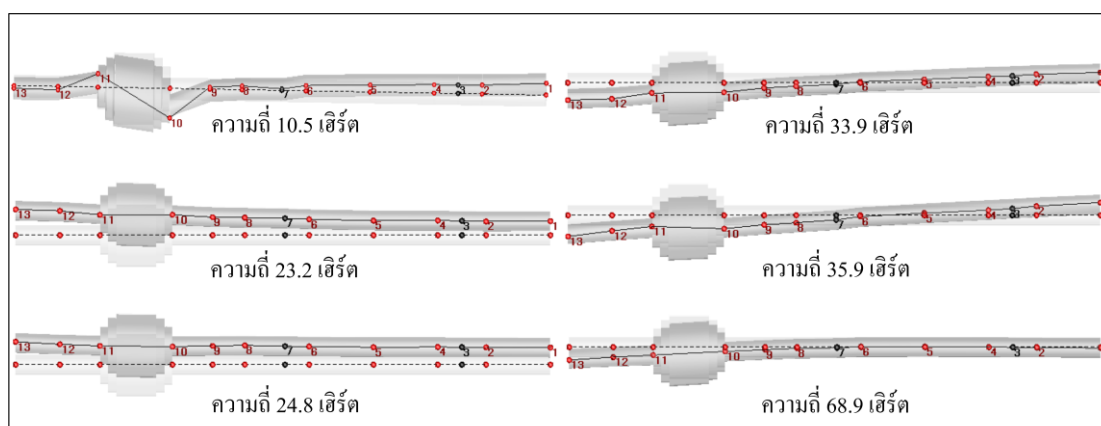
ในขณะที่แบบจำลองที่ 3 เป็นระบบรองรับจริงที่ใช้ในการทดสอบ จึงพิจารณาผลการตอบสนองเชิงความถี่ในช่วงที่ระบบสามารถทำงานได้เท่านั้น คือ ที่ความถี่ต่ำกว่า 80 เฮิร์ต หรือ 4,800 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งมีการสั่นพ้องทั้งหมด 6 ความถี่ โดยมีรูปร่างโหมดจากซอฟต์แวร์ แสดงดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่ 3 การสั่นพ้องที่ 10.5 เฮิร์ต มีรูปร่างโหมดสูงสุดบริเวณ โหนด 10 และ 11 มีความเป็นไปได้ ที่ความถี่นี้เป็นของโรเตอร์แบร์ริงแม่เหล็ก ในขณะที่ความถี่ 23.2 และ 24.8 มีรูปร่างการกระจัดไปพร้อมกันทั้งแนวแกน ซึ่งอาจเป็นความถี่สั่นพ้องของโครงสร้าง แต่ไม่สามารถระบุได้ว่า เกิดขึ้นในแนวนอน (แกน y) หรือแนวตั้ง (แกน z)



รูปที่ 4.8 รูปร่างโหมดต่างๆ จากการทดสอบ โมดอลของแบบจำลองที่ (a) 1 และ (b) 2



รูปที่ 4.9 การตอบสนองเชิงความถี่จากการทดสอบ โมดอลของระบบแบร์ริงแม่เหล็กไฟฟ้าด้านเดียว แบบปลายยื่น (แบบจำลองที่ 3)



รูปที่ 4.10 รูปร่างที่ความถี่ต่าง ๆ จากการทดสอบโมดอลของแบบจำลองที่ 3

ตารางที่ 4.3 ผลจากการทดสอบ โมดอลของแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ

โหมด	ความถี่โมดอล (เฮิรต)	ช่วงครึ่งความถี่แบนด์วิดท์ (เฮิรต)	อัตราส่วนความหน่วงโมดอล (เปอร์เซ็นต์)	เศษส่วนเหลือ (ขนาด)
แบบจำลองที่ 1				
1	241	0.76	0.31	207
2	666	1.62	0.24	355
3	1,300	3.35	0.26	818
แบบจำลองที่ 2				
1	241	0.22	0.09	256
2	633	4.77	0.76	1,900
3	1,270	10.4	0.82	3,660
แบบจำลองที่ 3				
1	10.5	0.02	0.2	0.01
2	23.2	0.5	2.15	0.09
3	33.9	0.72	2.13	0.12
4	35.9	0.39	1.07	0.05
5	49.0	n/a	n/a	n/a
6	68.9	0.92	1.33	0.03

เมื่อพิจารณารูปร่างที่ความถี่ 33.9 และ 35.9 เฮิรต จะเห็นได้ว่า มีรูปร่างโหมดสูงสุดที่ปลายทั้งสองด้าน และเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกัน แต่ไม่สามารถระบุแน่ชัดได้ว่าเป็นความถี่สั่นพ้องของ

ระบบส่วนใด ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้ง แบร์ริงที่รองรับ ข้อต่อยึดหุ่น หรือมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนความถี่ 68.9 เฮิร์ต จะมีรูปร่างโหมดที่มีการกระจัดสูงสุดอยู่ที่ปลายตำแหน่ง โหนด 13 และมีการเบี่ยงเบนออก จากตำแหน่ง โหนด 7 ที่มีการรองรับอยู่ ซึ่งเป็นลักษณะพฤติกรรมของคานาปลายยื่น (cantilever beam) ทำให้สามารถระบุได้อย่างชัดเจน ที่ความถี่สั่นพ้องนี้เป็น รูปร่างโหมดหนึ่งของการคัด ผล การวิเคราะห์ด้วยการทดสอบโมดอล ทำให้ได้ ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางกายภาพของ โครงสร้างของ แต่ละความถี่ แสดงดังตารางที่ 4.3

จากผลการทดสอบ โมดอลที่ได้อภิปราย แสดงให้เห็นว่า สำหรับระบบที่มีเงื่อนไขชัดเจน หรือเป็น โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน (แบบจำลองที่ 1 และ 2) สามารถพิจารณาหาผลการตอบสนองที่ บ่งชี้พฤติกรรมจากความถี่ธรรมชาติ และรูปร่างโหมดการสั่นที่เป็นไปตามทฤษฎีได้ ในขณะที่การ ทดสอบโมดอลกับระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยระบบแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนว รัศมี (แบบจำลองที่ 3) ซึ่งมีอุปกรณ์ และ โครงสร้างประกอบกันหลายส่วน ทำให้การวิเคราะห์ ความถี่สั่นพ้องที่เกิดขึ้นกับรูปร่างการสั่น ไม่สามารถพิสูจน์ได้แน่ชัดว่าเป็นการตอบสนองที่มี ผลกระทบมาจากส่วนไหนของระบบ จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาอธิบาย พฤติกรรม และตรวจวิเคราะห์ร่วมกัน ซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป

4.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การพิจารณาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วย แบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี จะใช้หลักการทางพลศาสตร์ของโรเตอร์ และเอลิเมนต์ของ เพลามาประกอบเป็นระบบ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองที่เกิดขึ้น เริ่มต้นด้วยการพิจารณา จากสมการ (2.89) สำหรับระบบอนุรักษณ์ที่ไม่มีความหน่วง สามารถเขียนสมการเอลิเมนต์ของเพลลา ของท่อนที่ e ได้ว่า

$$\mathbf{M}_s^{(e)} \ddot{\mathbf{q}}^{(e)} + \mathbf{K}_s^{(e)} \mathbf{q}^{(e)} = \mathbf{0} \quad (4.3)$$

ซึ่งมีสี่พิกัดบนระนาบ $y-x$ ที่โหนดด้านซ้าย และโหนดด้านขวา กำหนดให้การกระจัดเชิงเส้น สองพิกัดคือ q_1 กับ q_5 และพิกัดการกระจัดเชิงมุมสองพิกัดคือ q_4 กับ q_8 ในทำนองเดียวกันจะมี อีกสี่พิกัดบนระนาบ $z-x$ เมื่อการกระจัดเชิงเส้นสองพิกัดคือ q_2 กับ q_6 และพิกัดการกระจัด เชิงมุมสองพิกัดคือ q_3 กับ q_7 รวมเป็นแปดพิกัดในหนึ่งเอลิเมนต์ เขียนได้ว่า

$$\mathbf{q}^{(e)} = \{q_1^{(e)} \quad q_2^{(e)} \quad q_3^{(e)} \quad q_4^{(e)} \quad q_5^{(e+1)} \quad q_6^{(e+1)} \quad q_7^{(e+1)} \quad q_8^{(e+1)}\}^T \quad (4.4)$$

จากเมทริกซ์อิลิเมนต์เพลาสัมพันธ์กับสมการ (2.83) และ (2.88) สามารถเขียนเมทริกซ์มวลอิลิเมนต์เพลของการเคลื่อนที่เชิงเส้น ตามสมการ (4.5) และการเคลื่อนที่เชิงมุม ตามสมการ (4.6) ดังนี้

$$\mathbf{M}_{s,t}^{(e)} = \frac{\rho_s A_s L_e}{420} \begin{bmatrix} 156 & & & & & & & & \\ & 156 & & & & & & & \\ & & -22L_e & 4L_e^2 & & & & & \\ & & & 0 & 4L_e^2 & & & & \\ 22L_e & 0 & 0 & 13L_e & 156 & & & & \\ & 0 & 54 & -13L_e & 0 & 0 & 156 & & \\ & 0 & & & & & & & \\ & 0 & 13L_e & -3L_e^2 & 0 & 0 & 22L_e & 4L_e^2 & \\ -13L_e & 0 & 0 & -3L_e^2 & -22L_e & 0 & 0 & 4L_e^2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{s,t}^{11(e)} & \mathbf{M}_{s,t}^{12(e)} \\ \mathbf{M}_{s,t}^{21(e)} & \mathbf{M}_{s,t}^{22(e)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{s,r}^{(e)} = \frac{\rho_s I_s}{30L_e} \begin{bmatrix} 36 & & & & & & & & \\ & 36 & & & & & & & \\ & & -3L_e & 4L_e^2 & & & & & \\ 3L_e & 0 & 0 & 4L_e^2 & & & & & \\ -36 & 0 & 0 & -3L_e & 36 & & & & \\ & 0 & -36 & 3L_e & 0 & 0 & 36 & & \\ & 0 & & -L_e^2 & 0 & 0 & 3L_e & 4L_e^2 & \\ 3L_e & 0 & 0 & -L_e^2 & -3L_e & 0 & 0 & 4L_e^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{s,r}^{11(e)} & \mathbf{M}_{s,r}^{12(e)} \\ \mathbf{M}_{s,r}^{21(e)} & \mathbf{M}_{s,r}^{22(e)} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

เมื่อ

$$\mathbf{M}_s^{(e)} = \mathbf{M}_{s,t}^{(e)} + \mathbf{M}_{s,r}^{(e)} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{s,t}^{11(e)} + \mathbf{M}_{s,r}^{11(e)} & \mathbf{M}_{s,t}^{12(e)} + \mathbf{M}_{s,r}^{12(e)} \\ \mathbf{M}_{s,t}^{21(e)} + \mathbf{M}_{s,r}^{21(e)} & \mathbf{M}_{s,t}^{22(e)} + \mathbf{M}_{s,r}^{22(e)} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s^{11(e)} & \mathbf{M}_s^{12(e)} \\ \mathbf{M}_s^{21(e)} & \mathbf{M}_s^{22(e)} \end{bmatrix}$$

โดยที่ A_s คือ พื้นที่หน้าตัดเพลลา $A_s = \pi(r_{s,o}^2 - r_{s,i}^2)$

I_s คือ โมเมนต์เฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดเพลลา $I_s = \frac{\pi}{4}(r_{s,o}^4 - r_{s,i}^4)$

L_e คือ ความยาวอิลิเมนต์ของเพลลา

$r_{s,i}$, $r_{s,o}$ คือ รัศมีภายใน และภายนอกเพลลา

ρ_s คือ ความหนาแน่นของเพลลา

หลังจากนั้นหากนำมาประกอบเป็นระบบของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} 0 & \hat{\mathbf{M}}_s \\ \hat{\mathbf{M}}_s & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{K}}_s & 0 \\ 0 & -\hat{\mathbf{M}}_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

จากสมการ (4.11) ทำให้สามารถประยุกต์การแก้ปัญหาค่าเฉพาะในลักษณะเดียวกับสมการ (2.25) และ (2.26) เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ และรูปร่างโหมดได้

สำหรับโหนดที่มีโรเตอร์แบร์ริงแม่เหล็กจะนำเอาเมทริกซ์ความเฉื่อยในสมการ (2.71) มารวมกับเมทริกซ์มวลอิลิเมนต์เพลลา ในตำแหน่งโหนดที่พิจารณา เมื่อระบบไม่มีการหมุน $\Omega = 0$

ให้ m_d คือ มวลของโรเตอร์แม่เหล็ก $m_d = \pi(r_{d,o}^2 - r_{d,i}^2)\rho_d t_d$

I_{id} คือ โมเมนต์เฉื่อยมวลตามขวางของโรเตอร์แม่เหล็ก

$$I_{id} = \frac{1}{4} m_d (r_{d,o}^2 + r_{d,i}^2) + \frac{1}{12} m_d t_d^2$$

t_d คือ ความหนาของโรเตอร์แบร์ริงแม่เหล็ก

$r_{d,i}, r_{d,o}$ คือ รัศมีภายใน และนอกโรเตอร์แบร์ริงแม่เหล็ก

ρ_d คือ ความหนาแน่นของโรเตอร์แม่เหล็ก

อีกทั้งระบบมีการรองรับด้วยแบร์ริงทั่วไป หรือมีข้อต่อยึดหยุ่น จะนำคุณสมบัติทางกายภาพ คือ มวล และความแข็งของสปริง มารวมที่ตำแหน่งโหนดนั้น ๆ

ให้ m_{b1}, m_{b2} คือ มวลแบร์ริงทั่วไปตัวที่ 1 (โหนด 3) และ 2 (โหนด 7)

m_c คือ มวลข้อต่อยึดหยุ่น (โหนด 1)

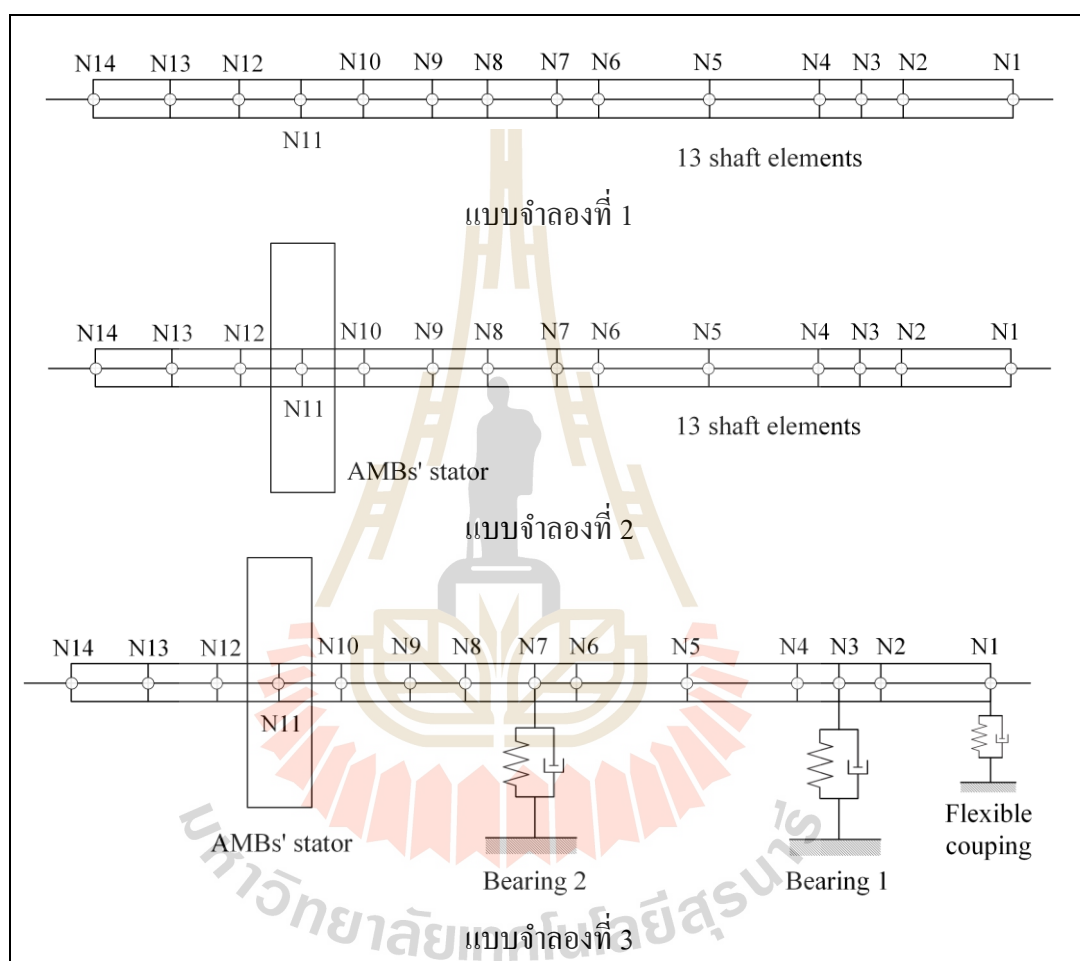
$k_{b1,n}, k_{b2,n}$ คือ ความแข็งของสปริงแบร์ริงทั่วไปตัวที่ 1 และ 2 ในทิศทาง n

$k_{c,n}$ คือ ความแข็งของสปริงข้อต่อยึดหยุ่นในทิศทาง n

เนื่องจากเป็นเพียงการจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองโดยประมาณของระบบ และทำนายลักษณะต่าง ๆ ที่ไม่สามารถบ่งชี้ได้ จึงได้นำผลการทดสอบ โมดอล มาสร้างเงื่อนไขหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยค้นหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่าแน่ชัดของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ มีขั้นตอน ดังนี้

1. สำหรับแบบจำลองที่ 1 ค้นหาเฉพาะ ρ_s และ E_s ของเพลลา
2. หลังจากนั้นใช้เงื่อนไขความถี่แรก (I) กับสองความถี่ถัดไป (II) กับแบบจำลองที่ 2 เพื่อค้นหา ρ_s, ρ_d และ E_s

3. เลือกค่า ρ_s , ρ_d และ E_s ที่สอดคล้องกับแบบจำลองที่ 1 และ 2 เพื่อกำหนดเป็นค่าคุณสมบัติวัสดุของเพลลา และ โรเตอร์แบร์ริงแม่เหล็ก แล้วนำไปใช้กับการค้นหาแบบจำลองที่ 3 โดยค้นหาตัวแปรของตัวแบร์ริงทั่วไป คือ m_{b1} , m_{b2} , $k_{b1,y}$, $k_{b2,y}$, $k_{b1,z}$ และ $k_{b2,z}$ รวมถึงข้อต่อยืดหยุ่น ประกอบด้วย m_c , $k_{c,y}$ และ $k_{c,z}$



รูปที่ 4.11 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ และตำแหน่งโหนดของระบบแบร์ริงแม่เหล็กไฟฟ้าด้านเดียว แบบปลายยื่นของแต่ละแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การค้นหาคำตอบด้วยรหัสพันธุกรรม (จีเอ) ที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานทางด้านวิศวกรรม เนื่องจากเป็นที่ยอมรับว่าสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น (local) และสามารถค้นหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (global) ได้ ในที่นี้ได้ใช้ Genetic Algorithm Tool ของโปรแกรม MATLAB รวมถึงการเขียนรหัส

คำสั่งของโปรแกรมแบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์ ในรูปของ m-file แสดงในภาคผนวก ก และสร้างฟังก์ชันค่าความเหมาะสม (ฟังก์ชันวัตถุประสงค์) โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละความถี่ เป็นค่าความเหมาะสมที่ต้องการให้มีค่าน้อยที่สุด คือ

$$f_{min}^n = \sum_{i=1}^n \left(100 \times \left| \frac{f_f^i - f_m^i}{f_f^i} \right| \right) \quad (4.12)$$

เมื่อ f_{min}^n คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
 f_f^i คือ ความถี่ที่ได้จากแบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์โหมดที่ i
 f_m^i คือ ความถี่ที่ได้จากการทดสอบโมดอลโหมดที่ i

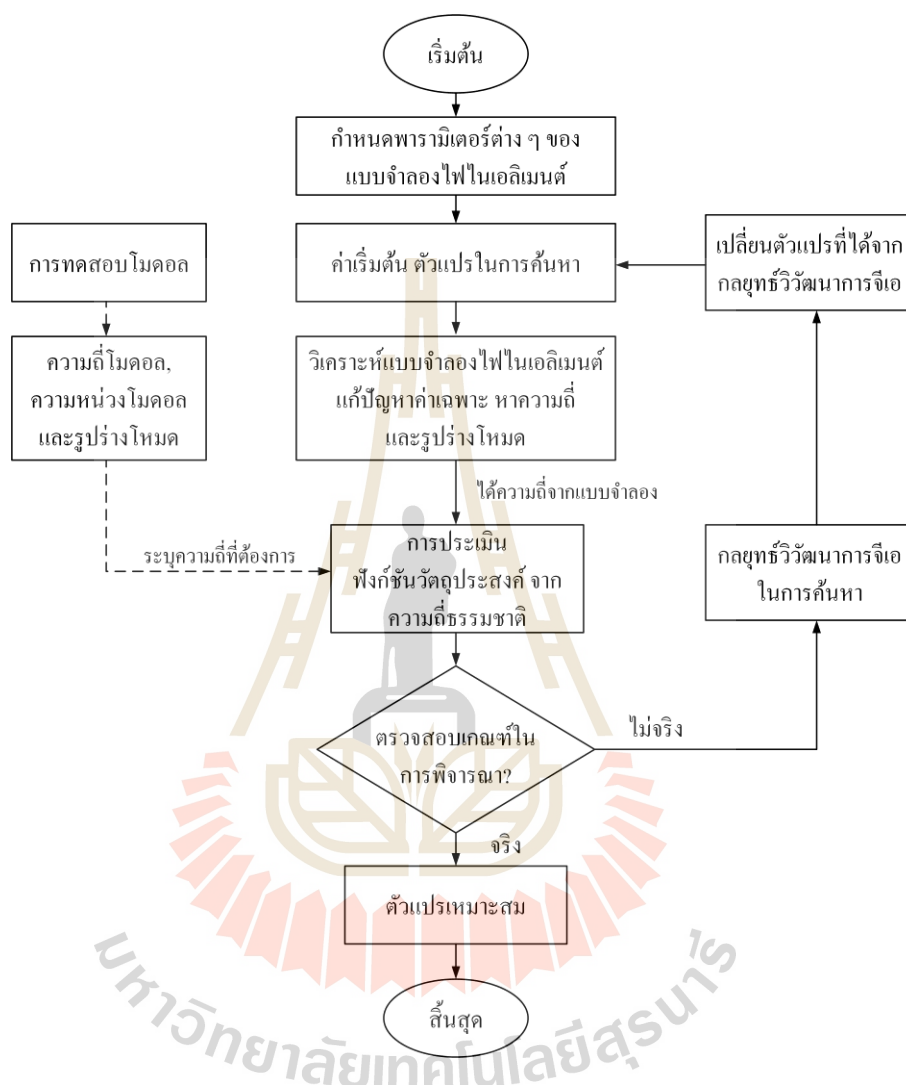
โจทย์ปัญหา เปรียบได้กับแบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์ และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือฟังก์ชันค่าความเหมาะสม เปรียบได้กับสิ่งแวดล้อมที่บีบบังคับ ในที่นี้ใช้ความถี่ธรรมชาติของระบบที่ได้จากการทดสอบโมดอล เป็นเป้าหมายเงื่อนไขในการพิจารณา สำหรับประชากรเปรียบได้กับค่าคงที่ทางกายภาพต่าง ๆ ของแบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์ ซึ่งจะถูกคัดเลือก และปรับเปลี่ยนพันธุกรรมจนได้คำตอบของปัญหาที่ดีขึ้น จากรุ่นสู่รุ่น โดยกำหนดกลยุทธ์วิวัฒนาการในการค้นหาคำตอบแสดงในตารางที่ 4.4 ทำให้แบบจำลอง และผลการทดสอบโมดอลซ้กันไปเรื่อย ๆ ซึ่งแสดงไดอะแกรมอัลกอริทึมการค้นหาด้วยแบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์-จีเอ ดังรูปที่ 4.12 เมื่อทำการเริ่มต้นการค้นหา จนท้ายที่สุด ได้คำตอบของค่าตัวแปรที่เหมาะสมในแต่ละแบบจำลอง

