

การวิเคราะห์และควบคุมการสั่นของเพลาโดยใช้แบร์ริงแม่เหล็ก  
แบบกระตุ้นรองรับด้านเดียว

นายนิติศักดิ์ หนูมาน้อย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2555

**ANALYSIS AND CONTROL OF SHAFT VIBRATION  
USING SUPPORTIVE ACTIVE  
MAGNETIC - BEARING**

**Nitisak Numanoy**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2012**

การวิเคราะห์และควบคุมการสั้นของเพลลาโดยใช้แบริ่งแม่เหล็ก  
แบบกระตุ้นรองรับด้านเดียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.กิริติ สุด้กษณ์)

กรรมการ

(ผศ. ดร.สุภกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจ่างค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นิติศักดิ์ หนูมาน้อย : การวิเคราะห์และควบคุมการสั่นของเพลาโดยใช้แบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นรองรับด้านเดียว (ANALYSIS AND CONTROL OF SHAFT VIBRATION USING SUPPORTIVE ACTIVE MAGNETIC - BEARING) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 126 หน้า.

ปัจจุบันในต่างประเทศได้มีการวิจัยและพัฒนาในการประยุกต์ใช้ระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น (Active Magnetic Bearing System) เมื่อเปรียบเทียบการทำงานระหว่างระบบแบริ่งทั่วไปกับระบบแบริ่งแม่เหล็กจะพบว่าระบบแบริ่งแม่เหล็ก มีข้อดีที่เป็นประโยชน์คือ การสัมผัสของเครื่องจักรระหว่างแบริ่งกับ โรเตอร์และการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าน้อย สามารถลดการสึกหรอเครื่องจักรโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่น มีประสิทธิภาพการทำงานในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และสามารถทำงานที่ความเร็วสูง ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้สามารถยืดอายุการทำงานของเครื่องจักรได้ แบริ่งแม่เหล็กสามารถนำมาใช้ในการลดการสั่นของเพลาที่เกิดจากความไม่สมดุลได้ แต่เนื่องจากการควบคุมการทำงานของแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นนั้นมีความซับซ้อนและมีความยุ่งยาก จึงทำให้ชุดควบคุมระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นมีราคาแพง และยังไม่นิยมแพร่หลายมากนัก โดยเฉพาะประเทศไทย ซึ่งในอนาคตมีความเป็นไปได้ที่ระบบแบริ่งแบบกระตุ้นจะเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรม ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และควบคุมการสั่นของเพลาโดยใช้แบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลรองรับด้านเดียว โดยการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นระบบอันดับสองด้วยการชดเชยเฟสและใช้ตัวควบคุม PD เพื่ออธิบายการตอบสนองทางพลวัตและลดการสั่นของเพลา

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_



NITISAK NUMANOY : ANALYSIS AND CONTROL OF SHAFT  
VIBRATION USING SUPPORTIVE ACTIVE MAGNETIC - BEARING.  
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D.,  
126 PP.

MATHEMATICAL MODEL OF ACTIVE MAGNETIC - BEARINGS/  
SWITCH RELAY/ PD CONTROLLER

Present on abroad has a research and development in the application of active magnetic - bearings system. As comparison the working between a general bearings system with a magnetic - bearings system will find that the magnetic - bearings system had a useful. It was the contact of mechanism between the bearings. The magnetic bearings can be used to reduce the vibration of the shaft caused by the imbalance. However, due to the control of magnetic - bearings system were complex and difficult. As a result, the magnetic bearing's control system in active type was expensive. And it was not very widespread. Especially in Thailand, it will be possible the active magnetic - bearings will play a vital role in the industry in the future. Therefore, this work presented the analysis and controlled the vibration of the shaft, using a 4 pole for the same active. By estimation the mathematical model as 2<sup>nd</sup> Order system with a phase compensate and using PD controller in order to describe the dynamic response and reduce the vibration of the shaft.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co - advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้ หากไม่ได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการวิจัย และคอยเคียงเจี๊ยผู้วิจัยจนทำให้สามารถก้าวผ่านอุปสรรคต่าง ๆ ได้อย่างภาคภูมิใจ ตลอดจนยังเป็นแบบอย่างที่ดีให้แก่ผู้วิจัย ในด้านการสอนการวิจัย การดำรงชีวิต และการอุทิศตนต่อสังคม ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง และจักได้นำไปเป็นแบบอย่างในการทำงานและการดำรงชีวิต ในภายภาคหน้าต่อไป

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการวิจัยระบบแม่เหล็ก (Magnets System) ซึ่งผู้วิจัยประยุกต์ใช้หลักการ แนวคิด เทคนิคต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ จำพิศ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติ สุกัญจน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ซึ่งผู้วิจัยขอระลึกไว้ตลอดไป

ขอขอบคุณบุคคลดังต่อไปนี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยจะขอจดจำไว้ตลอดไป

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพ เข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนอุดหนุน โครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา

- คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอักษรวิทยา คุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร คุณกัศกร ต่อชีพ และคุณสายฝน สิบพลกรัง เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านเอกสารต่าง ๆ

- คุณชาญยุทธ ขจรไตรเดช คุณพรพรรณ ปันเจริญ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ในกลุ่มวิจัย System and Control Engineering Laboratory ที่ให้คำแนะนำ กำลังใจ และช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อบัญชา คุณแม่อุทิศ คุณป้าละม้าย และสมาชิกครอบครัวหนุ่มน้อย และครอบครัวรักเมืองทุกท่าน ที่ได้ให้กำเนิดและอบรมเลี้ยงดู ให้ความรัก ความเอาใจใส่ และให้โอกาสทางการศึกษา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