ตารางที่ 4.4 ข้อกำหนดกลยุทธ์วิวัฒนาการในการค้นหาคำตอบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม

กลยุทธ์วิวัฒนาการ	ค่าที่เลือกใช้	กลยุทธ์วิวัฒนาการ	ค่าที่เลือกใช้
Population size	20,000	Mutation	Constraint dependent
Selection	Tournament : 2	Crossover	Intermediate
Reproduction	Crossover fraction : 0.8	Stopping criteria	Function tolerance : 10^{-5}

ผลการค้นหาตัวแปรของแบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์-จีเอ นำไปสู่การคำนวณหาความถี่โหมด เปรียบเทียบกับการทดสอบโมดอลของแบบจำลองที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.5 มีค่าความผิดพลาด น้อยกว่า 0.4 เปอร์เซ็นต์ ทั้งสามโหมดที่พิจารณา ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้แบบจำลองที่ 1 และ

จีเอในการค้นหาตัวแปรของเพลลา ผลที่ได้ใกล้เคียงกับการทดสอบ โมคดอล และเป็นการยืนยันได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์สามารถใช้ประมาณการผลการตอบสนองจริง และมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.12 ไคอะแกรมอัลกอริทึมการค้นหาด้วยแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์-จีเอ

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์-จีเอกับการทดสอบ (แบบจำลองที่ 1)

โหมด	ไฟไนต์อิลิเมนต์-จีเอ (เฮิร์ต)	การทดสอบ โมคดอล (เฮิร์ต)	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
1	241.7	241	0.124
2	664.8	667	0.327
3	1,300.3	1,298	0.176

ตารางที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์-จีเอกับการทดสอบ (แบบจำลองที่ 2)

เงื่อนไข	โหมดการค้ำข้างอิง			ไฟไนต์เอลิเมนต์-จีเอ (เฮิร์ต)	ทดสอบโมดอล (เฮิร์ต)	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
	1	2	3			
I	⊕			239.8	240	0.085
				578.5	635	8.917
				1,127	1,271	11.281
II				271.6	240	13.172
		⊕		631.4	635	0.563
			⊕	1,258	1,271	0.954

สัญลักษณ์ ⊕ แสดงเงื่อนไขการใช้วิธีการ

ตารางที่ 4.7 ค่าตัวแปรการระบุเอกลักษณ์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์-จีเอ

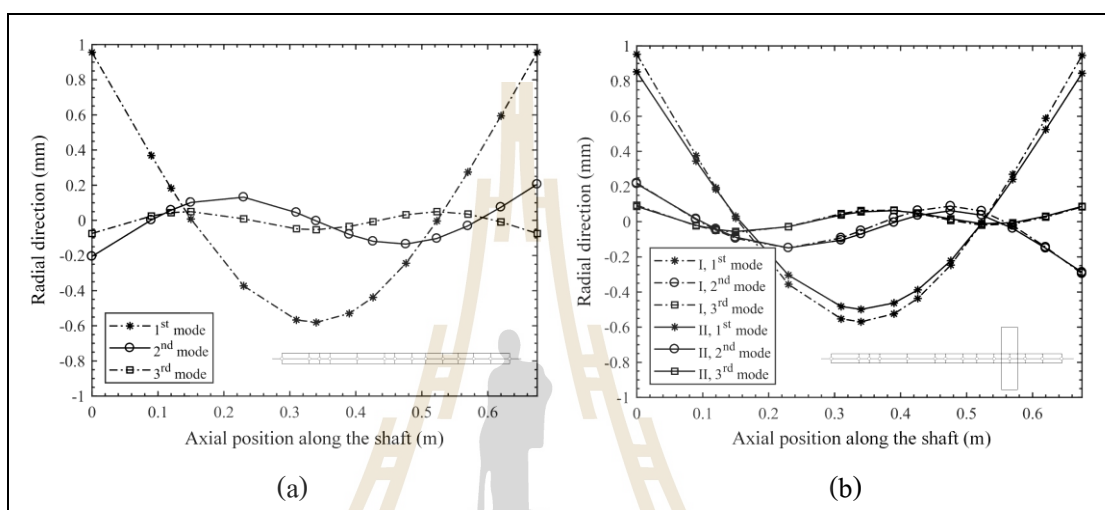
แบบจำลอง/เงื่อนไข	เพลลา		โรเตอร์แม่เหล็ก
	โมดูลัส (N/m^2)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	
1.	1.9129×10^{11}	7,780	-
2.	I	1.9193×10^{11}	5,950
	II	2.0674×10^{11}	9,860

เมื่อเปรียบเทียบรูปร่างสามโหมดแรกระหว่างรูปที่ 4.8 และ 4.12 ทั้งสองเงื่อนไข จะเห็นได้ว่ามีรูปแบบเป็นโหมดการค้ำข้างอิงกับการทดสอบโมดอล ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการกำหนดกรอบในการพิจารณาความถี่จะช่วยให้สามารถค้นหาตัวแปรที่เหมาะสมกับความเป็นจริงได้ และจากการเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ 1 และ 2 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ที่สอดคล้องอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังตารางที่ 4.7 โดยกำหนดให้ตัวแปรของเพลลา และ โรเตอร์แม่เหล็ก ดังนี้

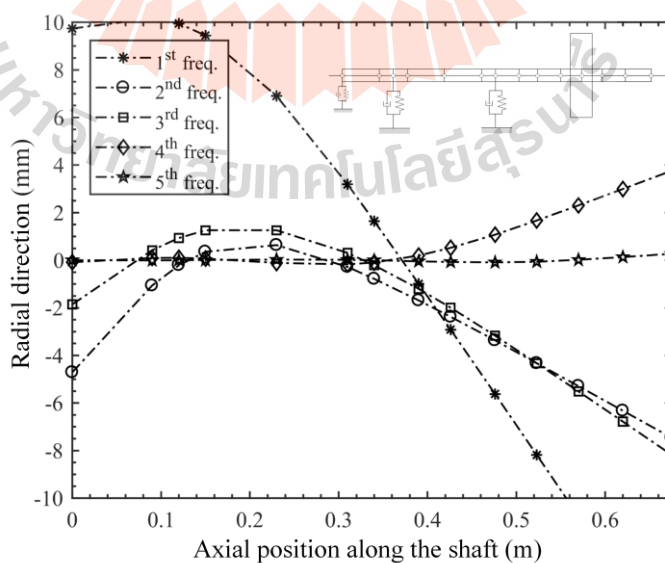
$$\rho_s = 7,567 \text{ kg/m}^3, E_s = 1.9193 \times 10^{11} \text{ N/m}^2 \text{ และ } \rho_d = 5,950 \text{ kg/m}^3$$

เมื่อได้ค่าตัวแปรที่เป็นคุณสมบัติวัสดุของเพลลา และ โรเตอร์แม่เหล็กแล้ว เพื่อกำหนดให้กับแบบจำลองที่ 3 ในการค้นหาตัวแปรของตัวเบริงก์ทั่วไป รวมถึงข้อต่อยึดหยุ่น ผลการค้นหาตัวแปรของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์-จีเอ นำไปสู่การคำนวณหาความถี่โหมด เปรียบเทียบกับการ

ทดสอบโมดอลของแบบจำลองที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4.8 สำหรับโหมดหนึ่ง สอง และสี่ มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ แต่ในโหมดที่สาม และห้ามีค่าความผิดพลาดสูงกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวแปรที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ แสดงตารางที่ 4.9 และหากนำรูปร่างโหมดไปเปรียบเทียบกับ การทดสอบโมดอลจะเห็นได้ว่า ผลการตอบสนองมีลักษณะรูปร่างโหมดที่ไม่มีความสอดคล้องกัน ดังรูปที่ 4.10 และ 4.14 แม้ว่าในบางความถี่สามารถค้นหาคำตอบได้ใกล้เคียงกันก็ตาม



รูปที่ 4.13 รูปร่างสามความถี่แรกจากไฟไนต์อีลิเมนต์-จีโอ แบบจำลองที่ (a) 1 และ (b) 2



รูปที่ 4.14 รูปร่างห้าความถี่แรกจากไฟไนต์อีลิเมนต์-จีโอ ของแบบจำลองที่ 3

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์-จีเอกับการทดสอบ (แบบจำลองที่ 3)

โหนด	ไฟไนต์เอลิเมนต์-จีเอ (เฮิร์ต)	การทดสอบโมดอล (เฮิร์ต)	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
1	10.6	10.5	0.00
2	23.3	23.2	0.43
3	32.4	33.9	4.42
4	36.0	35.9	0.28
5	52.0	49.0	6.12

ตารางที่ 4.9 ค่าแปรการระบุเอกลักษณ์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์-จีเอ (แบบจำลองที่ 3)

ตำแหน่งที่ระบุเอกลักษณ์	ค่าความแข็งของสปริง (นิวตัน/เมตร)		มวล (กิโลกรัม)
	ทิศทาง y	ทิศทาง z	
ข้อต่อยึดหยุ่น	2.3×10^6	0.69×10^6	57
เบริ่งทั่วไปตัวที่ 1	5.7×10^6	0.5×10^6	127
เบริ่งทั่วไปตัวที่ 2	0.67×10^6	80.87×10^6	104

พฤติกรรมการตอบสนองที่ได้ศึกษาจากแบบจำลองของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยระบบเบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีนั้น มีความซับซ้อนมากกว่าเพลากับโรเตอร์แม่เหล็กเพียงอย่างเดียว ทำให้การค้นหาดัชนีแปรทางกายภาพของโครงสร้าง และประมาณค่าหาผลเฉลยมีความผิดพลาด แต่อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากจากการทดสอบ โมดอล และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์-จีเอ ทำให้สามารถกำหนดขอบเขตการทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยระบบเบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีได้ โดยกำหนดขอบเขตความเร็วรอบการหมุนไม่เกิน 60 เฮิร์ต (3,600 รอบต่อนาที) เพื่อควบคุมการทำงานที่ทุกความถี่สั่นพ้องในช่วงดังกล่าว

บทที่ 5

ออกแบบ และทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยระบบ แบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีด้วยการควบคุมแบบแยกอิสระ

การทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยระบบแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี สามารถพิจารณาได้จากพลศาสตร์แบบจำลองของระบบ เพื่ออธิบายพฤติกรรม การเคลื่อนที่ ความสัมพันธ์ทางกายภาพของตำแหน่งรองรับ และสมมติฐานในการลดความเกี่ยวโยงของระบบ นำไปสู่การพิจารณาระบบอย่างง่ายที่มีการควบคุมแบบแยกอิสระ (decoupling control) ในแนวรัศมีของระบบแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น รวมถึงพิจารณาขอบเขตเสถียรภาพของตัวควบคุมระบบแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น และได้นำเสนอตัวชดเชยการรบกวนฮาร์โมนิกส์เข้าร่วมในการควบคุมพฤติกรรมของการหมุน โดยใช้การตรวจวิเคราะห์หาค่าความถี่สั้นพ้อง เพื่อระบุความถี่ (ความเร็วรอบ) ในการทดสอบ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุม ด้วยการวิเคราะห์รูปร่างวงโคจรการหมุนที่ได้ เพื่อวินิจฉัยปัญหาการสั่นจากความถี่สั้นพ้อง

5.1 พลศาสตร์แบบจำลองของระบบควบคุมแบบแยกอิสระ

เมื่อให้ทิศทาง และตำแหน่งของแรงที่กระทำในแนวรัศมีของเพลลา ขณะที่กำหนดพิกัดของกรอบ $O-xyz$ ถูกตั้งที่จุดกำเนิด O สอดคล้องกับจุดศูนย์กลางมวลของเพลลา และแกน x เป็นแกนการหมุนของเพลลา มีสมการควบคุมพื้นฐานอธิบายพฤติกรรมพลวัตในการเคลื่อนที่ของเพลลาที่จุดรองรับรอบจุดศูนย์กลางมวล O เมื่อมีความเร็วรอบของการหมุนคงที่ ได้ว่า

$$\begin{aligned}m\ddot{y} &= f_{my} + f_{by} + f_{uy} \\I_t\ddot{\theta}_y + \Omega I_p\dot{\theta}_z &= l_b f_{bz} - l_m f_{mz} - l_u f_{uz} \\m\ddot{z} &= f_{mz} + f_{bz} + f_{uz} - g \\I_t\ddot{\theta}_z - \Omega I_p\dot{\theta}_y &= l_m f_{my} - l_b f_{by} + l_u f_{uy}\end{aligned}\tag{5.1}$$

โดยที่ y, z คือ การกระจัดเชิงเส้นของจุดศูนย์กลางมวล O ในทิศทาง y และ z
 θ_y, θ_z คือ การกระจัดเชิงมุมรอบจุดศูนย์กลางมวล O ในทิศทาง y และ z
 n คือ ทิศทางของแรงที่กระทำในทิศทาง y หรือ z

m	คือ มวลรวมเทียบเท่าของเพลลา
Ω	คือ ความเร็วเชิงมุมของกรอบอ้างอิงรอบแกน x
I_t	คือ โมเมนต์เฉื่อยมวลตามขวาง
I_p	คือ โมเมนต์เฉื่อยมวลเชิงขั้ว
r	คือ รัศมีเพลลา
l_s	คือ ความยาวเพลลา
$l_{...}$	คือ ระยะ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เทียบกับจุดศูนย์กลางมวล O
f_{m+}, f_{m-}	คือ แรงเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น และแรงเบริงทั่วไปในทิศทาง n
f_{un}	คือ แรงเนื่องจากความไม่สมดุลในทิศทาง n

ตารางที่ 5.1 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์

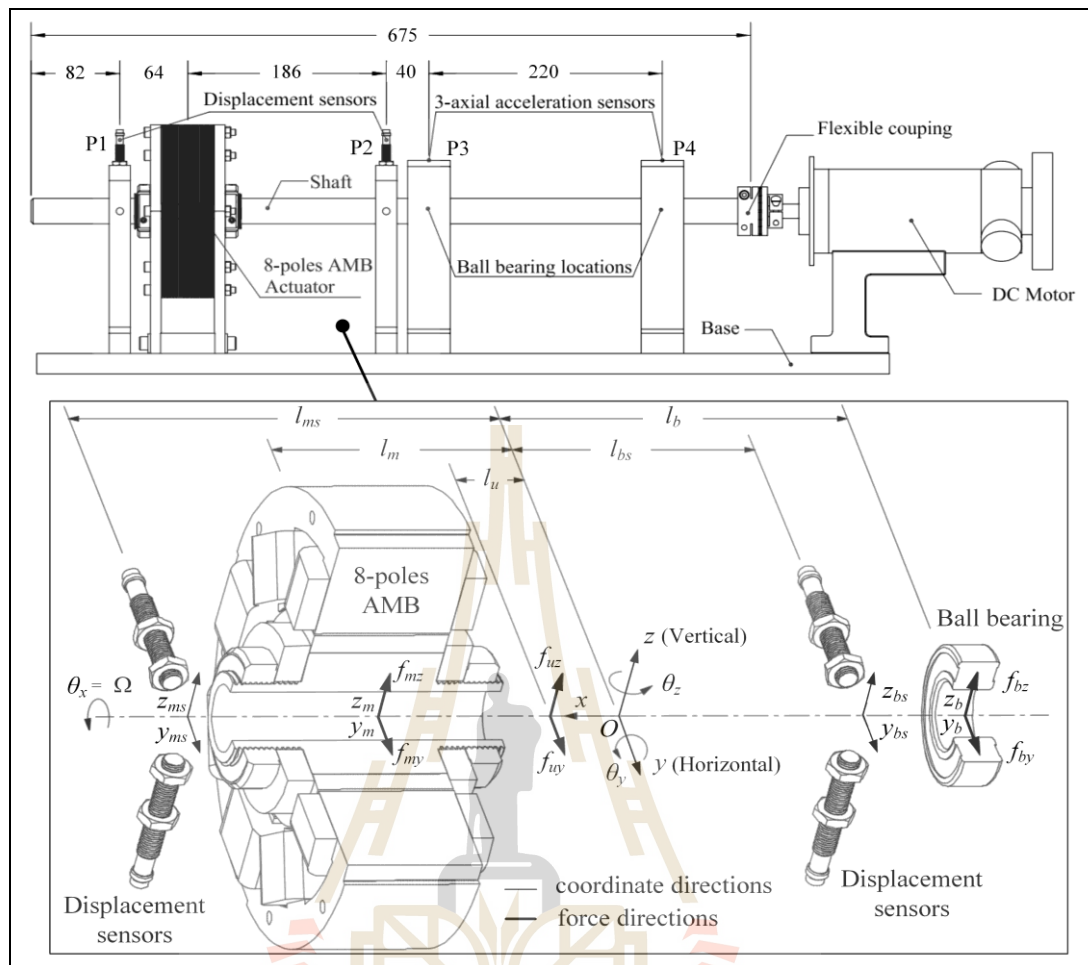
พิกัด	เซ็นเซอร์/ประเภท	ตำแหน่งติดตั้ง
P1	วัดการกระจัด/แบบไม่สัมผัส	ข้างเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น
P2	วัดการกระจัด/แบบไม่สัมผัส	ข้างเบริงทั่วไปตัวที่ 2
P3	วัดความเร่ง/แบบสัมผัส	บนเบริงทั่วไปตัวที่ 2
P4	วัดความเร่ง/แบบสัมผัส	บนเบริงทั่วไปตัวที่ 1

โครงสร้างของระบบโรเตอร์ แสดงในรูปที่ 5.1 เมื่อโรเตอร์รองรับด้วยเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นที่ปลายด้านหนึ่ง โดยปลายอีกด้านรองรับด้วยเบริงทั่วไปที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยข้อต่อยืดหยุ่น และใช้เบริงทั่วไปอีกตัวมารองรับตรงกึ่งกลาง เพื่อป้องกันการส่งกำลังข้ามมอเตอร์ที่ทำให้ข้อต่อเกิดการเหวี่ยงตัว อีกทั้งเป็นตัวจำกัดการเบี่ยงเบนของเพลลา มีเซ็นเซอร์ตรวจวัดการกระจัดในแนวนอน และแนวตั้งของการรองรับ แสดงดังตารางที่ 5.1

แรงแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับกระแสควบคุม และการกระตุ้นที่เป็นเชิงเส้น อธิบายได้จากสมการ (3.2) และ (3.5) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$f_{mm} = f_{n+} - f_{n-} = k_m \left(\frac{i_0 + i_n}{n_0 - n_m} \right)^2 - k_m \left(\frac{i_0 - i_n}{n_0 + n_m} \right)^2 = k_n n_m - k_i i_n \quad (5.2)$$

โดย k_i และ k_n คือค่าความแข็งแรงกระแส และค่าความแข็งแรงการกระตุ้นของเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น สอดคล้องกับสมการ (3.3) เมื่อ k_m คือค่าคงที่แรงแม่เหล็ก



รูปที่ 5.1 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งต่าง ๆ กับแรงกระทำของชุดทดสอบ

สำหรับแรงเบริงทั่วไป มีสมการความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับความหน่วง และความแข็งของสปริงในเบริงดังนี้

$$f_{bn} = -kn_b - c\dot{n}_b \quad (5.3)$$

เมื่อ c คือความหน่วง และ k คือความแข็งของสปริงในเบริงทั่วไป

สมมติให้การเปลี่ยนแปลงการกระจัดมีขนาดเล็ก ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรองรับของเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น และเบริงทั่วไป (y_m, y_b, z_m, z_b) เทียบกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล O และในทำนองเดียวกัน ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเซ็นเซอร์ $(y_{ms}, y_{bs}, z_{ms}, z_{bs})$ เทียบกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล O อธิบายได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
y_m &= y + l_m \theta_z, z_m = z - l_m \theta_y, y_b = y - l_b \theta_z, z_b = z + l_b \theta_y, \\
y_{ms} &= y + l_{ms} \theta_z, z_{ms} = z - l_{ms} \theta_y, y_{bs} = y - l_{bs} \theta_z, z_{bs} = z + l_b \theta_y
\end{aligned} \tag{5.4}$$

ให้ตัวห้อย s เป็นการอ้างอิงถึงตำแหน่งเซ็นเซอร์ เมื่อแทนสมการ (5.2) ถึง (5.4) ลงในสมการ (5.1) จะได้สมการความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งเซ็นเซอร์ จัดรูปได้ว่า

$$\begin{aligned}
\ddot{y}_{ms} - \gamma_1 (\dot{z}_{bs} - \dot{z}_{ms}) - k_s (a_1 y_{ms} + a_2 y_{bs}) + k (a_3 y_{ms} + a_4 y_{bs}) \\
+ c (a_3 \dot{y}_{ms} + a_4 \dot{y}_{bs}) &= b_1 k_i i_y + d_1 f_{uy} \\
\ddot{y}_{bs} + \gamma_2 (\dot{z}_{bs} - \dot{z}_{ms}) - k_s (a_5 y_{ms} + a_6 y_{bs}) + k (a_7 y_{ms} + a_8 y_{bs}) \\
+ c (a_7 \dot{y}_{ms} + a_8 \dot{y}_{bs}) &= b_2 k_i i_y + d_2 f_{uy} \\
\ddot{z}_{ms} + \gamma_1 (\dot{y}_{bs} - \dot{y}_{ms}) - k_s (a_1 z_{ms} + a_2 z_{bs}) + k (a_3 z_{ms} + a_4 z_{bs}) \\
+ c (a_3 \dot{z}_{ms} + a_4 \dot{z}_{bs}) &= b_1 k_i i_z + d_1 f_{uz} - g \\
\ddot{z}_{bs} - \gamma_2 (\dot{y}_{bs} - \dot{y}_{ms}) - k_s (a_5 z_{ms} + a_6 z_{bs}) + k (a_7 z_{ms} + a_8 z_{bs}) \\
+ c (a_7 \dot{z}_{ms} + a_8 \dot{z}_{bs}) &= b_2 k_i i_z + d_2 f_{uz} - g
\end{aligned} \tag{5.5}$$

กำหนดให้ $l_s = l_{ms} + l_{bs}$ เมื่อ $I_t = \frac{1}{4} m r^2 + \frac{1}{12} m l_s^2$ และ $I_p = \frac{1}{2} m r^2$ โดยที่

$$\begin{aligned}
\gamma_1 &= \frac{l_{ms} I_p \Omega}{I_s I_t}, \quad \gamma_2 = \frac{l_{bs} I_p \Omega}{I_s I_t}, \\
b_1 &= \frac{l_{ms} l_m}{I_t} + \frac{1}{m}, \quad b_2 = \frac{1}{m} - \frac{l_{bs} l_m}{I_t}, \quad d_1 = \frac{l_{ms} l_u}{I_t} + \frac{1}{m}, \quad d_2 = \frac{1}{m} - \frac{l_{bs} l_u}{I_t}, \\
a_1 &= \frac{l_{ms}}{I_t} (l_{bs} l_m + l_m^2) + \frac{1}{m} (l_m + l_{bs}), \quad a_2 = -\frac{l_{ms}}{I_t} (l_m^2 - l_{ms} l_m) + \frac{1}{m} (l_{ms} - l_m), \\
a_3 &= \frac{l_{ms}}{I_t} (l_b^2 - l_{bs} l_b) + \frac{1}{m} (l_{bs} - l_b), \quad a_4 = -\frac{l_{ms}}{I_t} (l_{ms} l_b + l_b^2) + \frac{1}{m} (l_b + l_{ms}), \\
a_5 &= -\frac{l_{bs}}{I_t} (l_{bs} l_m + l_m^2) + \frac{1}{m} (l_m + l_{bs}), \quad a_6 = \frac{l_{bs}}{I_t} (l_m^2 - l_{ms} l_m) + \frac{1}{m} (l_{ms} - l_m), \\
a_7 &= -\frac{l_{bs}}{I_t} (l_b^2 - l_{bs} l_b) + \frac{1}{m} (l_{bs} - l_b), \quad a_8 = \frac{l_{bs}}{I_t} (l_b l_{ms} + l_b^2) + \frac{1}{m} (l_b + l_{ms})
\end{aligned} \tag{5.6}$$

ข้อกำหนดสมมติฐานของระบบเพื่อลดความเกี่ยวข้องของระบบ มีดังนี้

1. สมมติให้ $L_s I_t$ มีค่ามากกว่า $L_{ms} I_p$ และ $L_{bs} I_p$ เนื่องจากขนาดความยาวเพลลา L_s มีค่ามากกว่ารัศมีของเพลลา r ทำให้เทอมของ γ_1 และ γ_2 มีค่าน้อยมาก ๆ โดยกำหนดให้เทอมนี้เป็นศูนย์ได้ ดังนั้น สมการ (5.5) จะไม่มีผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่เกี่ยวข้องซึ่งกันและกัน

2. สมมติให้ปลายเพลลา ณ ตำแหน่งแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น (y_{ms}, z_{ms}) จะมีขนาดการสั่นสูงกว่าที่ตำแหน่งรองรับแบริ่งทั่วไป (y_{bs}, z_{bs}) เมื่อไม่มีการควบคุมระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นทำให้

$$y_{ms} |k_s a_1 + k a_3| \gg y_{bs} |k_s a_2 + k a_4| \quad \text{และ} \quad \dot{y}_{ms} |c a_3| \gg \dot{y}_{bs} |c a_4| \quad \text{รวมถึง}$$

$$z_{ms} |k_s a_1 + k a_3| \gg z_{bs} |k_s a_2 + k a_4| \quad \text{และ} \quad \dot{z}_{ms} |c a_3| \gg \dot{z}_{bs} |c a_4|$$

และเมื่อมีการควบคุมระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น จะทำให้

$$y_{bs} |k_s a_6 + k a_8| \gg y_{ms} |k_s a_5 + k a_7| \quad \text{และ} \quad \dot{y}_{bs} |c a_8| \gg \dot{y}_{ms} |c a_7| \quad \text{รวมถึง}$$

$$z_{bs} |k_s a_6 + k a_8| \gg z_{ms} |k_s a_5 + k a_7| \quad \text{และ} \quad \dot{z}_{bs} |c a_8| \gg \dot{z}_{ms} |c a_7|$$

เมื่อสมมติฐานข้างต้นเป็นจริง สามารถลดรูปสมการ (5.5) เหลือเพียงการกระตุ้นที่เกิดขึ้นกับทิศทาง การกระทำที่ตำแหน่งแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น กับตำแหน่งแบริ่งทั่วไปแยกออกจากกันได้

ผลจากข้อกำหนดสมมติฐานข้างต้น ทำให้ระบบที่มีความเกี่ยวข้องกันในพิกัดต่าง ๆ ถูกแยกอิสระกันอย่างสมบูรณ์ในแต่ละทิศทาง อีกทั้งยังมีประโยชน์ในการออกแบบระบบควบคุมที่เป็นอิสระหรือไม่เกี่ยวข้องกันได้ และการควบคุมพฤติกรรมการณ์ของเพลลาด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี สามารถลดรูปสมการ (5.5) และเขียนใหม่เฉพาะตำแหน่งควบคุมของแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น ได้ว่า

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{ms} - k_s a_1 y_{ms} &= b_1 k_i y + u_y \\ \ddot{z}_{ms} - k_s a_1 z_{ms} &= b_1 k_i z + u_z \end{aligned} \quad (5.7)$$

โดยเทอมของ u_y และ u_z อธิบายถึงผลกระทบรวมของการรบกวนของทั้งระบบประกอบด้วย แรงเนื่องจากความไม่สมดุล แรงจากแบริ่งทั่วไป รวมถึงแรงจากน้ำหนักในทิศทาง y และ z ดังนี้

$$\begin{aligned} u_y &= d_1 f_{uy} - ka_3 y_{ms} - ca_3 \dot{y}_{ms} \\ u_z &= d_1 f_{uz} - ka_3 z_{ms} - ca_3 \dot{z}_{ms} - g \end{aligned} \quad (5.8)$$

เมื่อ

$$f_{uy} = m_u e \Omega^2 \cos(\Omega t), f_{uz} = m_u e \Omega^2 \sin(\Omega t) \quad (5.9)$$

และเขียนในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน ได้ว่า

$$G_p(s) = \frac{b_1 k_i}{s^2 - a_1 k_s} \quad (5.10)$$

การป้อนสัญญาณควบคุม v_n จากไมโครคอนโทรลเลอร์ให้แกนขั้วในทิศทาง n โดยใช้เทคนิคพัลส์วidthมอดูเลชั่นออกจากบอร์ดควบคุมเพื่อควบคุมชุดขับเคลื่อนที่มี duty cycle (δ) จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความกว้างสัญญาณ และนำมาเขียนเป็นสมการวงจรขับเคลื่อน มีสัดส่วนของสัญญาณควบคุมกับค่ากระแสที่ป้อนให้กับแกนขั้วแม่เหล็ก ดังนี้

$$i_n = g_a v_n \Rightarrow \delta \approx \begin{cases} 1, & v_n \geq 1 \\ v_n, & 0 < v_n < 1 \\ 0, & v_n \leq 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

เมื่อ g_a เป็นค่าอัตราขยายของตัวขับเคลื่อน ซึ่งได้อธิบายโดยละเอียดแล้วในหัวข้อ 3.3

5.2 วิเคราะห์เสถียรภาพการควบคุมแบบแยกอิสระ

จากสมการ (5.10) จะเห็นได้ว่าเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพเนื่องจาก หากจัดเทอมของแรงแม่เหล็กในทิศทางใด ๆ แล้ว สมการค่าความแข็งแรงการกระตุ้นในวงเปิดมีค่าเป็นลบ ระบบจึงมีความจำเป็นต้องมีตัวควบคุม และแนวคิดของตัวควบคุมที่ง่ายที่สุดคือ ตัวควบคุมพีไอดี เพื่อควบคุมให้โรเตอร์อยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางในแนวรัศมี ด้วยการควบคุมกระแสในเทอมของแรงดันที่ขึ้นอยู่กับความผิดพลาดการกระตุ้น กำหนดได้ดังนี้

$$v_n(t) = g_p v_s(t) + g_i \int_0^t v_s(\tau) d\tau + g_d \frac{dv_s(t)}{dt} \quad (5.12)$$

เมื่อความผิดพลาดการกระตุ้น $n_e(t)$ สามารถใช้ทฤษฎีการควบคุม ได้ว่า

$$n_e(t) = n_r(t) - n(t) \quad (5.13)$$

ซึ่งมีการกระตุ้นอ้างอิงคือ $n_r(t)$ มีค่าคงที่หรือระยะเวลากระตุ้นใด ๆ หากแทนสมการ (5.12) และ (3.10) รวมถึงความสัมพันธ์ของสัดส่วนของสัญญาณเซ็นเซอร์กับการกระตุ้นของโรเตอร์ในสมการ (3.15) ลงในสมการ (5.2) ได้ว่า

$$f_{mn} = k_i g_a g_{sn} \left(g_p n_e(t) + g_i \int_0^t n_e(\tau) d\tau + g_d \frac{dn_e(t)}{dt} \right) + k_n n_e(t) \quad (5.14)$$

ดังนั้น สามารถพิจารณาในเทอมของเงื่อนไขที่ขึ้นกับการกระตุ้นได้ คือ

$$f_{prop} = (k_i g_a g_p g_{sn} - k_n) n_e(t) \quad (5.15ก)$$

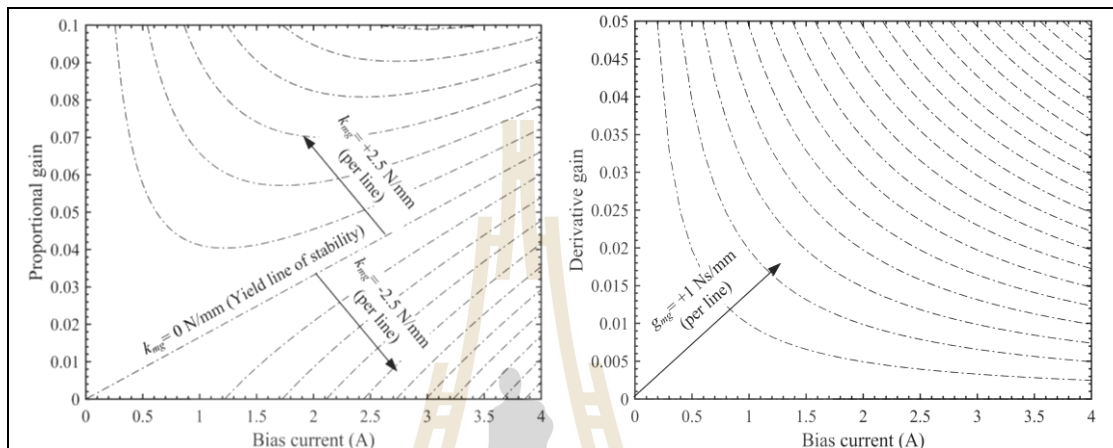
$$f_{deriv} = k_i g_a g_d g_{sn} \frac{dn_e(t)}{dt} \quad (5.15ข)$$

$$f_{int} = k_i g_a g_i g_{sn} \int_0^t n_e(\tau) d\tau \quad (5.15ค)$$

ระบบมีความสามารถในการควบคุมเชิงเส้นที่มีเสถียรภาพ ด้วยการเทียบเคียงค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งของสปริง k_{mg} และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง d_{mg} กับระบบมวล สปริง และ ตัวหน่วง กำหนดกระแสเริ่มต้น i_0 และค่าอัตราขยาย g_p จากสมการ (5.15ก) ได้ว่า

$$g_p > \frac{k_{mg} + k_n}{k_i g_a g_{sn}} \quad (5.16)$$

โดยให้ค่า k_{mg} เป็นค่าในการออกแบบ และสามารถนำมาพล็อตขอบเขตเสถียรภาพเชิงเส้นได้แสดงดังรูปที่ 5.2 เมื่อพิจารณาให้ k_{mg} เพิ่มขึ้น และลดลงทีละ 2.5 นิวตันต่อมิลลิเมตร และ d_{mg} เพิ่มขึ้นทีละ 1 นิวตันวินาทีต่อมิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า ที่ค่ากระแสเริ่มต้นสูง และค่าอัตราขยาย g_p ที่ต่ำทำให้เกิดค่า k_{mg} เป็นลบ ซึ่งจะไม่มีเสถียรภาพในการควบคุม



รูปที่ 5.2 แผนภาพเสถียรภาพของอัตราขยาย g_p และ g_d

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กระแสเริ่มต้น 2 แอมป์ จะต้องมีค่า g_p มากกว่า 0.034 (แอมป์ต่อมิลลิเมตร) และ g_d มากกว่าศูนย์ (แอมป์วินาทีต่อมิลลิเมตร) จึงจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพในการควบคุม ซึ่งเป็นการเลือกตัวควบคุมพีไอดีในอุดมคติเท่านั้น ที่ความหน่วงสามารถทำงานได้ทุกย่านความถี่ (ช่วงแบนด์วิดท์ที่ไม่จำกัด) อย่างไรก็ตามการออกแบบในความเป็นจริงนั้น จะมีช่วงแบนด์วิดท์ที่สามารถทำงานได้ช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งทอมของความหน่วงจะมีผลกระทบกับสัญญาณการควบคุม หากควบคุมนอกช่วงแบนด์วิดท์ที่ได้ออกแบบไว้ โดยขอบเขตจำกัดของแบนด์วิดท์สามารถพิจารณาให้มีความสมบูรณ์ขึ้น โดยการเพิ่มส่วนของโพลให้กับทอมของตัวควบคุมพีดี หากพิจารณาบน s โดเมนของสมการ (5.14) ได้ว่า

$$\begin{aligned} G_c(s) &= \frac{f_{mn}(s)}{n_e(s)} = k_i g_a g_{sn} \left(\frac{g_p + g_d s}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} + \frac{g_i}{s} \right) + k_n \\ &= k_i g_a g_{sn} \left(\frac{g_p (\tau_0 s + 1)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} + \frac{g_i}{s} \right) + k_n \end{aligned} \quad (5.17)$$

ซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับการใช้ตัวกรองสัญญาณเข้ามาช่วย ดังนั้นเพื่อเป็นการจัดการเทอมสัญญาณรบกวน ถูกกำหนดในรูปสัดส่วนของค่าความถี่สูงสุดถึงต่ำสุดอยู่ที่ประมาณสิบเท่า และให้ค่าคงที่ลักษณะการส่งผ่านแถบความถี่กรอง ซึ่งเป็นค่าควบคุมโดย τ_2 ควรมีค่าเป็นหนึ่งส่วนสามของ τ_1 ได้ว่า

$$\tau_0 = 10\tau_1 \text{ และ } \tau_1 = 3\tau_2 \quad (5.18)$$

ให้ τ_0 เป็นสัดส่วนของค่า g_d ต่อ g_p ซึ่งการออกแบบนั้น กำหนดให้ $g_i = 0$ เป็นค่าเริ่มต้น และตรวจสอบผลกระทบจากการเลือก τ_2 ให้ τ_2 มีค่าสูงสุด โดยใช้การปรับจูนค่าในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด จากการทดลองจริง ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุม ดังนี้

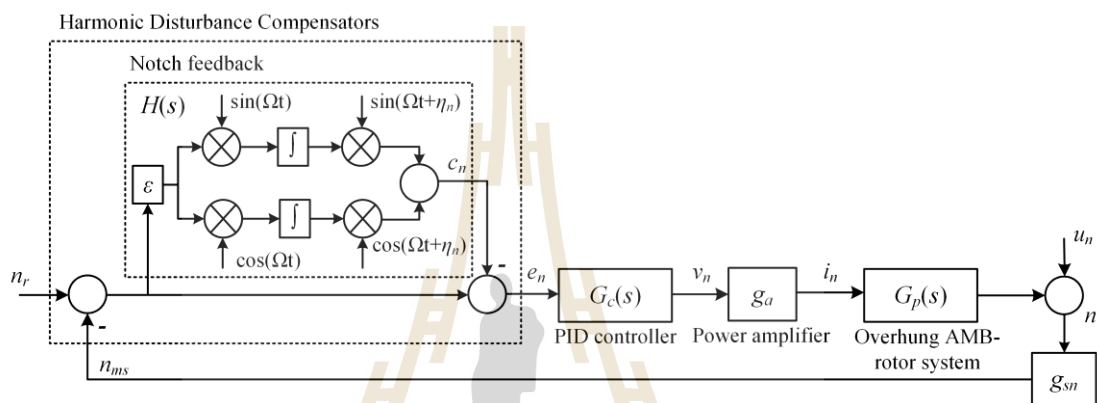
$$g_p = 0.034, g_d = 0.0001 \text{ และ } \tau_1 = 0.003, \tau_2 = 0.001 \quad (5.19)$$

ในลำดับถัดไปเป็นการเลือก g_i ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า ถ้ามีค่ามากจะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพแต่ถ้ามีค่าน้อยเกินไปจะทำให้ระบบเข้าสู่จุดสมดุลช้า ได้ทำการทดลองแล้วปรับจูนค่า g_i เพื่อให้ระบบเป็นไปตามเงื่อนไขคือ การพุ่งเกินสูงสุดไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเวลาขึ้น และเวลาเข้าขอบเขต กำหนดให้น้อยกว่า 0.5 และ 1 วินาที ตามลำดับ ทำให้ได้ค่า $g_i = 0.5$

5.3 ออกแบบตัวควบคุมแบบแยกอิสระพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี

การลอยตัวของโรเตอร์ในงานวิจัยนี้ พิจารณาจากระบบการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ลอยตัวในอากาศที่สามารถควบคุมแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในการดึงดูดได้ จากระยะระหว่างโรเตอร์กับแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง n , กำหนดให้เป็นระยะในตำแหน่งสมดุลที่สัมพันธ์กับแนวศูนย์กลางการหมุนของเพลลา โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับโรเตอร์สามารถอธิบายด้วยสมการทางพลวัต $G_p(s)$ เมื่อมีความไม่สมดุลที่เกิดจากภาระภายนอกที่มากระทำกับโรเตอร์ ระบบจะสามารถตรวจวัดสัญญาณได้ด้วยเซ็นเซอร์ n_n ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าที่ไม่ทราบ มีทั้งขนาดและเฟสของการสั่นนั้น ๆ สัญญาณอ้างอิงจะเป็นตัวกำหนดให้เพลลาเคลื่อนที่ภายในวงโคจรของแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นได้อย่างอิสระ และควบคุมขนาดของการรบกวนที่เกิดขึ้นได้ด้วยตัวควบคุมพีไอดี $G_c(s)$ แสดงดังรูปที่ 5.3 หากเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในขณะที่ทำงาน อย่างทันทีทันใด จะส่งผลต่อเฟสการหมุนโดยตรง จึงได้ประยุกต์ใช้ตัวชดเชยการรบกวนฮาร์โมนิกส์

(harmonic disturbance compensator อ่านว่า เฮชดีซี) ซึ่งเป็นเทคนิคการชดเชยที่มีพื้นฐานมาจาก การกรองสัญญาณแบบรอยบาก หรือตัวกรองนอติซ์ ทำให้ระบบมีขอบของเสถียรภาพในลู่วงปิด การ ออกแบบระบบควบคุมเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น จะใช้ในการควบคุมแบบแยกส่วนอิสระในแนว รัศมี เพื่อสร้างแรงดึงดูดเพลานในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของเพลานั้น โดยการควบคุม 2 ส่วนคือ ควบคุมขนาดของแรงดึงดูดด้วยตัวควบคุมพีไอดี และชดเชยเฟสการหมุนด้วยตัวชดเชยการ ครอบวนฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 5.3 ไลอะแกรมตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี

โครงสร้างภายในของเฮชดีซี มีเฟสเลื่อนคือ η_n โดยให้ n_{ms} และ c_n แสดงถึงสัญญาณความ ผิดปกติจากสัญญาณที่วัดได้ และสัญญาณการรบกวนฮาร์โมนิกส์ตามลำดับ องค์ประกอบของ สัญญาณอธิบายได้ดังนี้

$$c_n = [\sin(\Omega t + \eta_n) \quad \cos(\Omega t + \eta_n)] \int \begin{bmatrix} n_{ms} \sin(\Omega t) \\ n_{ms} \cos(\Omega t) \end{bmatrix} dt \quad (5.20)$$

สมมติฐานเริ่มต้น กำหนดให้ความเร็วรอบการหมุนขณะทำงานคงที่ นั่นคืออัตราการเปลี่ยนแปลง ความเร็วเป็นศูนย์ สามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันสัญญาณการรบกวนฮาร์โมนิกส์เทียบ กับเวลา ได้ว่า

$$\ddot{c}_n = -\Omega^2 c_n - \Omega \sin(\eta_n) n_{ms} + \cos(\eta_n) \dot{n}_{ms} \quad (5.21)$$