นิติศักดิ์ หนูมาน้อย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๗
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
<b>2 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>5</b>
2.1 แบร์ริงแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
2.2 การสั้นแบบบังคับ.....	10
2.3 ความไม่สมดุลจากการหมุน.....	14
2.4 การประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	15
2.5 การควบคุมระบบ.....	17
2.5.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	17
2.5.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6	คุณสมบัติของตัวควบคุม .....	19
2.6.1	การควบคุมแบบสัดส่วน .....	19
2.6.2	การควบคุมแบบอินทิกรัล.....	20
2.6.3	ตัวควบคุมอนุพันธ์ .....	21
2.7	สัญญาณควบคุม.....	22
2.7.1	สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	23
2.7.2	สัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล .....	24
2.8	เกณฑ์ตรรกะนิสมรรถนะในการควบคุม.....	24
2.9	ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.10	สรุป.....	28
<b>3</b>	<b>แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....</b>	<b>29</b>
3.1	โครงสร้างพื้นฐานแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น .....	29
3.2	แม่เหล็กไฟฟ้าและแบร์ริงแม่เหล็ก .....	30
3.3	การเคลื่อนที่ของเพลลา.....	36
3.4	สรุป.....	42
<b>4</b>	<b>การประมาณค่าแบบจำลองและผลการจำลองสถานการณ์.....</b>	<b>43</b>
4.1	การประมาณค่าแบบจำลองของระบบเทียบเท่าของโรเตอร์.....	45
4.1.1	ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยการวัดเพื่อประมาณค่าพามีเตอร์ .....	46
4.1.2	ผลการประมาณค่าพามีเตอร์จากการวิเคราะห์โดยการวัด .....	47
4.2	การประมาณค่าความต่างเฟส .....	50
4.2.1	หาเฟสการสั่นด้วยวิธีการไลซาลูส์ .....	51
4.2.2	หาเฟสการสั่นด้วยการชดเชยเวลาประวิง .....	53
4.2.3	หาเฟสการสั่นด้วยตัวชดเชย ITAE.....	53
4.3	การออกแบบตัวควบคุมเพื่อลดแอมพลิจูดการสั่น.....	61
4.4	ผลการทดสอบจำลองควบคุมขนาดแอมพลิจูดด้วยตัวควบคุมแบบ PD และตัวชดเชยเฟสที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM.....	67

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5	สรุป.....	71
5	<b>การทดลองลดการสั่นของเพลาด้วยระบบเบร้งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล</b>	
	<b>รองรับด้านเดียว .....</b>	<b>72</b>
5.1	เครื่องมือทดลองและการติดตั้ง.....	73
5.2	การ Switch Relay ด้วย H-Bridge Switching ของ RABCON Board.....	76
5.3	การควบคุมและรับสัญญาณผ่าน RABCON Board.....	77
5.4	การ โปรแกรมควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบเบร้งแม่เหล็ก แบบกระตุ้นแบบ 4 โพล .....	81
5.5	การทดสอบควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบเบร้งแม่เหล็ก แบบกระตุ้นแบบ 4 โพล .....	82
5.5.1	ผลการทดสอบควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบเบร้ง แม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพลที่ความเร็วรอบ 100 RPM .....	83
5.5.1.1	ควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียว .....	83
5.5.1.2	ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียว .....	86
5.5.1.3	ควบคุมทิศทาง x และ y.....	88
5.5.2	ผลการทดสอบควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วย ระบบเบร้งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพล ที่ความเร็วรอบ 200 และ 300 RPM.....	90
5.5.2.1	ควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ 200 RPM .....	90
5.5.2.2	ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ 200 RPM .....	91
5.5.2.3	ควบคุมทิศทาง x และ y ที่ 200 RPM .....	92
5.5.2.4	ควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ 300 RPM .....	93
5.5.2.5	ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ 300 RPM .....	94
5.5.2.6	ควบคุมทิศทาง x และ y ที่ 300 RPM .....	95

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.6 สรุป.....	98
6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	99
6.1 สรุป.....	99
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	100
รายการอ้างอิง .....	101
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation .....	103
ภาคผนวก ข. ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board และการติดตั้ง Hardware.....	112
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	117
ประวัติผู้เขียน.....	126

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางมาตรฐานเทียบสัมประสิทธิ์ ITAE .....	25
4.1	แสดงการกระจัดของเพลาที่ตำแหน่งเบริงแม่เหล็กในทิศทางต่าง ๆ .....	46
4.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ร่วมของระบบ .....	47
4.3	แสดงค่าพารามิเตอร์แรงรบกวนระบบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ .....	47
4.4	แสดงเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบคลื่นการสั่น .....	50
4.5	แสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบเพลาที่รองรับด้านเดียวด้วยเบริงแม่เหล็ก .....	62
5.1	แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board (RAPCON Real – Time Rapid Control Prototyping Platform for MATLAB/SIMULINK) .....	75
5.2	แสดงความสัมพันธ์ของค่า Value ที่ส่งสัญญาณออกในแต่ละโหมด .....	79
5.3	แสดงค่าพารามิเตอร์ของเซนเซอร์ .....	80
ก.1	แสดงค่าแอมพลิจูดการสั่นสูงสุดที่ได้จากการทดลอง .....	104

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แบบจำลองที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยเบร็งแบบทั่วไปและข้างหนึ่งรองรับด้วยเบร็งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล .....5
2.2	แผนภาพแสดงกระบวนการออกแบบของระบบเบร็งแม่เหล็ก .....6
2.3	ระบบมวลสปริงตัวหน่วงภายใต้แรงกระทำ (ก) แบบจำลองของระบบ (ข) แผนภาพวัตถุอิสระของระบบ .....10
2.4	แบบจำลองของระบบที่มีการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากความไม่สมดุลในการหมุนและแผนภาพวัตถุอิสระของระบบ .....15
2.5	แสดงการหาค่าเบี่ยงเบนของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด .....16
2.6	ระบบควบคุมแบบวงเปิด .....17
2.7	ตัวควบคุม PID ที่ต่อเข้าควบคุมแบบอนุกรม .....18
2.8	ตัวควบคุม PID ของระบบวงปิด .....19
2.9	สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา .....23
2.10	สัญญาณแอนะล็อก สัญญาณดิจิทัลแบบที่ต่อเนื่องทางเวลา และสัญญาณดิจิทัลแบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา .....24
3.1	แสดงโครงสร้างเบร็งแม่เหล็กแบบกระตุ้น .....30
3.2	วงจรพื้นฐานของเบร็งแม่เหล็ก .....31
3.3	แสดงแรงแม่เหล็กใน 1 แกน .....33
3.4	แสดงแบบจำลองของเพลาที่มีเบร็งรองรับทั้งสองด้าน .....36
4.1	แผนภาพการควบคุมการสั่นของเพลา .....43
4.2	แสดงการเคลื่อนที่ของเพลาแบบเชิงครึ่งในรูปแบบต่าง ๆ .....44
4.3	แผนภาพระบบเปิดของระบบเทียบเท่าโรเตอร์ .....45
4.4	วงโคจรการหมุนเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ประมาณค่ากับผลการทดลองที่ 100 200 และ 300 RPM .....48
4.5	แสดงแอมพลิจูดหรือการกระจัดในทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM .....49



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	รูปแบบของ Lissajous ของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่เท่ากันแต่มีเฟสต่างกัน ในกรณีต่าง ๆ (a) $\theta = 0$ , (b) $\theta = \pi / 6$ , (c) $\theta = \pi / 4$ , (d) $\theta = \pi / 3$ , (e) $\theta = \pi / 2$ , (f) $\theta = 3\pi / 2$ , (g) $\theta = 3\pi / 4$ , (h) $\theta = 5\pi / 6$ และ (i) $\theta = \pi$ .....52
4.7	แสดงแผนภาพโบคของตัวชดเชยเฟสแบบ ITAE .....56
4.8	เปรียบเทียบผลการตอบสนองทางพลวัตของสัญญาณที่มีการใช้ ตัวชดเชยเฟส แบบ ITAE.....56
4.9	ผลการตอบสนองทางพลวัตของสัญญาณที่มีการใช้ตัวชดเชยเฟส ที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....57
4.10	ผลการตอบสนองทางพลวัตของสัญญาณที่มีการใช้ตัวชดเชยเฟส ที่ความเร็วรอบ 200 RPM.....58
4.11	ผลการตอบสนองทางพลวัตของสัญญาณที่มีการใช้ตัวชดเชยเฟส ที่ความเร็วรอบ 300 RPM.....58
4.12	วงโคจรเปรียบเทียบการทดลองกับวิธีการ Lissajous, ITAE และ Delay time ที่ 100 RPM.....59
4.13	วงโคจรเปรียบเทียบการทดลองกับวิธีการ Lissajous, ITAE และ Delay time ที่ 200 RPM.....60
4.14	วงโคจรเปรียบเทียบการทดลองกับวิธีการ Lissajous, ITAE และ Delay time ที่ 300 RPM.....60
4.15	แสดงระบบเบริงแม่เหล็กที่มีตัวควบคุม PD.....63
4.16	แผนภาพตำแหน่งของโพลและซีโรของระบบวงเปิดและวงปิดที่มีตัวควบคุม .....66
4.17	แสดงการจำลองแรงที่กระทำกับระบบในทิศทาง x และ y ที่ 100 200 และ 300 RPM .....68
4.18	แสดงผลจำลองการควบคุมกระแสในทิศทาง x และ y ที่ 100 200 และ 300 RPM .....69

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.19	แสดงผลการจำลองวงโคจรการหมุนเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการควบคุม กับมีการควบคุมที่ 100 200 และ 300 RPM.....	70
5.1	แสดงการ Switch ON/OFF .....	72
5.2	เครื่องทดสอบการลดการสั่นพลาด้วยระบบเบริงแม่เหล็ก แบบกระตุ้น 4 โพล .....	74
5.3	ระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล .....	74
5.4	PCI Serial Card ด้วยการเชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable และบอร์ด RABCON .....	75
5.5	แสดงการ Switch ON/OFF ด้วย Relay .....	76
5.6	แสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MatLab/Simulink กับ RABCON Board ในการป้อนค่าสัญญาณให้กับ Power Amplifier (Magnetic Bearing) .....	78
5.7	แสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MatLab/Simulink กับ RABCON Board ในการรับค่าสัญญาณจากเซนเซอร์ผ่าน Voltage Divider.....	80
5.8	ขั้นตอนควบคุมการสั่นของเพลลาด้วยระบบเบริงแม่เหล็ก แบบกระตุ้นแบบ 4 โพล.....	81
5.9	แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแส ในทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....	83
5.10	แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง x เปรียบเทียบกับการชดเชยเฟส และสัญญาณอ้างอิงที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....	84
5.11	แสดงกระแสควบคุมเบริงแม่เหล็กในทิศทาง x กับสัญญาณการควบคุม ที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....	84
5.12	แสดงเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนของเพลลาเมื่อควบคุมในทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....	85
5.13	แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแส ในทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....	86

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
5.14	แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง $y$ เปรียบเทียบกับการชดเชยเฟส และสัญญาณอ้างอิงที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....	87
5.15	แสดงกระแสควบคุมเบร้งแม่เหล็กในทิศทาง $y$ กับสัญญาณการควบคุม ที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....	87
5.16	แสดงเปรียบเทียบวง โจรการหมุนของเพลานเมื่อควบคุมในทิศทาง $y$ ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....	88
5.17	แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง $x$ และ $y$ เมื่อมีการควบคุมกระแส ทั้งทิศทาง $x$ และ $y$ ที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....	89
5.18	แสดงเปรียบเทียบวง โจรการหมุนของเพลานเมื่อควบคุม ในทิศทาง $x$ และ $y$ ที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....	90
5.19	แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง $x$ และ $y$ เมื่อมีการควบคุมกระแส ในทิศทาง $x$ ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 200 RPM.....	91
5.20	แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง $x$ และ $y$ เมื่อมีการควบคุมกระแส ในทิศทาง $y$ เพียงทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 200 RPM.....	92
5.21	แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง $x$ และ $y$ เมื่อมีการควบคุมกระแส ในทิศทาง $x$ และ $y$ ที่ความเร็วรอบ 200 RPM.....	93
5.22	แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง $x$ และ $y$ เมื่อมีการควบคุมกระแส ในทิศทาง $x$ ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 300 RPM.....	94
5.23	แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง $x$ และ $y$ เมื่อมีการควบคุมกระแส ในทิศทาง $y$ เพียงทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 300 RPM.....	95
5.24	แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง $x$ และ $y$ เมื่อมีการควบคุมกระแส ในทิศทาง $x$ และ $y$ ที่ความเร็วรอบ 300 RPM.....	96
5.25	แสดงเปรียบเทียบวง โจรการหมุนของเพลานเมื่อควบคุมในทิศทาง $y$ ต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบ 200 และ 300 RPM.....	97
ก.1	แผนภาพการจำลองแอมพลิจูดการสั่นใน Simulink .....	104
ก.2	แผนภาพข้อมูลการตอบสนองใน Work space .....	105