เป็นการง่ายที่จะอธิบายสมการพลวัตของการตอบสนองเชิงความถี่ของ $H(s)$ ด้วยการแปลงลาปลาซ

$$H(s) = \frac{c_n}{n_{ms}} = \frac{\varepsilon(\cos \eta_n - \Omega \sin \eta_n)}{s^2 + \Omega^2} \quad (5.22)$$

เมื่อ ε คืออัตราขยายของตัวชดเชยเฮชชีซี ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนจาก n_{ms} ไปยัง e_n จะเป็นผลมาจากฟังก์ชันของความถี่รอบการหมุน Ω เท่านั้น ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$D(s) = \frac{e_n}{n_{ms}} = (1 + H(s))^{-1} = \frac{s^2 + \Omega^2}{s^2 + \varepsilon \cos \eta_n \cdot s + (\Omega^2 - \Omega \varepsilon \sin \eta_n)} \quad (5.23)$$

หากสังเกตฟังก์ชัน $D(s)$ จะพบว่า มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับตัวกรองนอติช โดยจะมีคุณสมบัติดังรูปที่ 2.7 แสดงฟังก์ชันการตอบสนองเชิงขนาดของตัวกรองนอติช เมื่อแถบความถี่จะถูกลดทอนหรือขจัดทิ้ง มีจุดกึ่งกลางอยู่ที่ Ω โดยใช้ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ (2.96) ทำให้ได้ความกว้างแถบเท่ากับ

$$Q_b = \frac{\sqrt{\Omega^2 - \Omega \varepsilon \sin \eta_n}}{\varepsilon \cos \eta_n} \quad (5.24)$$

สำหรับฟังก์ชัน $D(s)$ ถูเข้าสู่ศูนย์ เมื่อ $s = j\Omega$ สัญญาณในการควบคุม e_n จะเป็นตัวขจัดสัญญาณที่เทียบเท่ากับความเร็วรอบการหมุนนั้น ๆ ดังนั้น สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนจาก u_n ไป e_n ได้ว่า

$$\frac{e_n}{u_n} = \frac{g_n(s^2 + \Omega^2)S(s)}{(s^2 + \Omega^2) + \varepsilon(\cos \eta_n \cdot s - \Omega \sin \eta_n)S(s)} \quad (5.25)$$

กำหนด

$$S(s) = \frac{1}{1 + g_{sn} g_a G_c(s) G_p(s)} \quad (5.26)$$

เมื่อ g_{sn} คืออัตราขยายของเซ็นเซอร์ และ g_a คืออัตราขยายของวงจรรายกำลัง ดังนั้น เสถียรภาพลู่วางปิดสามารถหาได้จากรากของสมการลักษณะเฉพาะ ดังนี้

$$(s^2 + \Omega^2) + \varepsilon(\cos \eta_n \cdot s - \Omega \sin \eta_n)S(s) = 0 \quad (5.27)$$

ถ้า $\varepsilon = 0$ และ $s = j\Omega$ จะได้ฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงของ $s(\varepsilon)$ ที่ $\varepsilon = 0$ อธิบายทางเดินรากของโลกัส (root locus) ที่เป็นเชิงเส้นเริ่มต้นที่ $j\Omega$ และ $\varepsilon = 0$ ได้ว่า

$$\frac{\partial s(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} = -\frac{1}{2}(j\Omega \cos \eta_n - \Omega \sin \eta_n)S(j\Omega) \quad (5.28)$$

จากการประยุกต์ใช้โครงสร้างของตัวกรองสัญญาณรบกวนรวมกับเฟสเลื่อนในการชดเชย ทำให้การออกแบบระบบควบคุมเสถียรที่มีความสะดวกในทางปฏิบัติเป็นอย่างมาก อีกทั้งมีพารามิเตอร์ (หรืออัตราขยาย) ในการออกแบบหรือปรับจูนเพียง 2 ตัวคือ ε และ η_n ตามลำดับ โดย ε จะมีผลต่อการชดเชยการลู่เข้าที่ความเร็วรอบการหมุนนั้น ๆ และ η_n สามารถเลือกให้เหมาะสมกับเฟสเลื่อนที่เกิดขึ้นจากภาระกรรมภายนอกได้ และมีเงื่อนไขเสถียรภาพ ดังนี้

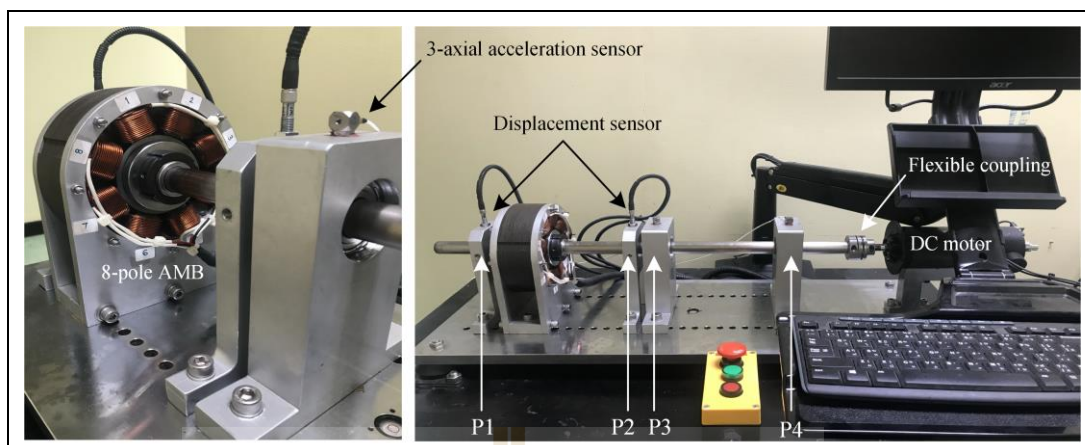
$$\frac{\pi}{2} < \arg((- \Omega \sin \eta_n + j\Omega \cos \eta_n)S(j\Omega)) < \frac{3\pi}{2} \quad (5.29)$$

5.4 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบแยกอิสระ

ในการทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีด้วยการควบคุมแบบแยกอิสระ มีลำดับการทดสอบดังนี้

5.4.1 การวิเคราะห์ความถี่สั้นพ้องด้วยวิธีแผนภาพความเร็ว

เมื่อพิจารณาการหมุนทุก ๆ ช่วงเวลาการหมุนจะเกิดการกระตุ้นแรงขึ้น เมื่อวัดสัญญาณการสั่นซึ่งเป็นผลการตอบสนองจริงจากเซ็นเซอร์ โดยมีลักษณะสัญญาณแบบฮาร์โมนิกที่แสดงอยู่บนโดเมนเวลา ทำให้สามารถวินิจฉัยสภาพหรือข้อบกพร่องได้จากขนาดของการสั่นสะเทือนเพียงอย่างเดียว ในขณะที่การกระตุ้นนั้นไม่เป็นรูปแบบฮาร์โมนิก แต่ยังเป็นคาบสัญญาณแล้ว การวิเคราะห์จำเป็นต้องนำสเปกตรัมมาพิจารณาด้วย เพื่อให้ได้ข้อมูล หรือผลการตอบสนองของสัญญาณการสั่นที่ความถี่ต่าง ๆ กัน ในการวินิจฉัยสาเหตุการสั่นบนโดเมนความถี่



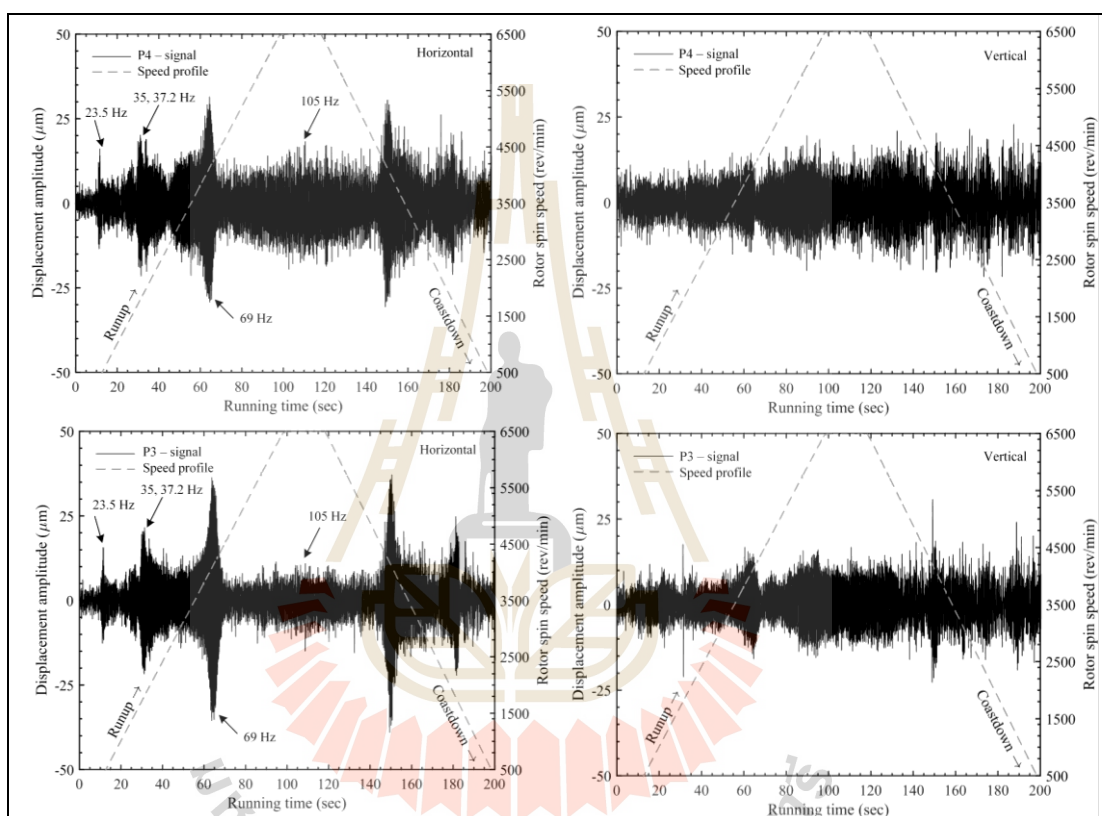
รูปที่ 5.4 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วย
แบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี

สำหรับการวิเคราะห์ระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี จำเป็นต้องระบุความถี่สั่นพ้อง หรือความเร็วรอบในการทดสอบระบบก่อน โดยใช้การตรวจด้วยวิธีแผนภาพความเร็วของระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นที่ยังไม่มีการควบคุม แล้วใช้ผลการทดสอบที่ได้ มากำหนดขอบเขตในการควบคุม เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทดสอบ ตัวควบคุม มีการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5.4

การเก็บสัญญาณบนโดเมนเวลา มาคำนวณและพล็อตขนาดการสั่น และความถี่ของสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ กลายเป็น สเปกตรัม ของทุก ๆ ช่วงเวลาที่พิจารณา หลักจากนั้นปรับความเร็วรอบการหมุนเพิ่มขึ้นหรือลดลง ก็จะเกิดสเปกตรัมในทุก ๆ ช่วงความเร็วรอบด้วย ซึ่งสามารถเก็บสเปกตรัมจากความเร็วรอบต่ำไปยังความเร็วรอบสูง (run-up) หรือจากความเร็วรอบสูงไปมาความเร็วรอบต่ำ (coast-down) ก็ได้ เมื่อนำมาพล็อตบนแกน 3 มิติ จะเรียกว่า แผนภาพความเร็ว หรือวอเตอร์ฟอลล์ (waterfall) ที่มีความสัมพันธ์ทั้งขนาดการสั่น ความถี่ และความเร็วรอบในการหมุน ผลที่ได้จะเห็นลักษณะของสัญญาณสเปกตรัม ที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วรอบการหมุน มีค่าสูงสุดบนเส้นแนวตรง และหากโครงสร้างมีการสั่นพ้อง (เรโซแนนซ์) จะปรากฏจุดสูงสุดที่ความถี่ ตรงกับความเร็วรอบในการกระตุ้น และแสดงตำแหน่งสัมพันธ์ตามตารางที่ 5.1

ในการทดสอบนี้ ได้กำหนดช่วงความเร็วรอบการหมุนอยู่ที่ 500 ถึง 6,500 รอบต่อนาที และเก็บภายในช่วง 200 วินาที ทั้งความเร็วรอบสูงไปรอบต่ำ และความเร็วรอบต่ำไปรอบสูง ซึ่งสัมพันธ์กับของขนาดการสั่น ที่ตำแหน่งรองรับด้วยแบริ่งทั่วไป แสดงดังรูป 5.5 หลังจากนั้นซอฟต์แวร์จะแปลงสัญญาณการตอบสนองทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงทีละ 50 รอบต่อนาที เป็น

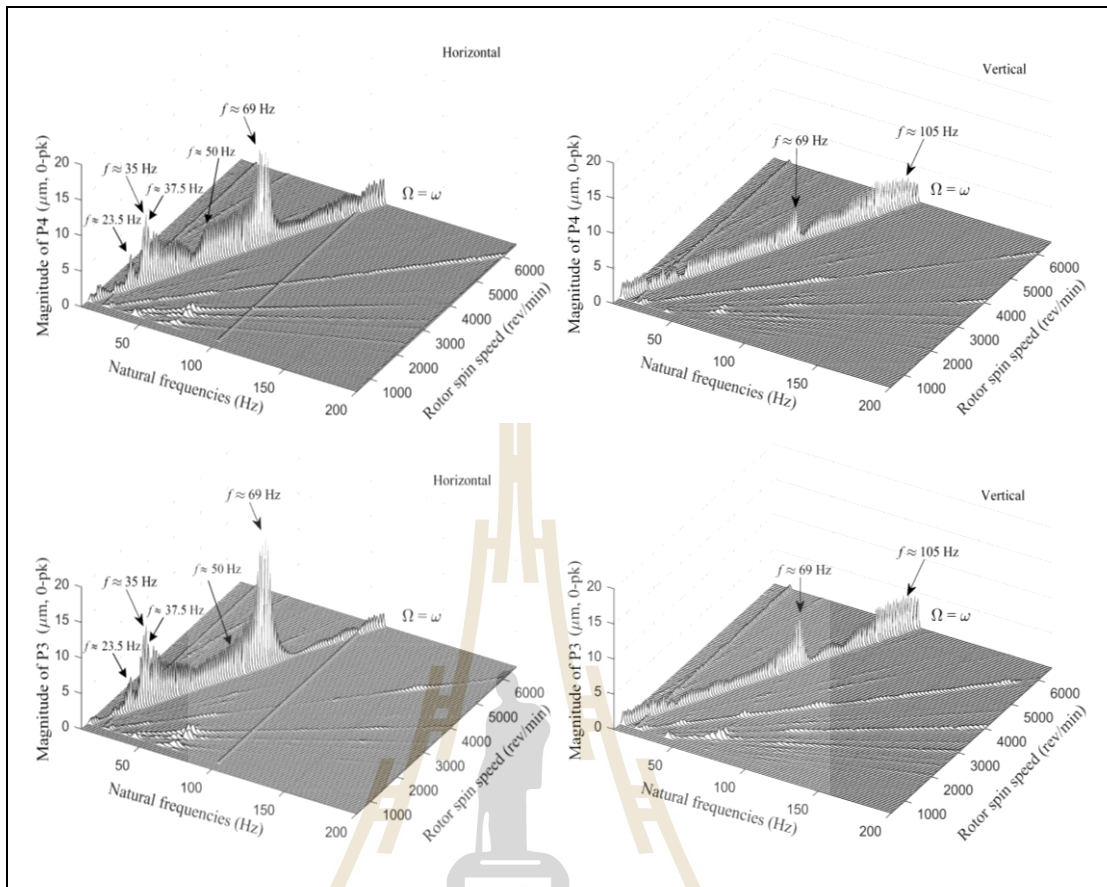
สเปกตรัม ทำให้ได้จำนวนความละเอียดของสเปกตรัมเท่ากับ 20 ในทุก ๆ 1,000 รอบต่อนาที หากนำมาพล็อตเป็นแผนภาพวอเตอร์พอลล์ ได้ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีแผนภาพความเร็วปรากฏความถี่สั้นพ้อง แสดงดังตาราง 5.2 มีที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบโมดอลในตารางที่ 4.3 ดังนั้น กำหนดให้การทดสอบตัวควบคุมที่ความเร็วรอบไม่เกิน 3,600 รอบต่อนาที (60 เฮิร์ต)



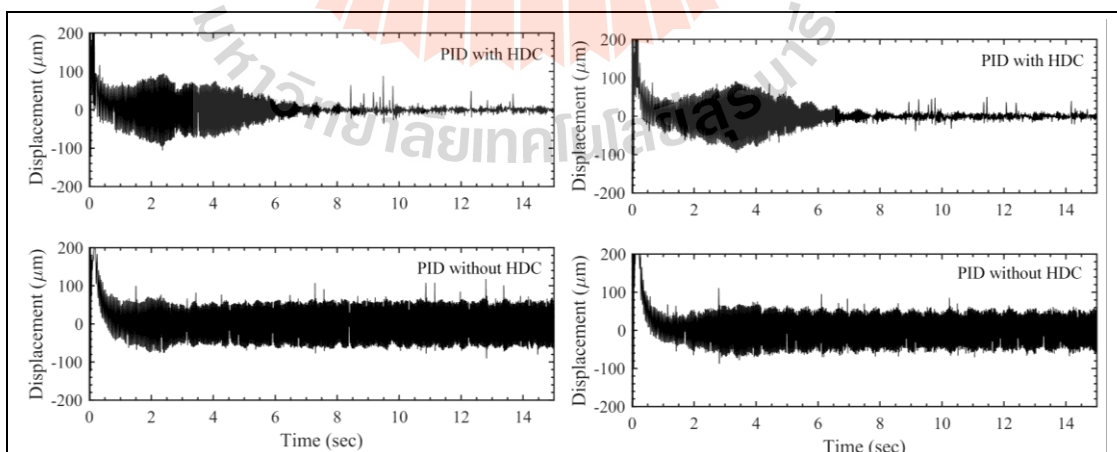
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นที่ตำแหน่งเบร้งทั่วไปเทียบกับความเร็วรอบ

ตารางที่ 5.2 ผลจากการตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีแผนภาพความเร็ว

ความถี่ตรวจพบ	ความถี่สั้นพ้อง (เฮิร์ต)	ทิศทาง y	ทิศทาง z
1	23.5	⊕	-
2	35.0	⊕	-
3	37.2	⊕	-
4	50.0	⊕	-
5	69.0	⊕	⊕



รูปที่ 5.6 แผนภาพวอเตอร์พอลส์ที่ตำแหน่งเบร้งทั่วไป

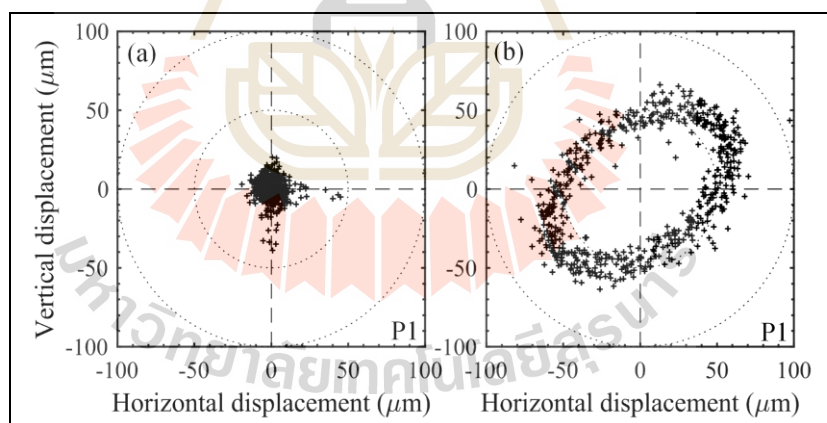


รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบการสั่นของทั้งสองตัวควบคุมที่ตำแหน่งเบร้งแม่เหล็ก

5.4.2 ประสิทธิภาพในการควบคุมวงโคจรของตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี

ในลำดับถัดไปจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมวงโคจรระหว่างตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี เมื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีให้เป็นไปตามเงื่อนไขเสถียรภาพ ที่มีสัมประสิทธิ์ตามสมการ (5.19) ส่วนตัวควบคุมเฮชดีซี เลือกเฟสเลื่อน η_n ที่เกิดขึ้นเท่ากับ π และ ε ซึ่งอัตราขยายของตัวชดเชยเฮชดีซีเท่ากับ 500 ที่ความละเอียด 10,000 ค่า ที่สถานะคงตัว ในช่วงเวลา 5 วินาที เพื่อนำมาแสดงผลเป็นวงโคจร

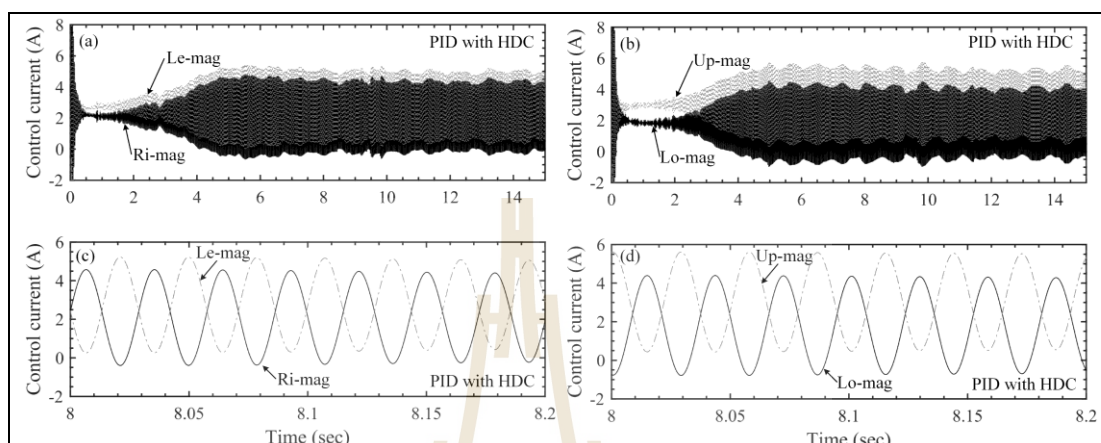
ผลของการกระทำของโรเตอร์ที่ตำแหน่งแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น เมื่อหมุนด้วยความเร็วรอบ 35 เฮิร์ต จากรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าการลู่เข้าในช่วงการตอบสนองชั่วคราวของขนาดการกระตุ้น น้อยกว่า 0.5 วินาที ซึ่งทั้งสองตัวควบคุม มีประสิทธิภาพในการควบคุมการตอบสนองชั่วคราว แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงสถานะคงตัว ตัวควบคุมพีไอดี ไม่สามารถจัดการกวัดแกว่งของการสั่นที่เกิดจากภาระกรรมได้ และยังสั่นต่อไป ทำให้วงโคจรมีขนาดที่ใหญ่ ในขณะที่ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี มีการควบคุมภาระกรรมต่อเนื่องไปจนเข้าสู่จุดสมดุล ที่เวลาประมาณ 8 วินาที ซึ่งมีการกระเพื่อมเล็กน้อยตลอดการควบคุม ทำให้การควบคุมการลู่เข้าสู่จุดสมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีวงโคจรที่ขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงดังรูปที่ 5.8