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก.3	แผนภาพระบบเปิดของระบบเทียบเท่าโรเตอร์ .....	105
ก.4	แผนภาพการจำลองระบบเทียบเท่าใน Simulink .....	106
ก.5	แผนภาพแสดงหน้าต่างของ Control and Estimation Tools Manager .....	107
ก.6	แผนภาพแสดงหน้าต่างของการเลือก New Data .....	107
ก.7	แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลเข้า .....	108
ก.8	แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณ .....	108
ก.9	แผนภาพแสดงหน้าต่างการสร้าง New Estimation .....	109
ก.10	แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลในการ Estimate .....	109
ก.11	แผนภาพแสดงหน้าต่างการกำหนดตัวแปรที่ต้องการประมาณ .....	110
ก.12	แผนภาพแสดงการกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร .....	110
ก.13	แผนภาพแสดงการเริ่มการประมาณค่าตัวแปร .....	111
ก.14	แผนภาพแสดงค่าตัวแปรที่โปรแกรมประมาณได้ .....	111



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$B$	=	ความเหนี่ยวนำแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์ ( $Tesla = N / A \cdot m$ )
$\Phi$	=	ฟลักซ์แม่เหล็ก ( $Weber = Wb$ )
$H$	=	สนามแม่เหล็ก ( $Wb / A \cdot m$ )
$Ni$	=	แรงเคลื่อนแม่เหล็ก
$\mu$	=	ค่า Permeability หรือ ค่าบ่งบอกคุณสมบัติของสารแม่เหล็ก ( $V.s / A.m$ )
$\mu_0$	=	ค่า Permeability ของอากาศ ( $V.s / A.m$ )
$\mu_r$	=	ค่า Relative Permeability หรือค่าความซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ของสารตัวกลาง
$L$	=	การเหนี่ยวนำไฟฟ้า ( $H$ )
$N$	=	จำนวนรอบขดลวด ( $rev$ )
$n_c$	=	จำนวนรอบของการพันแกนเหล็ก ( $rev$ )
$i$	=	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด ( $A$ )
$i_0$	=	กระแสเริ่มต้น ( $A$ )
$i_x$	=	กระแสควบคุมในทิศทาง x ( $A$ )
$F_M$	=	แรงแม่เหล็ก ( $N$ )
$m$	=	มวลของโรเตอร์ ( $kg$ )
$m_u$	=	มวลของความไม่สมดุล ( $kg$ )
$A$	=	พื้นที่หน้าตัดที่เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก ( $m^2$ )
$l_{Fe}$	=	เส้นฟลักซ์ในแกนเหล็ก ( $m$ )
$l_A$	=	เส้นฟลักซ์ช่องว่างอากาศ ( $m$ )
$x$	=	การกระจัดในทิศทาง x ( $m$ )
$x_{ref}$	=	การกระจัดอ้างอิงในทิศทาง x ( $m$ )
$x_{est}$	=	การกระจัดที่ได้จากประมาณค่า ( $m$ )
$y$	=	การกระจัดในทิศทาง y ( $m$ )
$e$	=	ระยะความไม่สมดุล ( $m$ )
$\theta_x$	=	การกระจัดเชิงมุมรอบแกน x ( $redian$ )
$\theta_y$	=	การกระจัดเชิงมุมรอบแกน y ( $redian$ )

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$k_M$	=	ค่าคงที่ของเบริงแม่เหล็ก ( $V \cdot s/m / A$ )
$k_i$	=	ค่าความแข็งกระแส ( $N/A$ )
$k_x$	=	ค่าความแข็งการกระจัด ( $N/m$ )
$k_{sn}$	=	ค่าอัตราขยายของเซนเซอร์ ( $N/m$ )
$k_{est}$	=	ค่าความแข็งของระบบเทียบเท่าโรเตอร์ ( $N/m$ )
$K$	=	อัตราขยายของระบบเทียบเท่าโรเตอร์
$K_p$	=	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม $P$
$T_d$	=	ค่า Time Constant ของตัวควบคุม $D$
$U$	=	ขนาดความไม่สมดุล ( $kg \cdot m$ )
$D$	=	เทอมชดเชยแรงรบกวนทั้งระบบ ( $N$ )
$\omega_r$	=	ความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ ( $RPM$ )
$\omega_n$	=	ความถี่ธรรมชาติของระบบเทียบเท่าโรเตอร์ ( $rad / sec$ )
$\zeta$	=	อัตราส่วนหน่วงของระบบเทียบเท่าโรเตอร์
$c$	=	ค่าความหน่วงของระบบเทียบเท่าโรเตอร์ ( $N \cdot s/m$ )
$G_{p,est}$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองเทียบเท่าโรเตอร์
$G_d$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนของ Delay

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวิธีการควบคุมการสั่นสะเทือนสามารถกระทำได้หลายวิธี สำหรับงานในทางวิศวกรรม เหตุที่ต้องควบคุมการสั่นสะเทือนนั้น พิจารณาได้สองกรณีใหญ่ ๆ กรณีแรกคือ การนำประโยชน์ที่เกิดจากการสั่นไปใช้งาน เช่น เครื่องเขย่า (Shaker) เพื่อแยกสาร กัดขนาดของผลผลิต หรือเพื่อให้สารเคมีตกตะกอน ซึ่งงานควบคุมดังกล่าวต้องการการควบคุมขนาดและความถี่ของการสั่นให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาการทำงาน กรณีที่สองเพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นให้ลดลงหรือหายไปจากระบบ เช่น ในโครงสร้างของสะพาน อาคาร เครื่องยนต์ หรือในระบบกลไกการทำงานต่าง ๆ ซึ่งการสั่นนี้อาจจะเกิดมาจากการกระทำของสิ่งแวดล้อม เช่น แรงลมที่กระทำต่ออาคารและสะพาน หรือการสั่นที่เกิดจากตัวระบบเอง เช่น การสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากกลไกการทำงานของชิ้นส่วนที่มีการหมุน การกระแทกของชิ้นส่วนต่าง ๆ เป็นต้น ในกรณีระบบมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ซึ่งจะต้องมีการสั่นเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เสมอไม่ว่าระบบนั้นจะถูกออกแบบให้ดีเพียงใดก็ตาม และการสั่นสะเทือนนี้เองที่ทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ เช่น เกิดเสียงรบกวน เกิดความล้าชิ้นในวัสดุของโครงสร้าง หรือในกรณีวิกฤตอาจทำให้โครงสร้างหรือเครื่องจักรเสียหาย และการสั่นในบางความถี่จะมีผลโดยตรงและอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ สำหรับการป้องกันการสั่นสะเทือนโดยหลักการแล้วสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ วิธีแรก สร้างเครื่องจักรหรือโครงสร้างให้มีความสมบูรณ์ ซึ่งหมายความว่า จะไม่มีแรงลัพธ์กระทำออกมานอกระบบเลยถึงแม้ระบบจะมีชิ้นส่วนที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ก็ตาม และอีกวิธีการเรียกว่า การถ่วงดุล (Balancing) แม้ว่าจะมีความเป็นไปได้หลายกรณีที่จะสร้างเครื่องจักรให้มีความสมบูรณ์ แต่ก็มีความยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายที่สูงทั้งในการออกแบบ การสร้าง และการบำรุงดูแลรักษา ส่วนวิธีที่สองนั้น เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความยุ่งยาก และค่าใช้จ่ายดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อาจยอมให้ระบบมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น โดยควบคุมให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ยอมรับได้ ด้วยการออกแบบและใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ มาควบคุมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นให้ได้ตามต้องการ

การทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่มีการหมุน (Rotating Machine) หรือเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่ไหวโดยอาศัยหลักการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ต่าง ๆ อย่างเช่น เพลา (Shaft) ล้อช่วยแรง (Flywheels) โรเตอร์ – สเตเตอร์ (Rotor – Stator) เป็นต้น ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

ในการออกแบบรองลื่นหรือตลับลูกปืน (Bearing) ให้สามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูง โดยใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมุน ด้วยขีดจำกัดของแบร์ริงที่ต้องใช้สารหล่อลื่น (Lubricants) เป็นส่วนประกอบ ทำให้ไม่สามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูงได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเปลี่ยนไป และอาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการหมุนได้ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การสั่นสะเทือนนั้นนอกจากจะก่อให้เกิดเสียงและการสั่นรบกวนแล้วยังก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม ระบบทางกลทั่วไปจะมีการทำงานในหลายช่วงความถี่ แรงที่เกิดขึ้นจึงเป็นแรงพลวัตซึ่งความถี่และขนาดของแรงดังกล่าวจะไม่คงที่ ดังนั้นการควบคุมการสั่นในเบื้องต้น อันได้แก่ การควบคุมความถี่ธรรมชาติ การเพิ่มตัวหน่วงให้กับระบบ จะให้ผลในการลดการสั่นที่ยังไม่มีประสิทธิภาพมากนัก ซึ่งช่วง 30 ปีที่ผ่านมา ระบบแบร์ริงแม่เหล็ก (Magnetic Bearing System) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรม ด้วยคุณสมบัติอันเป็นเอกลักษณ์และยังเป็นทางเลือกใหม่ในการแก้ปัญหาโรเตอร์แบร์ริงของเครื่องจักรที่มีการหมุนด้วยความเร็วรอบสูง ในการออกแบบแบร์ริงแม่เหล็กมีจุดประสงค์เพื่อลดข้อบกพร่องของ Journal – Bearing หรือ Ball Bearing และช่วยเพิ่มความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งานเมื่อเปรียบเทียบการทำงานระหว่างระบบแบร์ริงทั่วไปกับระบบแบร์ริงแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าระบบแบร์ริงแม่เหล็ก มีข้อได้เปรียบที่เป็นประโยชน์สำคัญคือ การสัมผัสของเครื่องจักรระหว่างแบร์ริงกับโรเตอร์และการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าน้อย สามารถลดการสึกหรอเครื่องจักรโดยไม่จำเป็นต้องมีสารหล่อลื่น ทำให้สามารถยืดอายุการทำงานของเครื่องจักรได้ ประสิทธิภาพการทำงานในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และสามารถทำงานที่ความเร็วสูง ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้การควบคุมการทำงานของแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นนั้นมีความซับซ้อนและมีความยุ่งยาก จึงทำให้ชุดควบคุมระบบแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นมีราคาแพง และยังไม่นิยมนำแพร่หลายมากนัก โดยเฉพาะในประเทศไทย โดยทั่วไปแล้วสามารถจำแนกแบร์ริงแม่เหล็กตามการกระตุ้น ออกเป็น 2 ลักษณะคือ แบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น (Active Magnetic Bearing) จะประกอบด้วยการควบคุมป้อนกลับไปยังแม่เหล็ก โดยการควบคุมกระแส ส่วนแบร์ริงแม่เหล็กแบบไม่กระตุ้น (Passive Magnetic Bearing) จะไม่มีการควบคุมการป้อนกลับ โดยจะปล่อยให้พลังงานค่อยๆลดลงจากการป้อนกระแสเหนี่ยวนำไหลวนเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถควบคุมได้ หรือจำแนกตามการรองรับโหลดได้คือ แบบแนวแกน (Axial หรือ Thrust) และแบบแนวรัศมี (Radial หรือ Journal) เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ จะนำเอาแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นมาใช้เพื่อควบคุมและลดการสั่นที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความไม่สมดุลจากการหมุน (Rotating Unbalance) ของเพลลาที่ปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น



## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาและออกแบบแบร์ิ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลรองรับด้านเดียว โดยการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบร์ิ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล เพื่ออธิบายการตอบสนองทางพลวัตและลดการสั่นของเพลลา

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 แบร์ิ่งแม่เหล็กเป็นแบบกระตุ้น 4 โพล
- 1.3.2 แบร์ิ่งแม่เหล็กเป็นแบบแนวรัศมี
- 1.3.3 ระบบที่ใช้ทดสอบ เป็นชุดเพลลาขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ซึ่งปลายด้านหนึ่งรองรับด้วยแบร์ิ่งแบบทั่วไปและปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบร์ิ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ออกแบบระบบแบร์ิ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลและชุดขับเคลื่อนเพลลา
- 1.4.2 ลดการสั่นของเพลลา ซึ่งใช้หลักการ Switching Relay ON/OFF เพื่อควบคุมแบร์ิ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น และออกแบบตัวควบคุมเพื่อชดเชยเฟสรวมถึงตัวควบคุมแบร์ิ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแยกควบคุมแกน  $x$  และ  $y$
- 1.4.3 วิเคราะห์การสั่นของเพลลาที่เกิดจากความไม่สมดุลในกรณีที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบร์ิ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถออกแบบระบบแบร์ิ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลเพื่อใช้ควบคุมการสั่นของเพลลาได้
- 1.5.2 อธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ของเพลลาในกรณีที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบร์ิ่งแบบทั่วไปและอีกข้างหนึ่งรองรับด้วยแบร์ิ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล
- 1.5.3 เป็นแนวทางในการประยุกต์เอาระบบแบร์ิ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นมาใช้เพื่อควบคุมการสั่น
- 1.5.4 เพิ่มพูนความรู้และทักษะในทางวิศวกรรม และสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อใช้ประโยชน์ในทางวิชาการและภาคอุตสาหกรรม