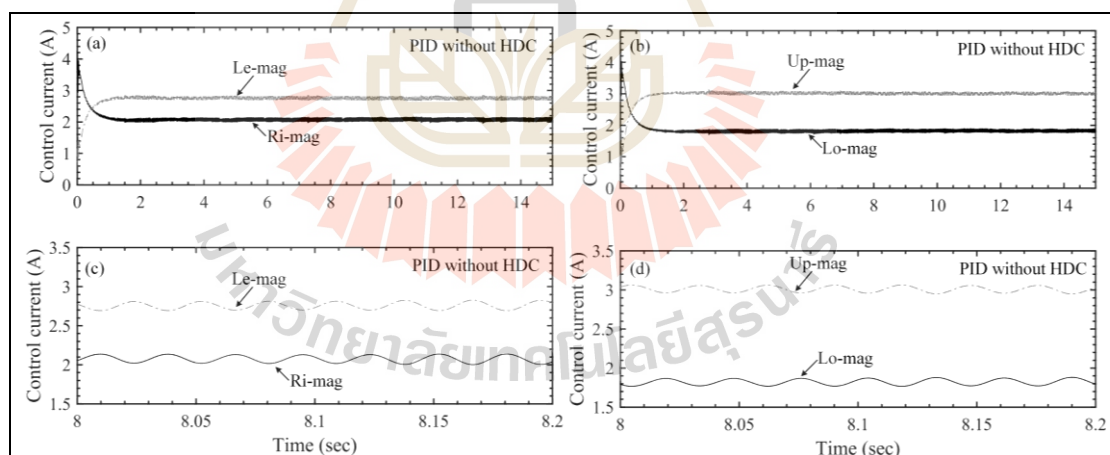
รูปที่ 5.8 แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจรของ (a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี
(b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี ที่ตำแหน่งแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น

เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมการควบคุมกระแสแม่เหล็กแบบกระตุ้น ในแต่ละทิศทาง จะเห็นว่า แม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี จะมีการป้อนกระแสควบคุมให้ขดลวดแม่เหล็กที่มีขนาดไม่เท่ากัน อีกทั้งมีการป้อนสัญญาณในรูปฮาร์โมนิกส์ แสดงดังรูปที่ 5.9 เพื่อสร้างแรงกระตุ้นให้สอดคล้องกับภาระกรรมที่แบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นถูกกระทำ (เหมือนการควบคุมจังหวะใน

การควบคุม) ทำให้การควบคุมฟิโอดีร่วมกับเฮชดีซี สามารถชดเชยการสั่นที่เกิดจากความเร็วรอบการหมุนได้มีประสิทธิภาพกว่าตัวควบคุมฟิโอดีเพียงอย่างเดียว ที่มีการป้อนกระแสควบคุมคงที่ให้ขดลวดแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบกระแสควบคุมในแต่ละทิศทางของตัวควบคุมฟิโอดีร่วมกับเฮชดีซี



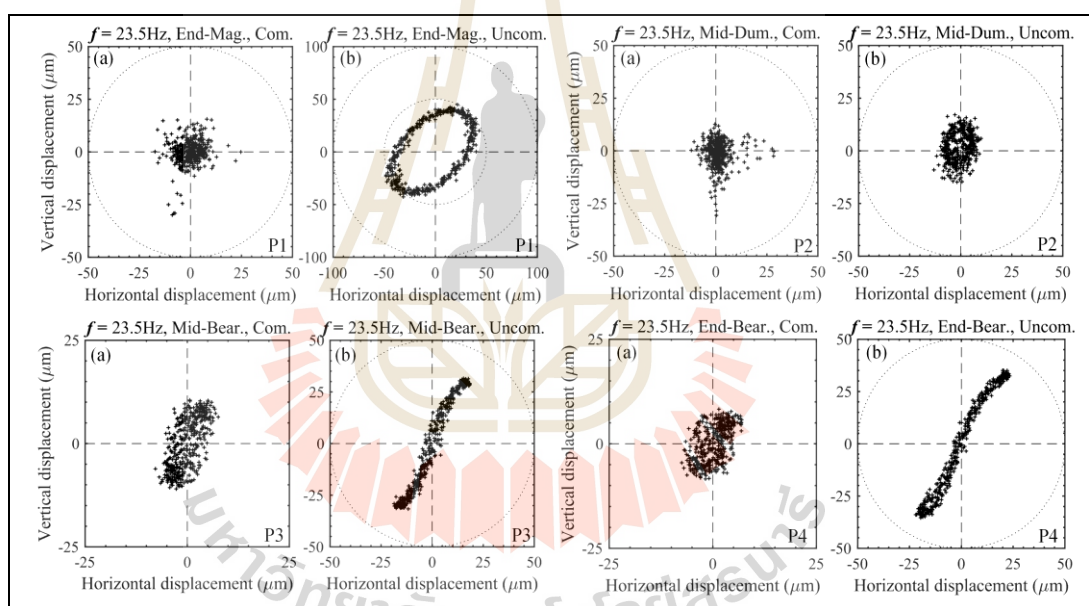
รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบกระแสควบคุมในแต่ละทิศทางของตัวควบคุมฟิโอดี

ในการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมวงโคจร จะทดสอบการทำงานที่ความถี่สั่นพ้องที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์หาด้วยวิธีแผนภาพความเร็ว ที่ความถี่ 23.5 35 37.2 50.3 และ 60 เฮิร์ต ตามลำดับ โดยพิจารณาตำแหน่งของวงโคจรที่สัมพันธ์กับตารางที่ 5.1 ในการอธิบาย

พฤติกรรม และได้ผลเปรียบเทียบการควบคุมวงโคจรด้วยตัวควบคุมทั้งสอง ที่ความถี่ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5.11 ถึง 5.15 ตามลำดับ และสรุปได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เปอร์เซ็นต์ขนาดการสั่นที่ลดลงของแต่ละจุด

ความถี่ (เฮิรต์)	P1	P2	P3	P4	ค่าเฉลี่ย
23.5	65.4	28.6	62.5	67.2	55.9
35.0	60.8	28.6	29.8	24.6	35.9
37.2	63.6	13.1	39.2	42.9	39.7
50.3	81.7	33.3	27.9	28.2	42.8
60.0	83.2	37.5	60.2	6.6	46.9

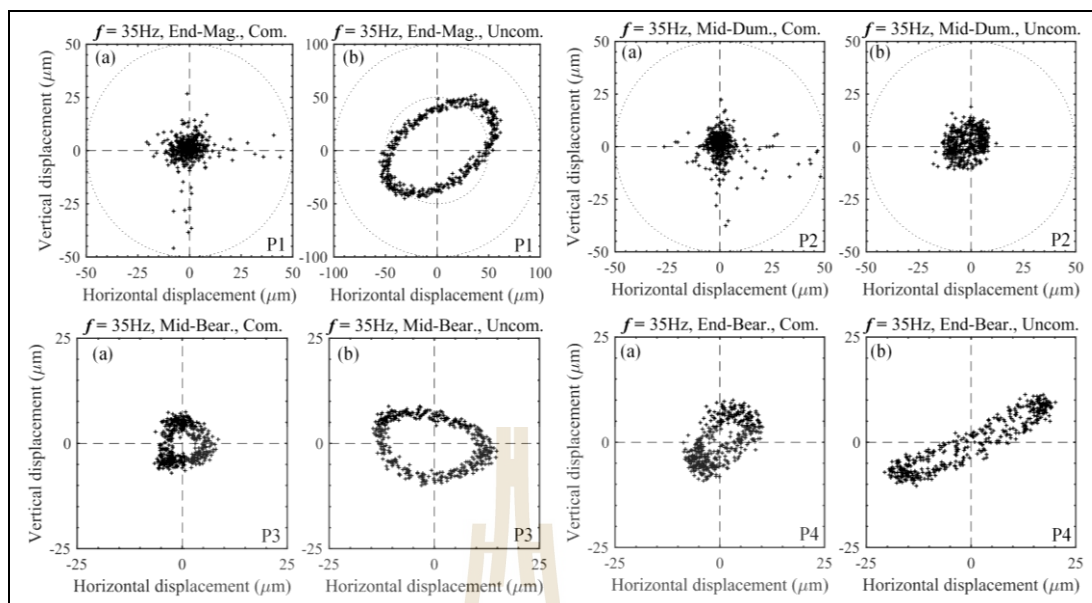


รูปที่ 5.11 แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจรเมื่อมีการควบคุม ณ จุดวัดที่ความถี่ 23.5 เฮิรต์ ของ

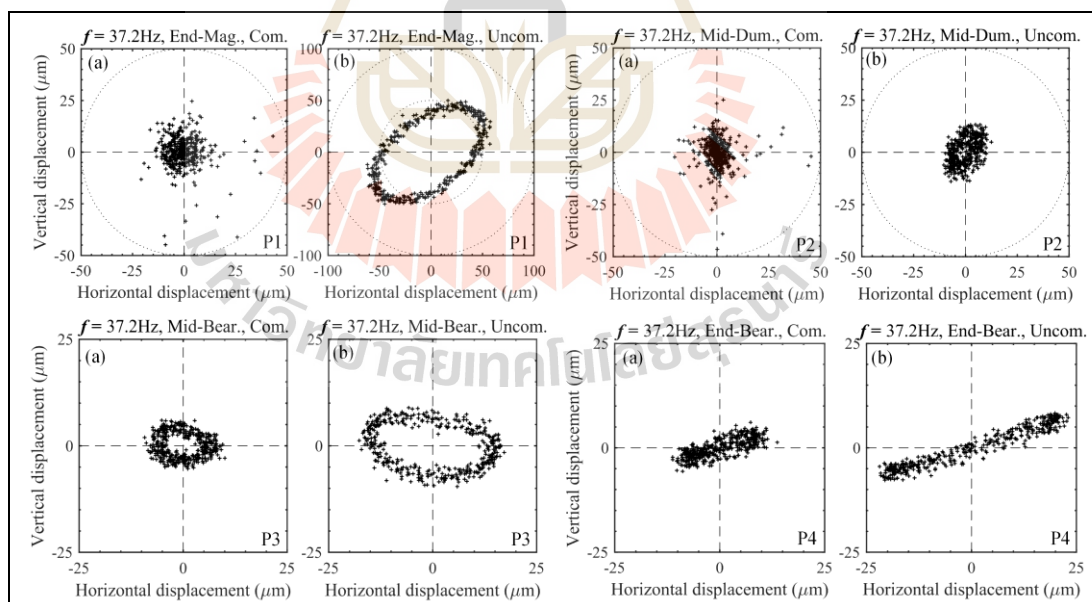
(a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีและ (b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี

5.4.3 การวินิจฉัยรูปร่างวงโคจรในการควบคุมแบบแยกอิสระ

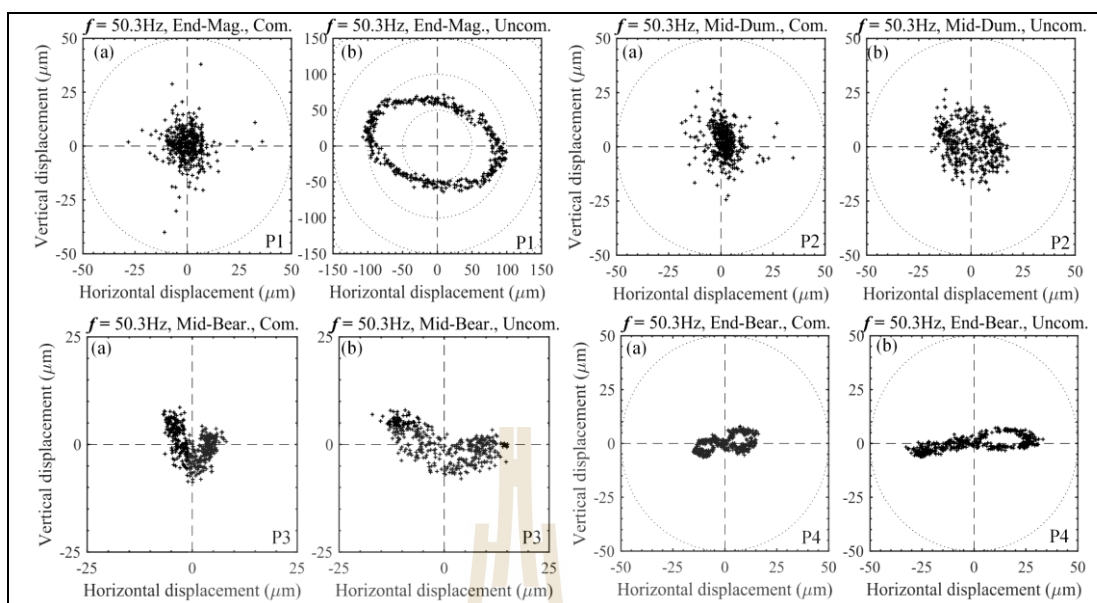
เนื่องจากผลการตอบการสั่นของระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีที่มีการควบคุม เป็นพฤติกรรมตอบสนองที่เกิดจากแรงมากระตุ้น มีสาเหตุมาจากการสั่นสะเทือนแฝงในระบบ รวมถึงการควบคุมวงโคจรในตำแหน่งแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น ทำให้เงื่อนไขขอบเขตการรองรับเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 5.12 แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจรเมื่อมีการควบคุม ณ จุดวัดที่มีความถี่ 35 เฮิร์ต ของ
(a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีและ (b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 5.13 แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจรเมื่อมีการควบคุม ณ จุดวัดที่มีความถี่ 37.2 เฮิร์ต ของ
(a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีและ (b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี

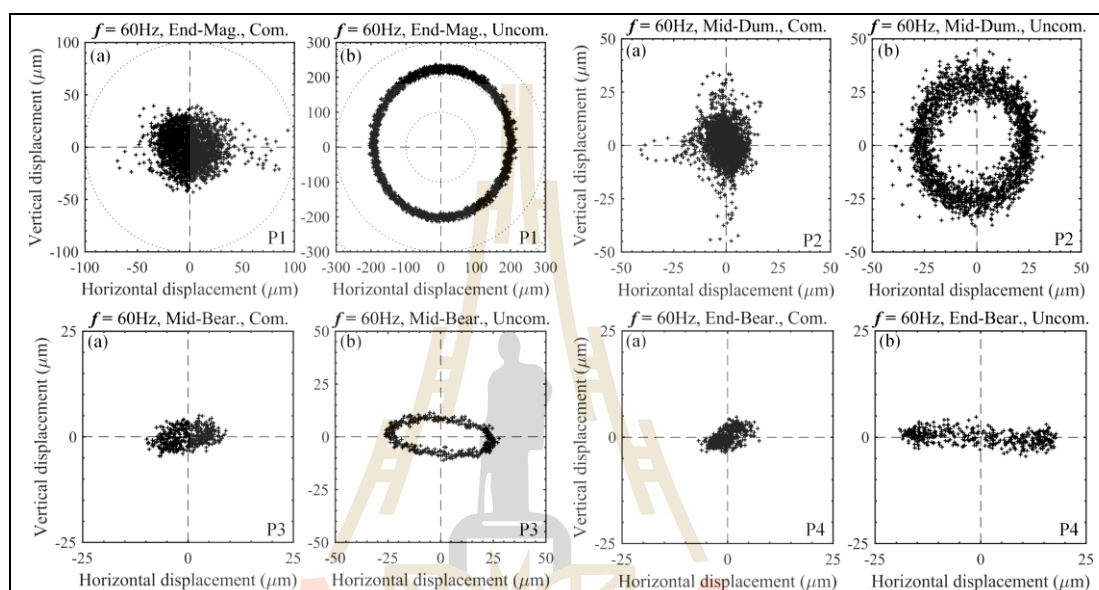


รูปที่ 5.14 แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจรเมื่อมีการควบคุม ณ จุดวัดที่ความถี่ 50.3 เฮิร์ต ของ
(a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีและ (b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี

ดังนั้น เพื่อช่วยให้สามารถระบุ และจำแนกสาเหตุของปัญหาการสั่นนั้น ได้ จึงนำรูปร่างวงโคจรในตารางที่ 2.3 มาร่วมวินิจฉัยพฤติกรรมของระบบรองรับด้านเดี่ยวยแบบปลายยื่นด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีที่มีการควบคุมด้วย

จากรูปที่ 5.11 ซึ่งมีลักษณะวงโคจรการหมุนคล้ายรูปวงรี และเบี่ยงเบนไปในแนวตั้ง เนื่องจากระบบรองรับด้านเดี่ยวยแบบปลายยื่นด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีที่มีการควบคุม ทำงานที่ความถี่ 23.5 เฮิร์ต เกิดแรงพลวัตในแนวรัศมีขึ้น เป็นผลให้เกิดการเคลื่อนตัวสูงในแนวตั้ง ในขณะที่การทำงานที่ความถี่ 35.0 และ 37.2 เฮิร์ต แสดงวงโคจรดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ มีลักษณะเป็นวงโคจรคล้ายวงรีเหมือนกัน แต่มีรูปร่างเบี่ยงเบนไปในแนวนอนมากขึ้นกว่าการทำงานที่ความถี่ 23.5 เฮิร์ต และเป็นผลให้เกิดการเคลื่อนตัวสูงในแนวนอน จึงวินิจฉัยได้ว่าทั้งสามความถี่ดังกล่าว เกิดจากแรงพลวัตในแนวรัศมี ทำให้เกิดพฤติกรรมที่บ่งชี้ได้ว่ามีความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุนเกิดขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ความถี่ 50.3 เฮิร์ต แสดงวงโคจรดังรูปที่ 5.14 จะเห็นได้ว่าลักษณะวงโคจรการหมุนคล้ายเลข 8 และมีรูปร่างเบี่ยงเบนไปในแนวนอน เนื่องจากที่ความถี่ทำงานนี้ มีแรงสถิตในแนวรัศมีแฝงอยู่ ที่แรงเยื้องแนวแกนกระทำอยู่ ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวสูงในแนวนอน จึงวินิจฉัยได้ว่า การทำงานที่ความถี่ 50.3 เฮิร์ต เป็นความเร็วรอบการทำงานที่พ้องกับความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เห็นพฤติกรรมการเยื้องแนวแกนได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ความถี่ 60

เฮิร์ต จะเห็นได้ว่าลักษณะวงโคจรการหมุนเป็นวงรี และมีรูปร่างเบี่ยงเบนไปในแนวนอน แสดงดังรูปที่ 5.15 เนื่องจากที่ความถี่ทำงานนี้ เกิดแรงพลวัตในแนวรัศมีขึ้น ทำให้เกิดพฤติกรรมที่บ่งชี้ได้ว่ามีความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุนเกิดขึ้น เป็นผลให้เกิดการเคลื่อนตัวสูงในแนวนอน และผลการวินิจฉัยเป็นไปตามสามความถี่แรก คือเกิดความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุนขึ้น และเกิดขึ้นในทิศทางที่ความเร็วรอบการทำงานไปพ้องกับความถี่ธรรมชาติในทิศทางนั้น



รูปที่ 5.15 แผนภาพเปรียบเทียบวงโคจรเมื่อมีการควบคุม ณ จุดวัดที่ความถี่ 60 เฮิร์ต ของ
(a) ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีและ (b) เฉพาะตัวควบคุมพีไอดี

ผลการทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบเปลี่ยนด้วยเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีด้วยการควบคุมแบบแยกอิสระ เมื่อออกแบบตัวควบคุมแบบแยกอิสระพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีสามารถควบคุมให้การสั่นที่ความถี่สั่นพ้องมีขนาดลดลง 60 ถึง 83 เปอร์เซ็นต์ หากเทียบกับตัวควบคุมพีไอดี และผลการวิเคราะห์วงโคจรสามารถบ่งชี้สภาพการทำงาน เพื่อใช้ในการวินิจฉัยปัญหาการสั่นได้