## 1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการทำงาน โครงสร้างพื้นฐานของแม่เหล็กแบบกระตุ้น ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้าและการสั่นที่เกิดจากการหมุน วิธีการประมาณค่าแบบจำลองและการควบคุมสัญญาณ รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแม่เหล็กแบบกระตุ้น รวมถึงชุดทดสอบการสั่น พร้อมทั้งสรุปผล

บทที่ 4 กล่าวถึงการประมาณค่าแบบจำลอง ระบบควบคุมทั้งขนาดและมุมเฟส รวมถึงการจำลองสถานการณ์ พร้อมทั้งสรุปผล

บทที่ 5 การทดสอบการควบคุมเพื่อลดการสั่นของเพลาด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลรองรับด้านเดียว

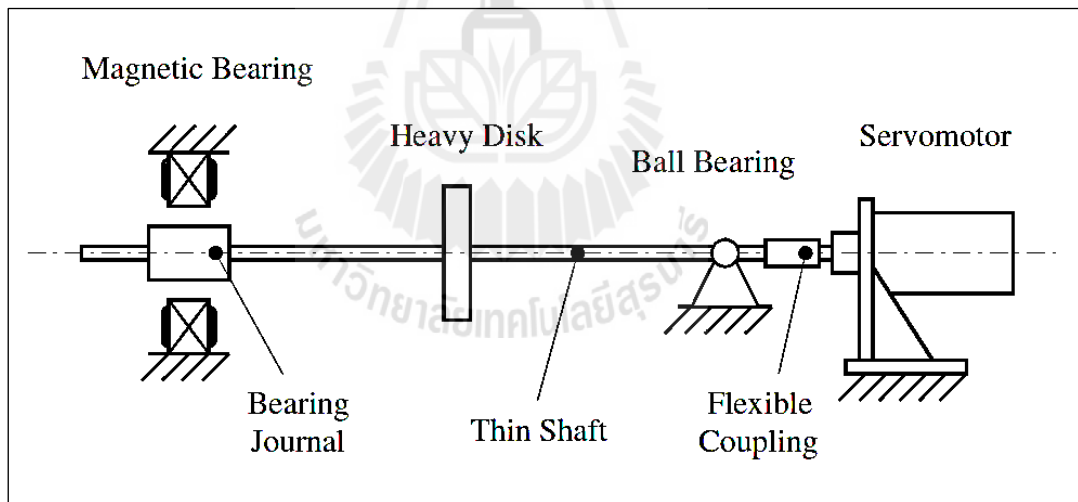
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ



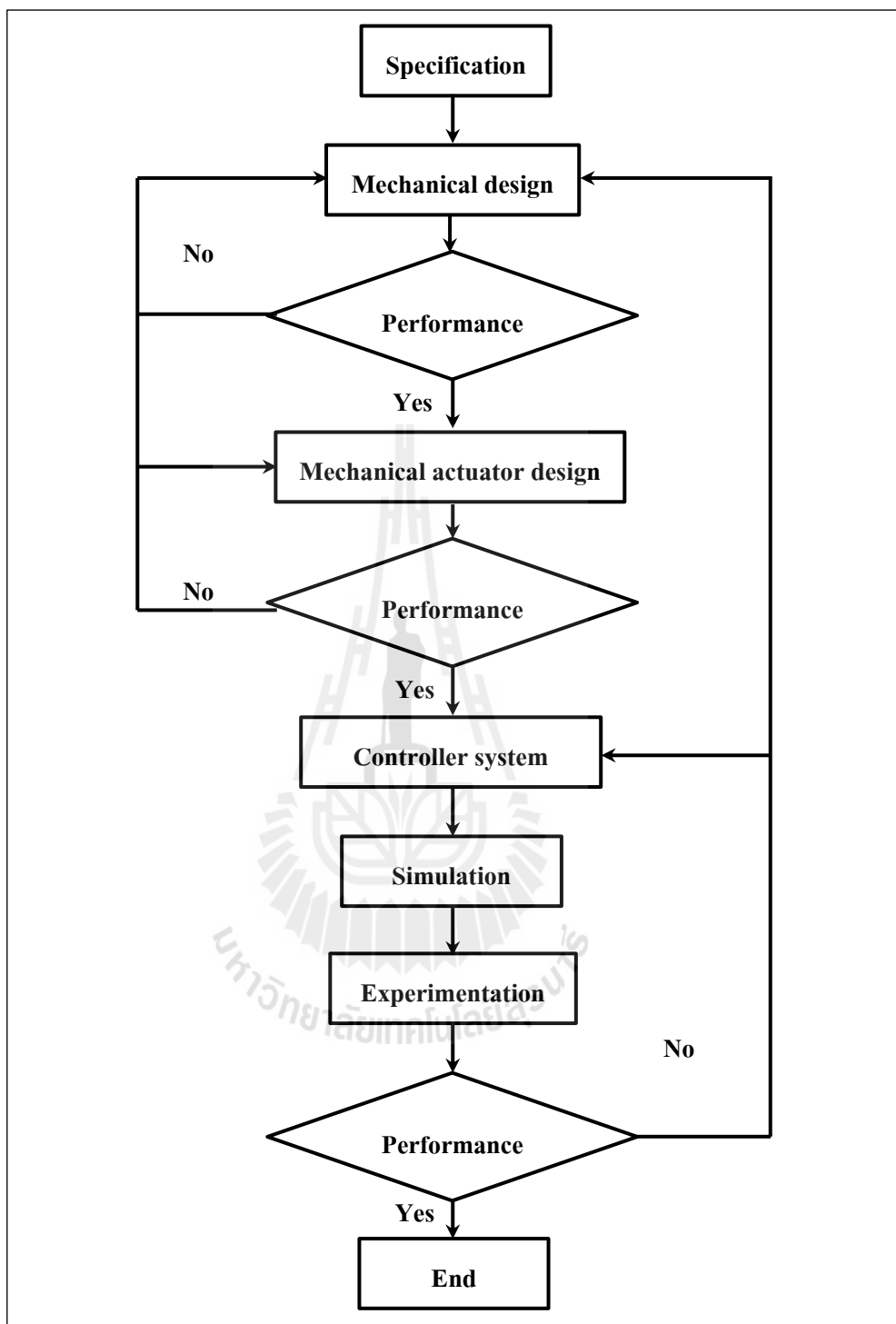
## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์และควบคุมการสั่นของเพลสามารถทำได้หลายวิธี ในบทความนี้ นำเอาแม่เหล็กแบบกระตุ้นมาใช้เพื่อควบคุมและลดการสั่นที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความไม่สมดุลจากการหมุน โดยการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแม่เหล็กแบบทั่วไปและปลายอีกข้างหนึ่งรองรับด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ดังรูปที่ 2.1 เพื่ออธิบายการตอบสนองทางพลวัตและลดการสั่นของเพล ซึ่งหลักการในการออกแบบจะใช้แม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ซึ่งควบคุมโดยใช้หลักการ Switching Relay ON/OFF กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเพื่อควบคุมแม่เหล็กแบบกระตุ้น และออกแบบตัวชดเชยเพื่อชดเชยเฟสรวมถึงตัวควบคุมขนาดของแรงแม่เหล็กแบบกระตุ้น โดยการใช้การแยกควบคุมแกน  $x$  และ  $y$



รูปที่ 2.1 แบบจำลองที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแม่เหล็กแบบทั่วไปและข้างหนึ่งรองรับด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงกระบวนการออกแบบของระบบแม่เหล็ก

รูปที่ 2.2 คือแผนภาพแสดงกระบวนการออกแบบของระบบแม่เหล็ก ซึ่งเริ่มต้นด้วยการตั้งเงื่อนไขว่าจะเป็นแม่เหล็กในลักษณะใด แบบแนวแกนหรือแนวรัศมีรายละเอียดต่าง ๆ

เกี่ยวกับแบริ่งแม่เหล็ก รวมถึงขอบเขตความสามารถในการทำงาน ต่อไปเป็นออกแบบและจัดทำขึ้น ด้วยความสามารถของเครื่องมือที่สามารถทำได้ เมื่อเสร็จแล้วจะทำการตรวจสอบว่าตรงตามเงื่อนไข หรือขอบเขตที่ได้ระบุไว้หรือไม่ ถ้าไม่ก็ทำการออกแบบและจัดทำใหม่ แต่ถ้าตรงตามเงื่อนไขก็ จะทำออกแบบระบบสำหรับเครื่องมือวัดเพื่อทำการเก็บค่าสัญญาณต่าง ๆ ที่ต้องการแล้วทำ การตรวจสอบระบบทั้งหมดอีกครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าระบบแบริ่งแม่เหล็กที่ได้ออกแบบ จัดทำ และ การเก็บค่าสัญญาณ สามารถทำงานตรงตามจุดประสงค์ที่ได้วางไว้ หลังจากนั้นจะเป็นส่วนของ ระบบควบคุม ซึ่งเป็นการออกแบบระบบควบคุมตามหลักการและทฤษฎีการควบคุมต่าง ๆ เมื่อออกแบบเสร็จ ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการจำลองสถานการณ์ในการควบคุม ต่อมาเป็นการทดลอง การควบคุมแบริ่งแม่เหล็กว่ามีประสิทธิภาพในการควบคุมตามจุดประสงค์หรือไม่ ถ้าไม่ก็ ทำการออกแบบแบริ่งแม่เหล็กใหม่หรือไม่ก็ออกแบบตัวควบคุมใหม่ ก็เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการออกแบบระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น

## 2.1 แบริ่งแม่เหล็กไฟฟ้า

แบริ่งแม่เหล็ก (Magnetic Bearings) จะสร้างแรงกระทำโรเตอร์ไม่ให้สัมผัสกับแบริ่ง แม่เหล็กด้วยการใช้แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics) กระแสจากการพันรอบแกนเหล็กและ จำนวนรอบในการพัน ให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force;  $mmf$ ) ดังนั้น ความสามารถในการเป็นแม่เหล็ก (Permeability) สูงในวัสดุสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) เป็นสารแม่เหล็กสูง นำมาทำแม่เหล็กถาวร (ได้แก่ แมกเนไทต์ เหล็ก นิกเกิล) ซึ่งแสดงโดย เส้นฟลักซ์ข้ามผ่านช่องว่างมายัง โรเตอร์ ซึ่งก็ยังมีการรบกวน (Distributed) ในช่องว่าง โดยขึ้นกับความหนาแน่นฟลักซ์ เป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กที่สูง อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่น ฟลักซ์อยู่ในช่วง 1.7 – 2 Tesla ใน Silicon Steel ทั่วไป ดังนั้นจึงนิยมใช้วัสดุสารเฟอร์โรแมกเนติก ใช้ทำโรเตอร์ (Rotor) หรือเพลา (Shaft) ความแข็งแรงของแรงนั้นสามารถควบคุมด้วยตัวควบคุม กระแสในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า และเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบหาระยะช่องว่างที่เป็นไปได้ซึ่ง จะช่วยลดการป้อนกระแสและการสูญเสีย

ซึ่งจะอธิบายโดยสังเขป ทั้งคุณสมบัติของแม่เหล็ก ข้อกำหนดหรือสมมุติฐานเบื้องต้น ความหมายและคำจำกัดความต่าง ๆ ผลกระทบของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) คือสนามแม่เหล็กในช่องว่างใด ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยแรงทางกล (Mechanical Force) และการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Electrical Induction) ผลกระทบทั้งสองสามารถวัดความเข้มของ สนามแม่เหล็กได้ ในส่วนของสนามแม่เหล็ก คือ Lorentz Force จะตั้งฉากกับความเร็ว การเปลี่ยนแปลงประจุ  $Q$  กับเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  (ความเหนี่ยวนำแม่เหล็กหรือ