บทที่ 6

การวิเคราะห์การสั่นด้วยเทคนิคการเปรียบเทียบขณะปฏิบัติงาน

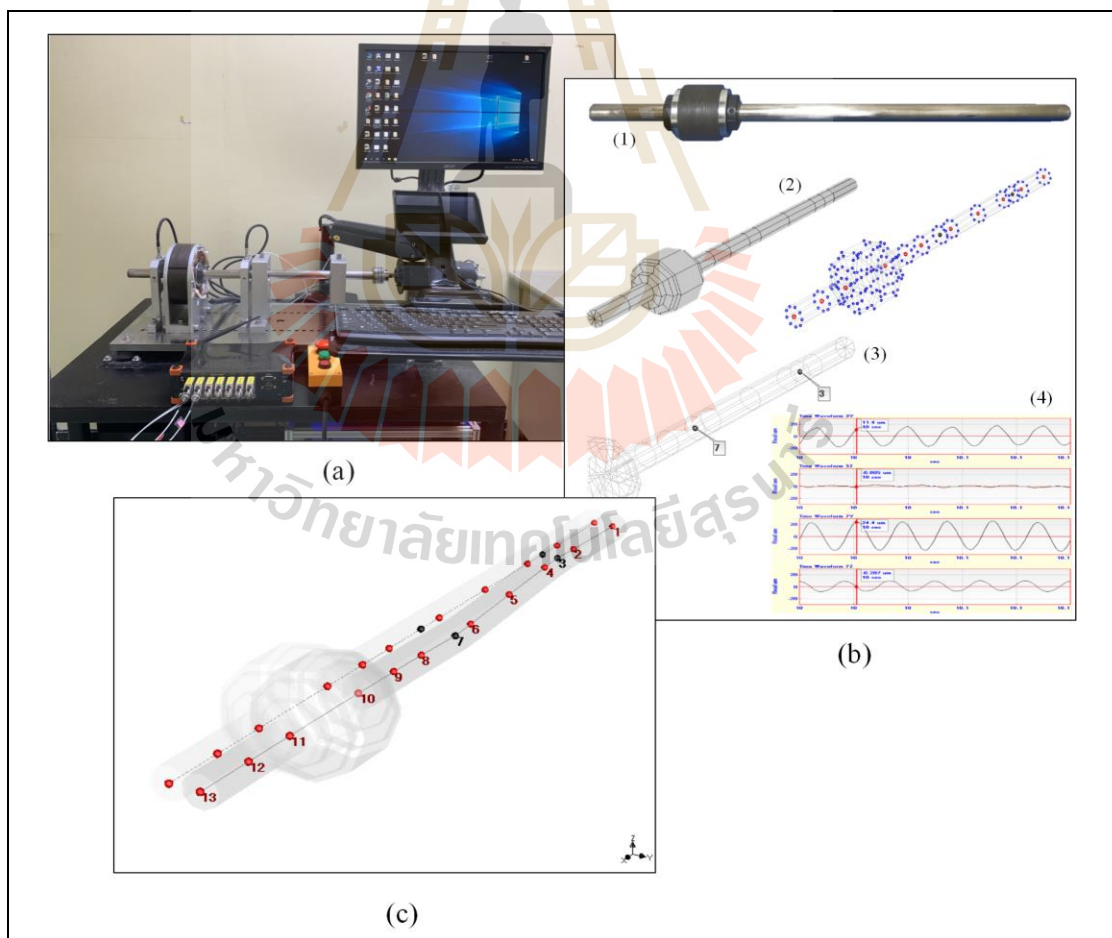
ในบทที่ผ่านมา เป็นการทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีด้วยการควบคุมแบบแยกอิสระของตัวควบคุมพีไอดี เปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮซติซีซีที่ตำแหน่งโรเตอร์ของระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นติดตั้งอยู่ ทำให้สามารถลดการสั่นที่เกิดขึ้น และบังคับวงโคจรให้เป็นวงกลมในขอบเขตที่ควบคุมได้ อีกทั้งได้นำรูปร่างวงโคจรที่ตำแหน่งแบริ่งมาอธิบายพฤติกรรมเฉพาะของแต่ละความถี่สั่นพ้อง ซึ่งมีรูปร่างวงโคจร และขนาดการสั่นที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถบ่งชี้รูปแบบวงโคจรในการวินิจฉัยถึงสาเหตุการสั่นได้ ซึ่งมีเฉพาะตำแหน่งที่วัดได้เท่านั้น ในบทนี้ได้เสนอเทคนิคการหารูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน (ODS) มาวิเคราะห์บนโดเมนเวลาในการตรวจสอบพฤติกรรมการสั่น โดยใช้ความถี่สั่นพ้อง ที่ได้จากการทดสอบโมดอล และวิธีแผนภาพความเร็ว เพื่อกำหนดจุดอธิบายการเบี่ยงเบนตามแนวแกนของเพลานซอฟต์แวร์สำเร็จรูป และสร้างการเคลื่อนไหวจากข้อมูลที่วัดได้ มาประมาณค่าตำแหน่งอื่น ๆ ที่ไม่สามารถวัดได้ เพื่อนำมาวิเคราะห์ระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น ในแนวรัศมีที่มีการควบคุมแบบแยกอิสระ และเปรียบเทียบผลของตัวควบคุมพีไอดีกับตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮซติซีซี

6.1 ขั้นตอนการเก็บค่าบนโดเมนเวลา

การวัดการสั่นสะท้อนเฉพาะที่สภาวะคงตัว หรือที่ความเร็วรอบคงที่ (operating speed) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบโมดอล และวิธีแผนภาพความเร็ว ซึ่งความถี่สั่นพ้องของระบบ คือ 23.5 35 37.2 50.3 60 เฮิร์ต ตามลำดับ การวิเคราะห์การสั่นของระบบแบริ่งแม่เหล็กไฟฟ้ากระตุ้นด้านเดียวแบบปลายยื่น แสดงดังรูปที่ 6.1 จะพิจารณาในช่วงความถี่ 20 ถึง 60 เฮิร์ต ซึ่งเป็นช่วงที่ได้จากวิธีแผนภาพความเร็ว อีกทั้งเป็นขีดจำกัดในการเก็บสัญญาณ และการควบคุมความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าให้คงที่ ที่มากกว่า 10 เฮิร์ต (600 รอบต่อนาที) เท่านั้น

การเก็บค่าการกระจัดที่วัดจากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ Minitaur ของผู้ผลิต DEWESoft ใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่งสามแกนจำนวน 2 ตัว ซึ่งเซ็นเซอร์วัดความเร่งทั้งสองตัวจะวัดขนาด และเฟสที่สัมพันธ์จากการอ้างอิงซึ่งกันและกัน มีค่าเฉพาะดังตารางที่ 4.1

จากสมมติฐานจะไม่มี การเคลื่อนที่ในแนวแกน สัญญาณการกระจัดบนโดเมนเวลาที่วัดได้ ดังรูปที่ 6.1(a) จะนำมาพิจารณาการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีของเพลาท่านั้น คือ แนวนอน (ทิศทาง y) และแนวตั้ง (ทิศทาง z) ตามลำดับ มีขั้นตอนพิจารณาแสดงดังรูปที่ 6.1(b) คือ (1) พิจารณาเฉพาะเพลา และโรเตอร์ของเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น (2) และ (3) โดยติดตั้งบนตัวรองรับเบริงทั่วไป คือตำแหน่ง โหนด 3 และ 7 ที่สอดคล้องกับจุดข้อมูลบนแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้น สัมพันธ์กับจุดบน การทดสอบ โมดอล และวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (4) การเก็บข้อมูลให้สอดคล้องกับจุดข้อมูลใน แบบจำลอง และเก็บข้อมูลทั้ง 2 จุดวัดพร้อมกัน สำหรับตำแหน่งใด ๆ บนแบบจำลองที่ไม่สามารถ เก็บค่าได้ (เนื่องจากเป็นตำแหน่งจริงบนเพลา และ โรเตอร์เบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นมีการหมุน) จะใช้ซอฟต์แวร์รูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน ME'scopeVES ในการสร้างการเคลื่อนไหว ซึ่ง ซอฟต์แวร์จะใช้ข้อมูลที่เก็บได้จากตำแหน่งที่ 3 และ 7 มาทำการประมาณค่า และกำหนดค่าให้กับ จุดวัดที่ไม่มีข้อมูล เพื่อแสดงการเคลื่อนไหวที่สมจริง แสดงดังรูปที่ 6.1(c)



รูปที่ 6.1 ขั้นตอนเก็บค่าด้วยเทคนิครูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานบนโดเมนเวลา

6.2 การวิเคราะห์ผลการสั่นด้วยเทคนิครูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน

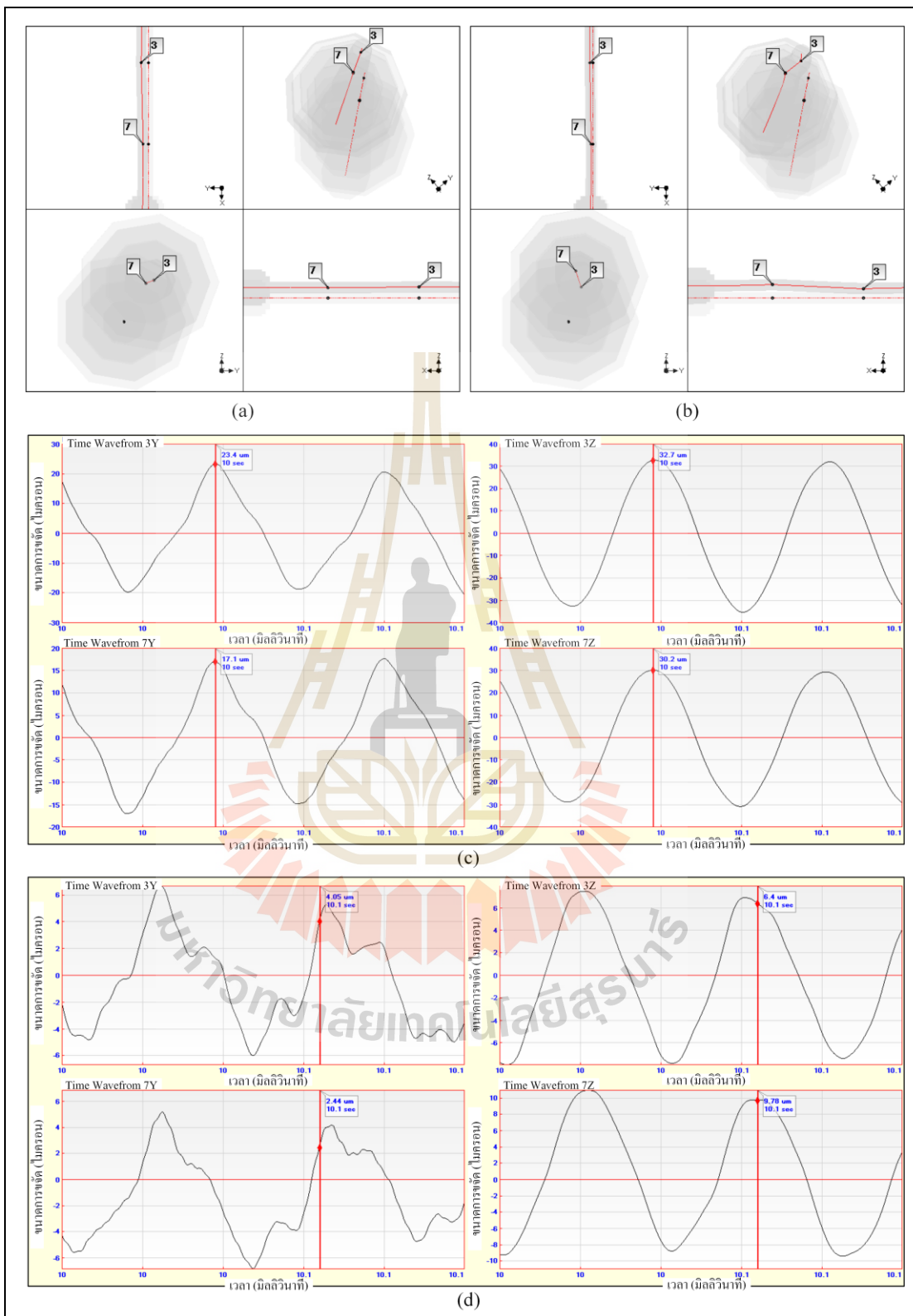
จากผลการสั่นที่ได้จากซอฟต์แวร์เป็นภาพการเคลื่อนไหว ที่แสดงผลการสั่น ณ ตำแหน่งที่วัดได้ คือจุด 3 และ 7 มาประมาณค่าเชิงเส้นไปยังตำแหน่งอื่น ๆ ข้างเคียงเพื่อกำหนดค่าให้กับจุดวัดที่ไม่มีมีการวัด คือ จุด 1 2 4 5 6 8 9 10 11 12 และ 13 ตามแนวของเส้นผ่านศูนย์กลางทางกายภาพของเพลลา เพื่อประมาณค่าไปยังจุดต่าง ๆ บนโครงสร้างของแบบจำลอง ที่มีจุดจำนวน 243 จุด เพื่อใช้ในการสร้างภาพเคลื่อนไหวรูปร่างการสั่นขณะปฏิบัติงานจริง แต่ไม่สามารถแสดงการเคลื่อนไหวในที่นี้ได้ จึงใช้การแสดงผลภาพนิ่งรูปร่างการเบี่ยงเบนสูงสุดที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ซึ่งอธิบายด้วยการอ้างอิงแกนกายภาพ (เส้นปะ) เทียบกับแกนการหมุน (เส้นทึบ) ว่ามีการเบี่ยงเบนอย่างไร ดังแสดงในรูปที่ 6.2 ถึง 6.7 ตามลำดับ โดยการเคลื่อนไหวในแต่ละทิศทางเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม (a) พีไอดี และ (b) พีไอดีร่วมกับเฮชดีซี เมื่อใช้ความสัมพันธ์การกระจัดสูงสุด ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ของตัวควบคุม (c) พีไอดี และ (d) พีไอดีร่วมกับเฮชดีซี ซึ่งพิจารณาตำแหน่งวิกฤตที่มีสัมพันธ์กับอุปกรณ์ของระบบ ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 จุดวิกฤตที่มีสัมพันธ์กับอุปกรณ์ของระบบ

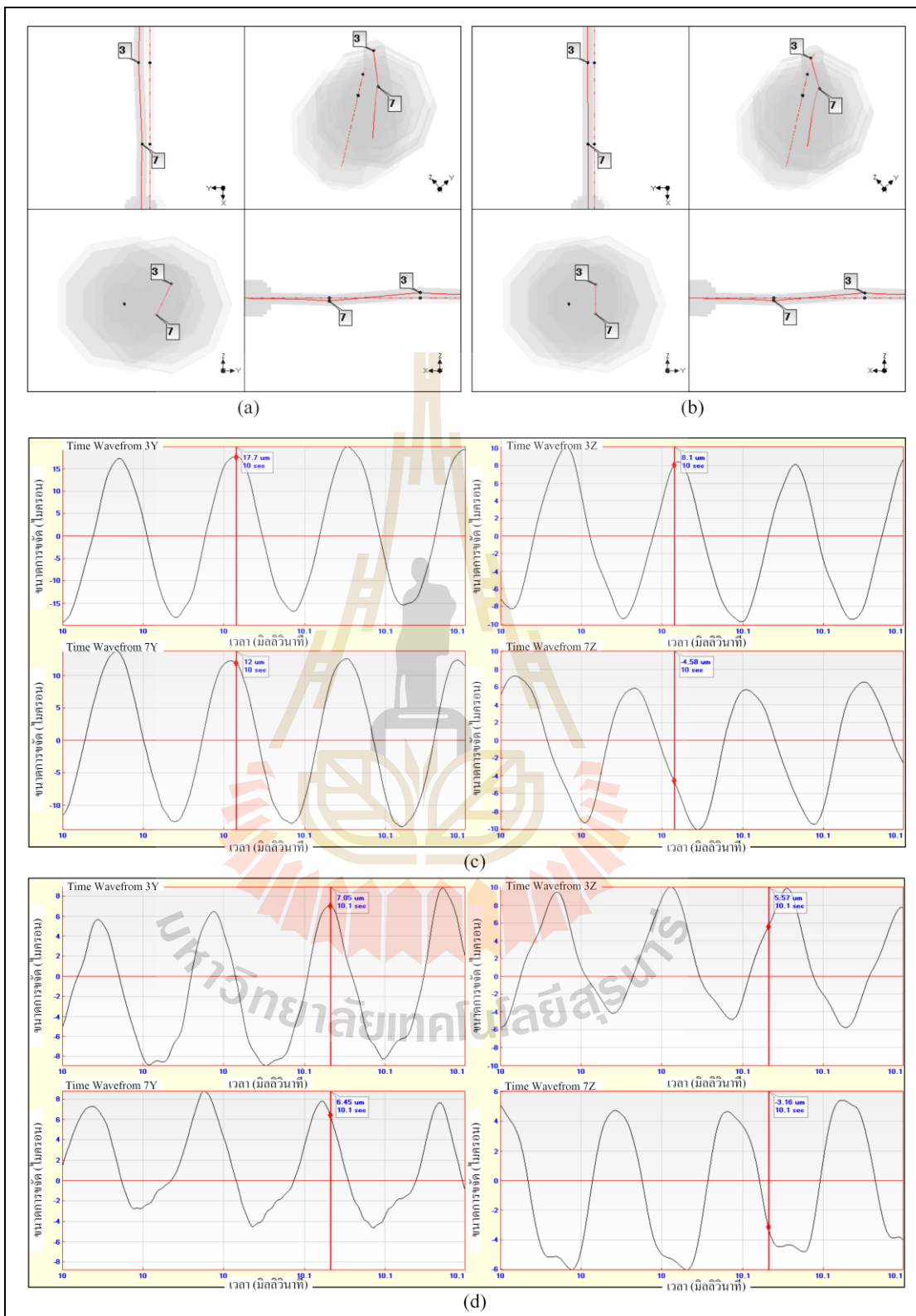
ตำแหน่ง	อุปกรณ์ระบบ
3	แบร์ริงทั่วไปตัวที่ 1
7	แบร์ริงทั่วไปตัวที่ 2
10, 11	โรเตอร์แบร์ริงแม่เหล็ก

สำหรับความถี่ 23.5 เฮิร์ต แสดงดังรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุม มีการกระจัดสูงสุด (32.5 ไมครอน) ที่ตำแหน่ง 3 ในทิศทาง z เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี ซึ่งมีการกระจัดสูงสุด (10 ไมครอน) ที่ตำแหน่ง 7 ในทิศทาง z ในขณะที่มีการเบี่ยงเบนตามแนวแกนพร้อมกันทั้งในทิศทาง z และ y ทำให้แกนการหมุนเคลื่อนที่รอบแกนกายภาพในแนวตั้ง แต่มีขอบเขตการหมุนน้อยกว่า

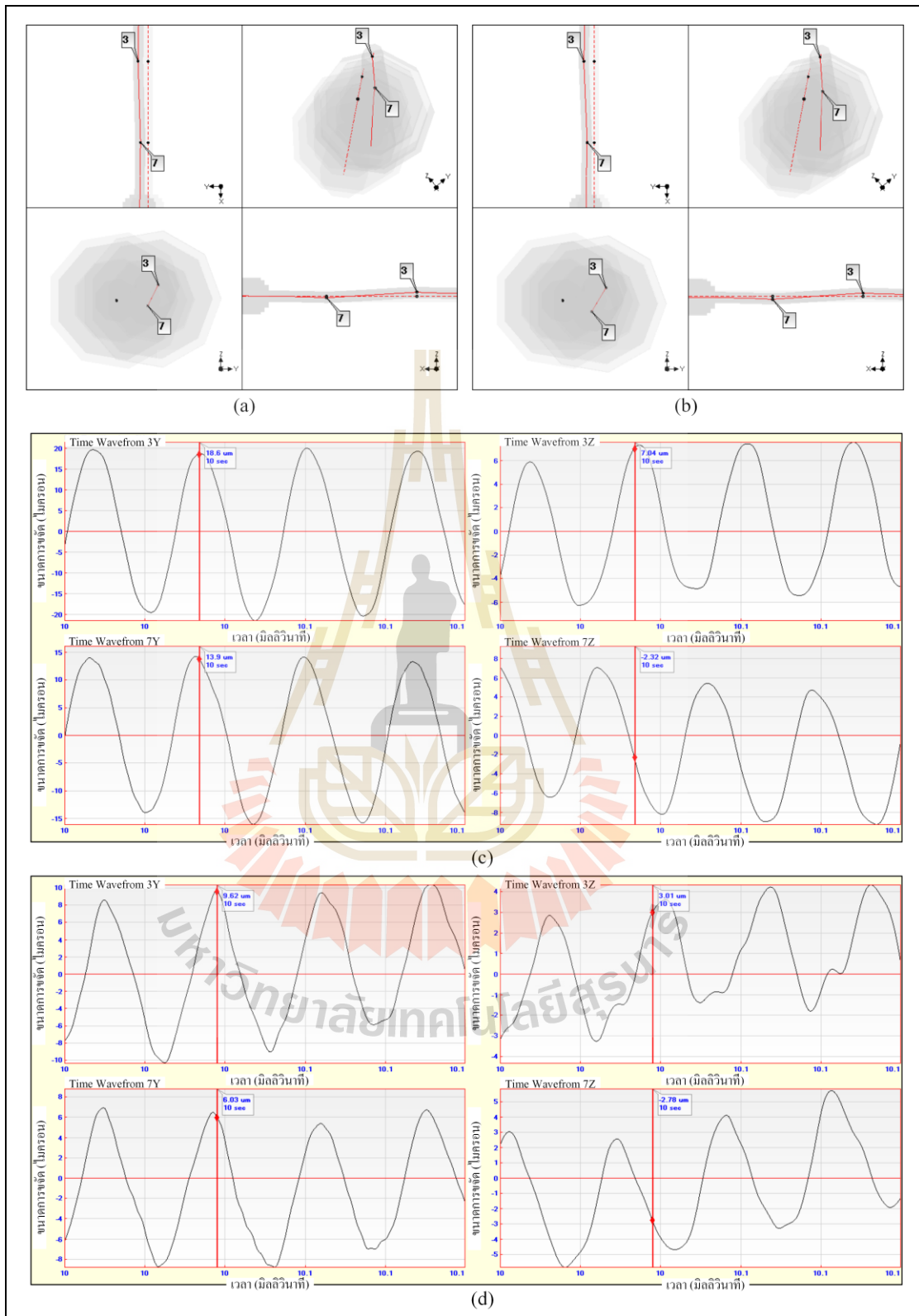
สำหรับความถี่ 35 และ 37.2 เฮิร์ต แสดงดังรูปที่ 6.3 และ 6.4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุม มีการกระจัดสูงสุด (18 18.5 และ 22 ไมครอน) ที่ตำแหน่ง 3 ในทิศทาง y ในขณะที่มีการเบี่ยงเบนตามแนวแกนพร้อมกันทั้งในทิศทาง y และเกิดการเบี่ยงเบนต่างกันเล็กน้อยในทิศทาง z ทำให้แกนการหมุนเคลื่อนที่รอบแกนกายภาพในแนวนอน และมีรูปร่างการตัดโค้งสลับขึ้นที่ตำแหน่ง 3 กับ 7 ในแนวตั้งเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี มีรูปแบบคล้ายกับตัวควบคุมพีไอดี แต่มีขอบเขตการหมุนน้อยกว่า



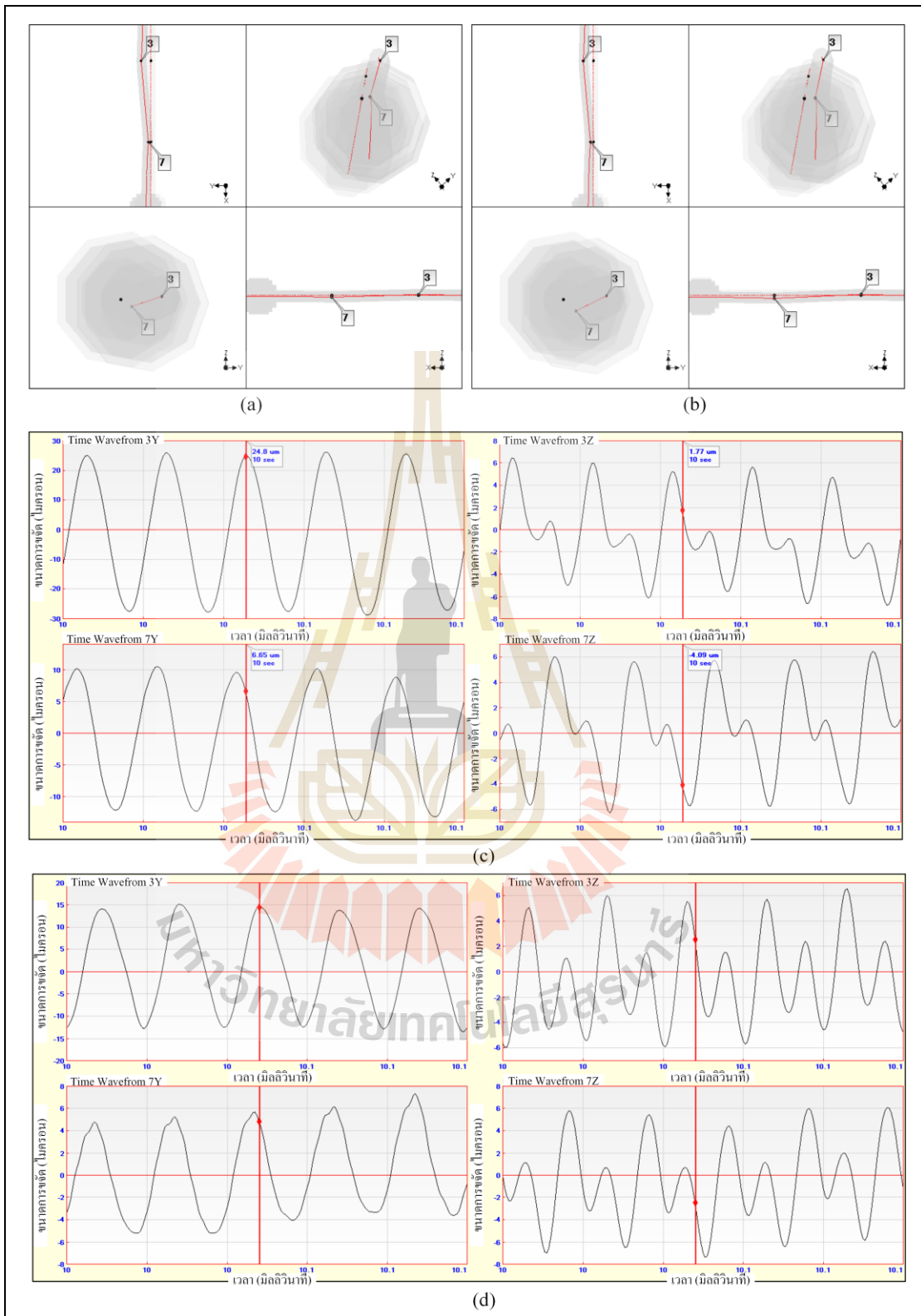
รูปที่ 6.2 เปรียบภาพนิ่งรูปร่างการเบี่ยงเบนสูงสุดเปรียบเทียบตัวควบคุม ที่ความถี่ 23.5 เฮิรต์



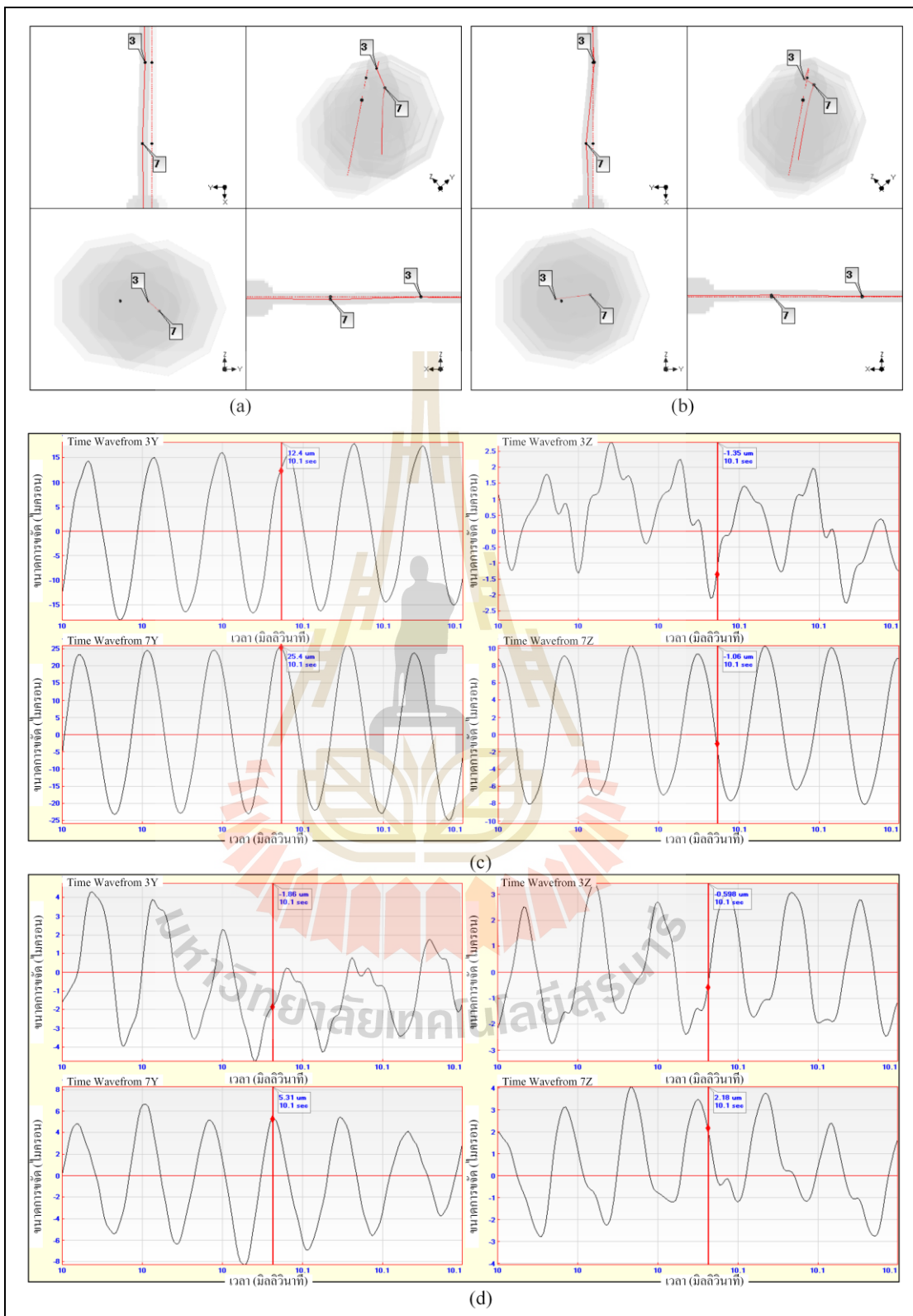
รูปที่ 6.3 เฟรมภาพหนึ่งรูปร่างการเบี่ยงเบนสูงสุดเปรียบเทียบตัวควบคุม ที่ความถี่ 35 เฮิรต์



รูปที่ 6.4 เปรียบภาพหนึ่งรูปร่างการเบี่ยงเบนสูงสุดเปรียบเทียบตัวควบคุม ที่ความถี่ 37.2 เฮิรต์



รูปที่ 6.5 เพรมาภาพนิ่งรูปร่างการเบี่ยงเบนสูงสุดเปรียบเทียบตัวควบคุม ที่ความถี่ 50.3 เฮิร์ต



รูปที่ 6.6 เฟรมภาพนิ่งรูปร่างการเบี่ยงเบนสูงสุดเปรียบเทียบตัวควบคุม ที่ความถี่ 60 เฮิร์ต

สำหรับความถี่ 50.3 เฮิร์ต แสดงดังรูปที่ 6.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุม มีการกระจัดสูงสุด (25 ไมครอน) ที่ตำแหน่ง 3 ในทิศทาง y ในขณะที่มีการเบี่ยงเบนตามแนวแกนพร้อมกันในทิศทาง y และเกิดการเบี่ยงเบนต่างกันในทิศทาง z ทำให้เกิดการหมุนเคลื่อนที่รอบแกนกายภาพในแนวนอน และมีรูปร่างการตัดโค้งสลับขึ้นลงที่ตำแหน่ง 3 กับ 7 ในแนวตั้งที่ชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี มีรูปแบบคล้ายกับตัวควบคุมพีไอดี แต่ขอบเขตการหมุนน้อยกว่า

สำหรับความถี่ 60 เฮิร์ต แสดงดังรูปที่ 6.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุม มีการกระจัดสูงสุด (24 ไมครอน) ที่ตำแหน่ง 7 ในทิศทาง y ในขณะที่มีการเบี่ยงเบนตามแนวแกนพร้อมกันในทิศทาง y และเกิดการเบี่ยงเบนต่างกันในทิศทาง z ทำให้เกิดการหมุนเคลื่อนที่รอบแกนกายภาพในแนวนอน และมีรูปร่างการตัดโค้งสลับขึ้นลงที่ตำแหน่ง 3 กับ 7 ในแนวตั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี มีการเบี่ยงเบนตามแนวแกนต่างกันในทิศทาง y และ z แต่ทิศทาง z มีเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดการหมุนเคลื่อนที่รอบแกนกายภาพในแนวนอน และมีรูปร่างการตัดโค้งสลับขึ้นลงที่ตำแหน่ง 3 กับ 7 ในแนวนอนชัดเจนกว่าแนวตั้ง

ผลจากการวิเคราะห์การสั่นด้วยเทคนิครูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน จากพฤติกรรม การตอบสนองของระบบแบริ่งแม่เหล็กไฟฟ้ากระตุ้นด้านเดียวแบบปลายยื่น และตรวจสอบรูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน ที่ความถี่ต่าง ๆ เมื่อมีการควบคุมวงโคจรในตำแหน่งแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น สามารถวินิจฉัยได้ว่า

1. ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี มีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวควบคุมพีไอดี ในการควบคุมวงโคจร และไม่ทำให้รูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานมีการเปลี่ยนแปลง แต่มีขอบเขตการเบี่ยงเบนที่ลดลง
2. ตำแหน่งที่มีการควบคุมขนาดการกระจัด ด้วยระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น ทำให้ขนาดการสั่นลดลง ในทุกความถี่ที่พิจารณา
3. ที่ความถี่ 23.5 เฮิร์ต มีการเบี่ยงเบนในแนวตั้งที่แบริ่งทั่วไปตัวที่ 1 สูงกว่าตำแหน่งตำแหน่งแบริ่งทั่วไปตัวที่ 2 เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดี แต่เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซีกลับทำให้ตำแหน่งแบริ่งทั่วไปตัวที่ 2 สูงกว่าตำแหน่งแบริ่งทั่วไปตัวที่ 1 เนื่องจากการใช้ตัวควบคุมเฮชดีซีมีประสิทธิภาพในการควบคุมความไม่สมดุลจากการสั่นได้ดีกว่า จึงทำให้เงื่อนไขการรองรับระบบเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าที่ความถี่นี้ เป็นความถี่สั่นพ้องในแนวตั้งของทั้งโครงสร้าง
4. สำหรับความถี่ 35 และ 37.2 เฮิร์ต มีการเบี่ยงเบนในแนวนอนที่ตำแหน่งแบริ่งทั่วไปตัวที่ 1 สูงกว่าตำแหน่งแบริ่งทั่วไปตัวที่ 2 และมีรูปร่างการตัดโค้งสลับไปมาระหว่างที่ตำแหน่งแบริ่งทั่วไปตัวที่ 1 กับ 2 ในแนวตั้งในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เมื่อใช้ตัวควบคุมทั้งสอง แต่มีขอบเขตการ

เบี่ยงเบนที่ลดลงเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเซชิตซีในการควบคุมความไม่สมดุลจากการสั่น ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าที่ความถี่เหล่านี้ เป็นความถี่สั่นพ้องในแนวนอนของทั้งโครงสร้าง

5. ทั้งสามความถี่แรกมีจุดวิกฤตอยู่ตำแหน่งเบี่ยงทั่วไปตัวที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวินิจฉัยวงโคจร พบว่าเกิดจากแรงพลวัตในแนวรัศมี ที่มีความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุนเกิดขึ้น

6. ในขณะที่ความถี่ 50.3 เฮิร์ต การเบี่ยงเบนในแนวนอนที่มีการดัดโค้งสลับไปมาระหว่างที่ตำแหน่งเบี่ยงทั่วไปตัวที่ 1 กับ 2 อย่างชัดเจนระหว่างการหมุนรอบแกน สามารถบ่งชี้ได้ว่าที่ความถี่นี้ เป็นความถี่สั่นพ้องกระทำกับตำแหน่งเบี่ยงทั่วไปทั้ง 2 ไม่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวินิจฉัยวงโคจร ว่าเกิดแรงสถิตในแนวรัศมี ที่มีพฤติกรรมของแรงเยื้องแนวแกนกระทำอยู่

7. ที่ความถี่ 60 เฮิร์ต การเบี่ยงเบนในแนวนอนตำแหน่งที่เบี่ยงทั่วไปตัวที่ 2 สูงสุด และมีการดัดโค้งสลับไปมาระหว่างที่ตำแหน่งเบี่ยงทั่วไปตัวที่ 1 กับ 2 ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง สามารถบ่งชี้ได้ว่า ที่ความถี่นี้ มีพฤติกรรมของแรงพลวัตในแนวรัศมี ทำให้มีความไม่สมดุลขึ้นในการหมุน

ผลการวิเคราะห์ด้วยรูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนโดยตรง เมื่อโครงสร้างได้รับแรงกระตุ้นที่ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งมีทั้งขนาด และทิศทางการสั่น พบว่าสามารถสร้างการเคลื่อนไหวให้เห็นลักษณะรูปร่างการเบี่ยงเบนของโครงสร้างที่เกิดขึ้นจริงในขณะทำงาน และใช้ตรวจสอบในตำแหน่งที่ไม่สามารถติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัด สำหรับการวินิจฉัยหาสาเหตุการสั่นได้

บทที่ 7

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี และควบคุมวงโคจรการหมุนที่ตำแหน่งรองรับด้วยเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น ด้วยการควบคุมแบบแยกอิสระตามแนวรัศมีในแต่ละทิศทาง ด้วยตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี โดยใช้เทคนิครูปร่างการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน (ODS) มาวิเคราะห์ และวินิจฉัยพฤติกรรมจากภาระกรรมจริงที่มากกระทำ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

1. ได้ออกแบบ และสร้างระบบรองรับด้วยเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีที่มี 8 ขั้ว ซึ่งมีการเรียงลำดับขั้วเป็น (N-S)-(S-N)-(N-S)-(S-N) ที่สามารถขับเคลื่อนขั้วแบบความแตกต่างในแนวรัศมี ทำให้สามารถควบคุมกระแสต่อเนื่องเชิงเส้นได้ โดยผลการสอบเทียบสามารถรองรับภาระกรรมได้ 198 นิวตัน ที่ช่องว่างอากาศ 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีแรงลัพท์เชิงเส้นในการควบคุมกระแสต่อเนื่องที่ 0.5 ถึง 4 แอมป์ และสามารถควบคุมการกระจัดได้ไม่เกิน 200 ไมครอน (0.2 มิลลิเมตร) ระหว่างโรเตอร์ และสเตเตอร์ของเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี

2. ได้ออกแบบ และสร้างชุดทดสอบระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมี ที่มีขอบเขตการควบคุมการทำงานในช่วงความเร็วรอบการหมุนไม่เกิน 60 เฮิร์ต (3,600 รอบต่อนาที) ซึ่งได้จากการทดสอบโมดอล และแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ร่วมกับการค้นหาตัวแปรของระบบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม

3. ได้สมการควบคุมแบบแยกอิสระในแนวรัศมี ที่เป็นอิสระต่อกันในแต่ละทิศทาง โดยใช้เงื่อนไขความยาวเพลลาที่มีค่ามากกว่ารัศมีของเพลลา และขนาดการสั่นที่ตำแหน่งเบริงแม่เหล็กกระตุ้นมีค่ามากกว่าที่ตำแหน่งเบริงทั่วไป ทำให้ลดความเกี่ยวโยงกันทางกายภาพของระบบสมการ เพื่อใช้วิเคราะห์เสถียรภาพ และออกแบบตัวควบคุมแบบแยกอิสระพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี

4. ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบแยกอิสระพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี สามารถควบคุมให้การสั่นมีขนาดลดลงได้ 60 ถึง 83 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอดี โดยควบคุมในทุกความถี่สั่นพ้องที่ได้จากการทดสอบโมดอล และวิธีแผนภาพความเร็ว

5. ผลการวิเคราะห์รูปร่างวงโคจร จากการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบแยกอิสระในแนวรัศมี สามารถวินิจฉัยหาสาเหตุปัญหาการสั่นได้

6. ผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจากเทคนิคการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน ซึ่งสร้างรูปแบบการเคลื่อนไหว และลักษณะรูปร่างการตัดโค้งภายใต้การสั่นพ้องที่มีการควบคุมแบบแยกอิสระ ทำให้สามารถช่วยวินิจฉัยถึงสาเหตุการสั่นที่เกิดจากภาวะกรรมภายนอกจริง ที่มากระทำกับระบบได้ รวมถึงใช้ตรวจสอบในตำแหน่งที่ไม่สามารถติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัดได้

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ระบบรองรับด้านเดียวแบบปลายยื่นด้วยแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นในแนวรัศมีสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบที่มีภาวะกรรมภายนอกเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้ เช่น ล้อช่วยแรง ระบบกันสั่นสะเทือน เป็นต้น

2. ในทางปฏิบัติการใช้ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับเฮชดีซี สามารถเลือกฮาร์ดแวร์ที่มีเพียงตัวควบคุมพีไอดีควบคุม และตัวกรองสัญญาณที่วัดจากความเร็วยรอบการหมุนเท่านั้น จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมได้

3. การควบคุมแบบแยกอิสระ เป็นการลดรูปความซับซ้อนของระบบสมการที่ทำให้แต่ละพิกัดไม่เกี่ยวโยงกัน ซึ่งมีประโยชน์ในการออกแบบตัวควบคุมเชิงเส้น แต่ควรระวังผลกระทบใจโรที่จะเกิดขึ้นกับ โรเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ และเพลลาที่มีความยาวมาก ๆ

4. การวินิจฉัยรูปร่างวงโคจร และเทคนิคการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน สามารถนำไปบอกสภาพการสั่นสะเทือนของโครงสร้างได้ จากการวิเคราะห์รูปร่างวงโคจร และการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา ทำให้ทราบว่าตำแหน่งใดของโครงสร้างมีความเสี่ยง ที่อธิบายจากการเคลื่อนไหวได้ทั้งโครงสร้างที่เป็นเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้น

5. การประยุกต์ใช้งานเทคนิคการเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน สามารถนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานจริงของระบบได้

รายการอ้างอิง

- วินัย ตุ่มทอง, จิระพล ศรีเสวีรัฐผล, สุวัฒน์ชัย กล้าเกิดผล และ เสกสรรค์ ไชยภิตติ (2012). รูปร่างการสั่นขณะปฏิบัติงานของปล่องลมระบายความร้อน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 26, ตุลาคม, 2012.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). การควบคุมระบบพลศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 848 หน้า.
- สราวดี สุจิตจร (2546). การควบคุมอัตโนมัติ. เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า, 456 หน้า
- สุจินต์ บุรีรัตน์ (2556). การหาค่าเหมาะที่สุดของระบบทางวิศวกรรมเครื่องกล (เล่มที่ 1 และ 2). มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 689 หน้า
- Bleuler, H. (1992). Survey of Magnetic Levitation and Magnetic Bearing Types. **JSME International Journal, Series 3: Vibration, Control Engineering, Engineering for Industry**, Vol.35, No.3, 1992, pp. 335–342.
- Castro, H. F. D., Furtado, R. M., Cavalca, K. L., Pederiva, R., Butzek, N. and Nordmann, R. (2007). Experimental Performance Evaluation of Magnetic Actuator used in Rotating Machinery Analysis. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Vol.29, No.1, 2007, pp. 99–108.
- Chen, K. Y., Tung, P. C., Tsai, M. T. and Fan, Y. H. (2009). A Self-Tuning Fuzzy PID-Type Controller Design for Unbalance Compensation in an Active Magnetic Bearing. **Expert Systems with Applications**, Vol.36, No.4, 2009, pp. 8560–8570.
- Choi, C. Y. (2002). Investigation on the Whirling Motion of Full Annular Rotor Rub. **Journal of Sound and Vibration**, Vol.258, No.1, 2002, pp. 191–198.
- Corporate literature, Application notes, presentations and website of **Brüel & Kjær company**.
- De Queiroz, M.S. (2008). An Active Identification Method of Rotor Unbalance Parameters. **Journal of Vibration and Control**, Vol.15, No.9, 2009, pp. 1365–1374.
- Ewins, D. J. (2000). **Modal Testing: Theory, Practice and Application**. Research Studies Press LTD, 562 pp.
- Friswell, M. I., Penny, J. E. T., Garvey, S. D. and Lees, A. W. (2010). **Dynamics of Rotating Machines**. Cambridge University Press, 526 pp.

- Herzog, R., Buhler, P., Gahler, C. and Larssonneur, R. (1996). Unbalance Compensation Using Generalized Notch Filter in the Multivariable Feedback of Magnetic Bearing. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Vol.4, No.5, 1996. pp. 580–586.
- Hong, S. K. and Nam, Y. (2003). Stable Fuzzy Control System Design with Pole-Placement Constraint: An LMI Approach. **Computers in Industry**, Vol.51, No.1, 2006, pp. 1–11.
- Hu, Y., Yan, Y., Yang, L., Wang, L. and Qian, X. (2017). Online Continuous Measurement of the Operating Deflection Shape of Power Transmission Belts through Electrostatic Charge Sensing. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Vol.66, No.3, 2017, pp. 492–501.
- Inman, D. J. (2007). **Engineering Vibration**. Prentice Hall PTR, 688 pp.
- Inoue, T., Liu, J., Ishida, Y. and Yoshimura, Y. (2009). Vibration Control and Unbalance Estimation of a Nonlinear Rotor System Using Disturbance Observer. **Journal of Vibration and Acoustics**, Vol.131, No. 3, 2009, pp. 031010.1–031010.8.
- Ji, J. C. and Hansen, C. H. (2001). Non Linear Oscillations of a Rotor in Active Magnetic Bearings. **Journal of Sound and Vibration**, Vol.240, No.4, 2001. pp. 599–612.
- Kang, M. S., Lyou, J. and Lee, J.K. (2010). Sliding Mode Control for an Active Magnetic Bearing System Subject to Base Motion. **Mechatronics**, Vol.20, No.1, 2010, pp. 171–178.
- Kasarda, M. E. F. (2000). An Overview of Active Magnetic Bearing System. Technology and Applications. **The Shock and Vibration**, Vol.32, No.2, 2000, pp. 91–99.
- Kejian, J., Changsheng, Z. and Liangliang, C. (2015). Unbalance Compensation by Recursive Seeking Unbalance Mass Position in Active Magnetic Bearing-Rotor System. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol.69, No.9, 2015, pp. 5655–5664.
- Kejian, J., Changsheng, Z. and Ming, T. (2012). A Uniform Control Method for Imbalance Compensation and Automation Balancing in Active Magnetic Bearing-Rotor Systems. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, Vol.134, No.3, 2012, pp. 021006.1–021006.13.
- Knospe C. R. (2007). Active Magnetic Bearings for Machining Applications. **Control Engineering Practice**, Vol.15, No.3, 2007, pp. 307–313.

- Li, G., Lin, Z., Allaire, P. E. and Luo, J. (2006). Modeling of High Speed Rotor Test Rig with Active Magnetic Bearings. **ASME Journal of Vibration and Acoustics**, Vol.128, No.3, 2006, pp. 269–281.
- Li, L., Shinshi, T., Iijima, C., Zhang, X. and Shimokohbe, A. (2003). Compensation of Rotor Imbalance for Precision of a Planar Magnetic Bearing Rotor. **Precision Engineering**, Vol.27, No.2, 2003, pp. 140–150.
- Lum, K. Y., Coppola, V. T. and Bernstein, D.S. (1996). Adaptive Autocentering Control for an Active Magnetic Bearing Supporting a Rotor with Unknown Mass Imbalance. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Vol.4, No.5, 1996. pp. 587–597.
- Matras, A. L., George, T. F. and Robert, F. (2006) Suppression of persistent rotor vibrations using adaptive techniques. **Journal of Vibration and Acoustics**, Vol.128, No. 6, 2006, pp. 682–689.
- Maurice, A. L. (2010). **Rotating Machinery Vibration**. CRC Press, 442 pp.
- Okada, Y. and Nonami, K. (2002). Research Trend on Magnetic Bearings. **JSME International Journal. Series C**, Vol.46, No.2, 2002, pp. 341–343.
- Pesch, A. H., Smirnov, A., Pyrhonen, O. and Sawicki, J. T. (2015). Magnetic Bearing Spindle Tool Tracking through H_∞ -Synthesis Robust Control. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, Vol.20, No.3, 2015, pp. 1448–1457.
- Polajzer, B., Ritonja, J., Stumberger, G., Dolinar, D. and Lecointe, J. P. (2006). Decentralized PI/PD Position Control for Active Magnetic Bearings. **Electrical Engineering**, Vol.89, No.1, 2006, pp. 53–59.
- Rao, S. S. (1995). **Mechanical Vibration**. Addison-Wesley Publishing Company, 912 pp.
- Sabirin, C. R., Binder, A., Popa, D. D. and Craciunescu, A. (2007). Modeling and Digital Control of an Active Magnetic Bearing System. **Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Électrotechnique et Énergétique**, Vol.52, No.2, 2007. pp. 157–181.
- Schweitzer, G. and Maslen, E. H. (2009). **Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 535 pp.
- Setiawan, J. D., Mukherjee, R. and Maslen, E. H. (1999). Adaptive Compensation of Sensor Runout for Magnetic Bearings with Uncertain Parameters: Theory and Experiments.

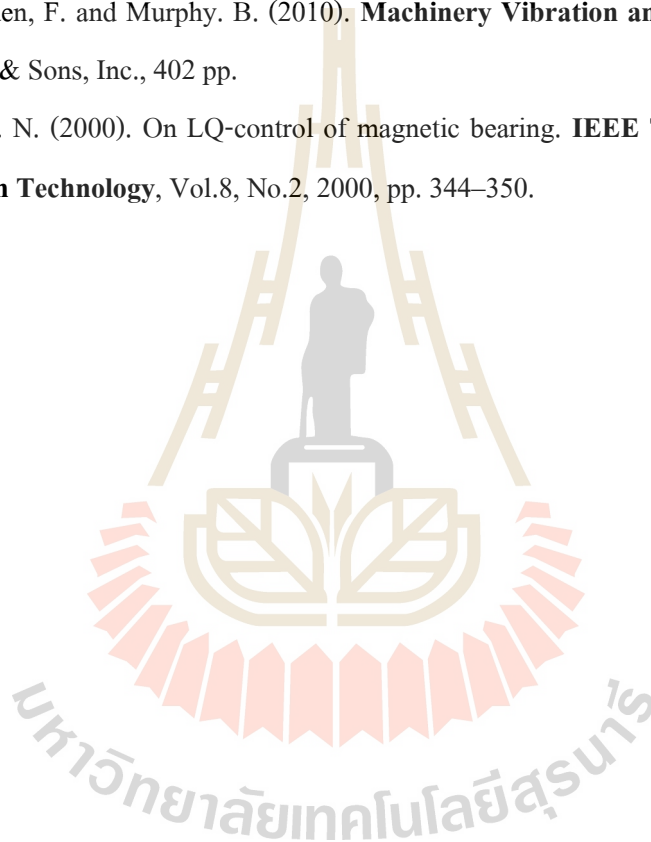
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.123, No.2, 1999, pp. 211–218.

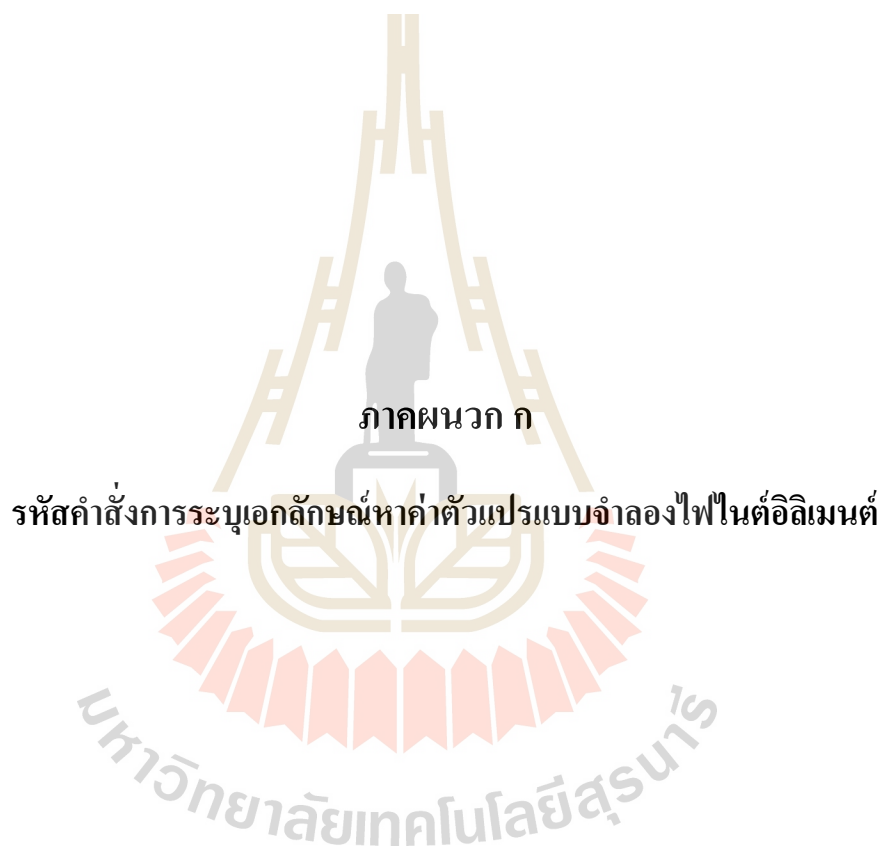
Sivrioglu, S. (2007). Adaptive Control of Nonlinear Zero-Bias Current Magnetic Bearing System. **Journal of Nonlinear Dynamics**, Vol.48, No.1-2, 2007. pp. 175–184.

Surendra, N. G., Schwarz, B. and Richardson, M. H. (2009). Using Operating Deflection Shapes to Detect Unbalance in Rotating Equipment. **Proceedings of International Modal Analysis Conference (IMAC XXVII)**, February, 2009.

Vance, J., Zeiden, F. and Murphy. B. (2010). **Machinery Vibration and rotor dynamics**. John Wiley & Sons, Inc., 402 pp.

Zhuravlyov, Y. N. (2000). On LQ-control of magnetic bearing. **IEEE Transaction on Control System Technology**, Vol.8, No.2, 2000, pp. 344–350.





ภาคผนวก ก

รหัสคำสั่งการระบุเอกลักษณ์หาค่าตัวแปรแบบจำลองไฟในต์อิลิเมนต์

ก.1 รหัสคำสั่งหลัก

```

function err = FEM_GA(p2)
% DEFINITION OF THE STRUCTURE OF THE MODEL %
NE=13; % number of shaft elements %
GL = (NE+1)*4; % number of degree of freedom %
CD=11; % node - disc %
CMM1=1; % node - coupling %
CMM2=3; % node - bearing 1 %
CMM3=7; % node - bearing 2 %
% OPTIMAL PARAMETERS %
% (1) PROPERTIES OF MATERIALS FROM MODEL 1 AND 2%
E = p1(1); % elasticity modulus [N/m^2] %
RSS = p1(2); % stainless steel density [kg/m^3] %
RSI = p1(3); % silicon steel density [kg/m^3] %
% (2) PROPERTIES OF COUPLING AND BEARINGS %
% Coupling - Stiffness [N/m] %
Kty1 = p2(1); Ktz1 = p2(2);
% Bearing 1 - Stiffness [N/m] %
Kty2 = p2(3); Ktz2 = p2(4);
% Bearing 2 - Stiffness [N/m] %
Kty3 = p2(5); Ktz3 = p2(6);
% Mass [kg] %
MasM1 = p2(7); % coupling %
MasM2 = p2(8); MasM3 = p2(9); % bearing 1 and 2 %
% GEOMETRY OF THE ROTATING MACHINE %
% DISCS %
Rd = (80/2)/1000; % outer disc radius [m] %
Rdi = (25/2)/1000; % inner disc radius [m] %
espD = 50/1000 ; % disc thickness [m] %
MasD = pi*(Rd^2-Rdi^2)*espD*RSI; % disc mass [kg] %
% transversal mass moment of inertia of the disc [Kgm^2] %
Id = 1/4*MasD*(Rd^2+Rdi^2)+1/12*MasD*espD^2;
% SHAFT %
Rext = (25/2)/1000; % shaft external radius [m] %
Rint = 0/1000; % shaft internal radius [m] %
% length of the shaft elements [m] %
l(1) = 90/1000; l(2) = 30/1000; l(3) = 30/1000; l(4) = 80/1000;
l(5) = 80/1000; l(6) = 30/1000; l(7) = 50/1000; l(8) = 36/1000;
l(9) = 50/1000; l(10) = 47/1000; l(11) = 47/1000; l(12) = 50/1000; l(13) = 55/1000;
% external radius of shaft elements [m] %
for i=1:NE
    rx(i)=Rext;
end
% internal radius of shaft elements [m] %
for i=1:NE
    ri(i)=Rint;
end
% density of shaft elements [kg/m] %
for i=1:NE
    ro(i) = RSS;
end
% transversal areal of the shaft elements [m^2] %

```

```

for i=1:NE
    St(i) = pi*(rx(i)^2-ri(i)^2);
end
% area moment of inertia of the shaft elements [m^4] %
for i=1:NE
    II(i)=(1/(4))*pi*(rx(i)^4-ri(i)^4);
End
% ASSEMBLE GLOBAL MATRIX %
[Mglob,Kglob] =
Shftelem(GL,I,NE,ro,St,II,CD,MasD,Id,E,CMM1,CMM2,CMM3,Ktz1,Kty1,Ktz2,Kty2,Ktz3,Kty
3,Omega,MasM1,MasM2,MasM3);
% MODAL ANALYSIS %
% Calculating Eigenvectors and Eigenvalues %
[U,lambda]=eig(-Kglob,Mglob);
[lam,p]=sort(diag(lambda));
U=U(:,p);
ModoVirt=5;
ModoReal=2*ModoVirt;
for i=1:ModoReal
    wn(i)=imag(lam(i));
end
format shortEng
fn=abs(wn/(2*pi));
% FITNESS FUNCTION %
wnex1=[10.5 23.3 34 36 50];
wnem1=[wnex1(1)*ones(1,2) wnex1(2)*ones(1,2) wnex1(3)*ones(1,2) wnex1(4)*ones(1,2)
wnex1(5)*ones(1,2)];
for i=1:1:10
    z(i) = 100*((abs(wnem1(i))-fn(i))/wnem1(i));
end
err = z(1)+z(2)+z(3)+z(4)+z(5)+z(6)+z(7)+z(8)+z(9)+z(10);

```

ก.2 รหัสคำตั้่งย่อ

```

function [Mglob,Kglob] =
Shftelem(GL,I,NE,ro,St,II,CD,MasD,Id,E,CMM1,CMM2,CMM3,Ktz1,Kty1,Ktz2,Kty2,Ktz3,Kty
3,Omega,MasM1,MasM2,MasM3);

% Defining the global matrices with zero elements %
M=zeros(GL); G=zeros(GL); K=zeros(GL);
% GLOBAL MASS MATRIX %
a=1; b=8;
for n=1:NE
MteAux= [156    0    0    22*L(n)  54    0    0    -13*L(n);
          0    156  -22*L(n)  0    0    54    13*L(n)  0;
          0   -22*L(n)  4*L(n)^2  0    0   -13*L(n) -3*L(n)^2  0;
          22*L(n)  0    0    4*L(n)^2  13*L(n)  0    0   -3*L(n)^2;
          54    0    0    13*L(n)  156    0    0   -22*L(n);
          0    54   -13*L(n)  0    0    156   22*L(n)  0;
          0   13*L(n) -3*L(n)^2  0    0   22*L(n)  4*L(n)^2  0;
          -13*L(n)  0    0   -3*L(n)^2 -22*L(n)  0    0    4*L(n)^2];
Mte = ((ro(n)*St(n)*L(n))/420)*MteAux;

```

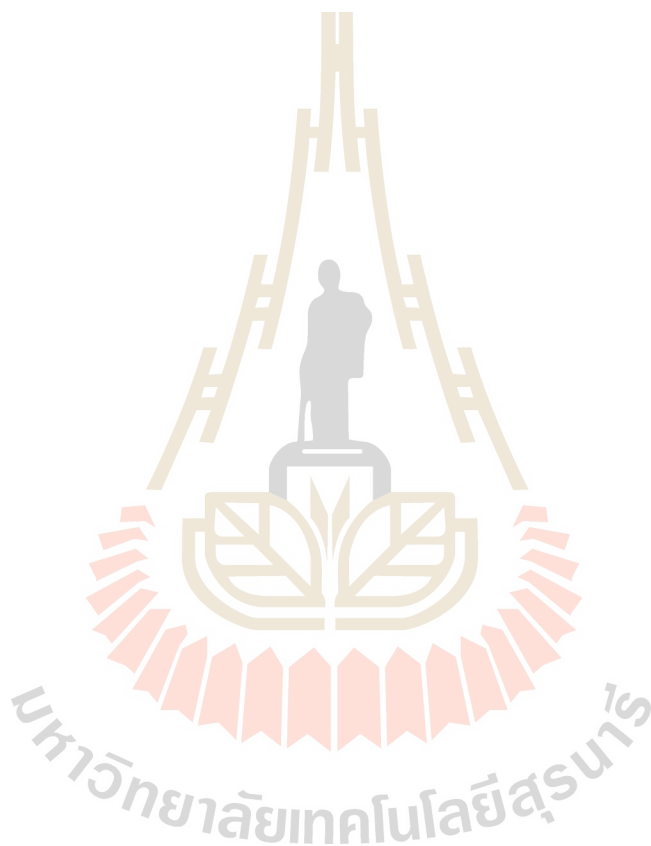
```

MreAux= [36 0 0 3*L(n) -36 0 0 3*L(n);
0 36 -3*L(n) 0 0 -36 -3*L(n) 0;
0 -3*L(n) 4*L(n)^2 0 0 3*L(n) -L(n)^2 0;
3*L(n) 0 0 4*L(n)^2 -3*L(n) 0 0 -L(n)^2;
-36 0 0 -3*L(n) 36 0 0 -3*L(n);
0 -36 3*L(n) 0 0 36 3*L(n) 0;
0 -3*L(n) -L(n)^2 0 0 3*L(n) 4*L(n)^2 0;
3*L(n) 0 0 -L(n)^2 -3*L(n) 0 0 4*L(n)^2];
Mre = ((ro(n)*II(n))/(30*L(n)))*MreAux;
MauxT=Mte+Mre;
for f=a:b
    for g=a:b
        M(f,g)=M(f,g)+MauxT(f-(n-1)*4,g-(n-1)*4);
    end
end
a=a+4; b=b+4;
end
% Adding the mass matrices of the disc elements
M((CD1-1)*4+1,(CD1-1)*4+1)=M((CD1-1)*4+1,(CD1-1)*4+1)+MasD;
M((CD1-1)*4+2,(CD1-1)*4+2)=M((CD1-1)*4+2,(CD1-1)*4+2)+MasD;
M((CD1-1)*4+3,(CD1-1)*4+3)=M((CD1-1)*4+3,(CD1-1)*4+3)+Id;
M((CD1-1)*4+4,(CD1-1)*4+4)=M((CD1-1)*4+4,(CD1-1)*4+4)+Id;
% Adding the mass matrices of the coupling and bearing elements
M((CMM1-1)*4+1,(CMM1-1)*4+1)=M((CMM1-1)*4+1,(CMM1-1)*4+1)+MasM1;
M((CMM1-1)*4+2,(CMM1-1)*4+2)=M((CMM1-1)*4+2,(CMM1-1)*4+2)+MasM1;
M((CMM2-1)*4+1,(CMM2-1)*4+1)=M((CMM2-1)*4+1,(CMM2-1)*4+1)+MasM2;
M((CMM2-1)*4+2,(CMM2-1)*4+2)=M((CMM2-1)*4+2,(CMM2-1)*4+2)+MasM2;
M((CMM3-1)*4+1,(CMM3-1)*4+1)=M((CMM3-1)*4+1,(CMM3-1)*4+1)+MasM3;
M((CMM3-1)*4+2,(CMM3-1)*4+2)=M((CMM3-1)*4+2,(CMM3-1)*4+2)+MasM3;
% GLOBAL STIFFNESS MATRIX %
a=1; b=8;
for n=1:NE
    KbeAux= [12 0 0 6*L(n) -12 0 0 6*L(n);
0 12 -6*L(n) 0 0 -12 -6*L(n) 0;
0 -6*L(n) 4*L(n)^2 0 0 6*L(n) 2*L(n)^2 0;
6*L(n) 0 0 4*L(n)^2 -6*L(n) 0 0 2*L(n)^2;
-12 0 0 -6*L(n) 12 0 0 -6*L(n);
0 -12 6*L(n) 0 0 12 6*L(n) 0;
0 -6*L(n) 2*L(n)^2 0 0 6*L(n) 4*L(n)^2 0;
6*L(n) 0 0 2*L(n)^2 -6*L(n) 0 0 4*L(n)^2];
Kbe = ((E*II(n))/(L(n)^3))*KbeAux;
for f=a:b
    for g=a:b
        K(f,g)=K(f,g)+Kbe(f-(n-1)*4,g-(n-1)*4);
    end
end
a=a+4; b=b+4;
end
% Adding the stiffness matrices of the coupling and bearing elements
K((CMM1-1)*4+1,(CMM1-1)*4+1)=K((CMM1-1)*4+1,(CMM1-1)*4+1)+Ktz1;
K((CMM1-1)*4+2,(CMM1-1)*4+2)=K((CMM1-1)*4+2,(CMM1-1)*4+2)+Kty1;
K((CMM2-1)*4+1,(CMM2-1)*4+1)=K((CMM2-1)*4+1,(CMM2-1)*4+1)+Ktz2;
K((CMM2-1)*4+2,(CMM2-1)*4+2)=K((CMM2-1)*4+2,(CMM2-1)*4+2)+Kty2;

```



```
K((CMM3-1)*4+1,(CMM3-1)*4+1)=K((CMM3-1)*4+1,(CMM3-1)*4+1)+Ktz3;  
K((CMM3-1)*4+2,(CMM3-1)*4+2)=K((CMM3-1)*4+2,(CMM3-1)*4+2)+Kty3;  
% GLOBAL MATHEMATICAL MODEL %  
Mglob=[G M;  
        M zeros(size(M,1))];  
Kglob=[K zeros(size(M,1));  
        zeros(size(M,1)) -M];
```



ประวัติผู้เขียน

นายนิติศักดิ์ หนูมาน้อย เกิดเมื่อวันที่ 22 กันยายน 2530 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี เริ่มการศึกษา ระดับประถมศึกษาปีที่ 1 ถึงมัธยมศึกษาปีที่ 6 ที่โรงเรียนมัธยมวัดใหม่กรงทอง จังหวัดปราจีนบุรี ในปี พ.ศ. 2552 และปี พ.ศ. 2554 ได้สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ตามลำดับ เมื่อปี พ.ศ. 2557 ได้รับทุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนร่วมกับบริษัท มณีสุรณัฏ์ กรุ๊ป จำกัด ในโครงการพัฒนานักวิจัย และงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ศึกษาต่อระดับในระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันมีผลงานตีพิมพ์ในระดับนานาชาติจำนวน 3 ฉบับ และระดับชาติ 1 ฉบับ รวมถึงผลงานประชุมวิชาการทั้งในระดับชาติ และนานาชาติกว่า 10 ฉบับ