ความหนาแน่นฟลักซ์) ดังสมการที่ 2.1 มีความหมายว่า ความหนาแน่นฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก (Tesla =  $N/A \cdot m$ ) เมื่อแรง 1 นิวตัน กระทำให้เกิดการนำกระแส 1 A และ 1 m

$$\vec{f} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

และการที่เหล็กส่งอำนาจแม่เหล็กออกมารอบตัวมันเอง มีทิศทางพุ่งจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ โดยเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux) ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมด  $\Phi$  ที่ผ่านพื้นที่ผิว  $A$  คือการ Integral ของความหนาแน่นฟลักซ์ตลอดพื้นที่ผิว

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

สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field),  $H$  สร้างโดยการเปลี่ยนแปลงกระแส เกิดการสลับไปมา ของสนามไฟฟ้า การเกิดสนามแม่เหล็กสมมาตร โดยรอบของตัวนำเมื่อป้อนกระแส  $i$  ดังนั้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กหาจากความหนาแน่นกระแสเทียบกับกึ่งกลางการพันรอบตัวนำ

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = Ni \quad (2.3)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนรอบของการพันขดลวด  $i$  คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดและ  $\vec{s}$  คือความยาวเส้นฟลักซ์ โดย  $Ni = mmf$  คือแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force) เป็นพลังงานรูปหนึ่งที่ใช้ในการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กให้วิ่งรอบวงจรแม่เหล็กหนึ่งรอบ หรืออาจพิจารณาว่าเป็นความสามารถในการทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดใดขดลวดหนึ่ง ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวด กับจำนวนรอบของขดลวดนั้น และความสัมพัทธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นฟลักซ์ คือ

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

$\mu = \mu_0 \mu_r$  คือ Permeability หรือ ค่าบ่งบอกคุณสมบัติของสารแม่เหล็กแต่ละชนิดที่ยอมให้เกิดสนามแม่เหล็กได้มากหรือน้อย  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$  ( $V \cdot s / A \cdot m$ ) คือ Permeability

ของอากาศ  $\mu_r$  คือ Relative Permeability หรือค่าความซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ของสารตัวกลาง ( $\mu_r$  ของเหล็กอยู่ในช่วง 1,000 – 10,000 และ  $\mu_r$  ของอากาศมีค่าประมาณ 1)

$$\Phi = B_{fe} A_{fe} = B_a A_a \quad (2.5)$$

โดยสมมติให้  $\Phi$  มีค่าคงที่รอบวงแม่เหล็กซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศ ( $A_{fe} = A_a$ ) ดังนั้น  $B_{fe} = B_a = B$

การเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance;  $L$ ) คือองค์ประกอบที่ไม่สามารถรับและคายพลังงานได้ตลอดช่วงเวลา โดยพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำจะสะสมอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็ก และอธิบายอยู่ในเทอมของกระแสไฟฟ้า จากกฎของ Faraday's Law สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (Induced Voltage) ในแต่ละรอบของขดลวดซึ่งขดลวดมีจำนวน  $N$  รอบ ก็คือ

$$v(t) = N \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง (Flux Linkage) ซึ่งจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่จำนวนรอบ  $N$  รอบ  $N\Phi(t)$  นั้นขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด คือ  $\lambda = N\Phi = Li$  ดังนั้น

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (2.7)$$

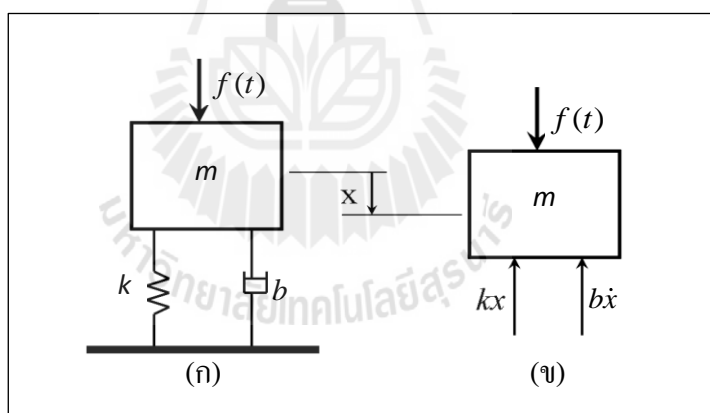
แสดงให้เห็นว่าค่า  $L$  จะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับค่ากระแส แต่ค่า  $L$  จะมีค่าแปรผันตรงกับค่า  $N^2$  และแปรผกผันกับค่า  $l$  ดังนั้นสามารถออกแบบค่า  $L$  ได้ตามต้องการ เช่น ถ้าต้องการค่า  $L$  เปลี่ยนแปลงมากก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด แต่ถ้าต้องการค่า  $L$  เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ก็เปลี่ยนระยะช่องว่างอากาศให้มากขึ้น

## 2.2 การสั่นแบบบังคับ

ระบบที่มีการสั่นแบบบังคับโดยทั่วไปจะอยู่ภายใต้แรงกระทำ โดยที่แรงเหล่านี้จะเป็นฟังก์ชันกับเวลา ซึ่งมีอยู่ในระบบต่าง ๆ เช่น แรงกระแทก (Impact) แรงแบบสุ่ม (Random) หรือแรงแบบฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) เป็นต้น สำหรับแรงแบบฮาร์โมนิกส์นี้ถือว่าเป็นแรงพลวัตที่พบเห็นได้มากในระบบที่มีการสั่นในทางวิศวกรรม ซึ่งจะพบแรงลักษณะนี้ในเครื่องจักรหรือกลไกที่มีการหมุน

โดยปกติแล้วการตอบสนองของระบบจะประกอบไปด้วยสองส่วน คือ การตอบสนองชั่วคราว (Transient Response) และการตอบสนองในสถานะคงตัว (Steady – State Response) ซึ่งจะคงอยู่ตลอดเท่าที่มีแรงกระทำ เนื่องจากการตอบสนองชั่วคราวจะหายไปเมื่อเวลาผ่านไปพอสมควร การตอบสนองจะคงอยู่เพียงการตอบสนองในสถานะคงตัวของระบบ จากแผนภาพวัตถุอิสระในรูปที่ 2.3(ข) จะได้สมการการเคลื่อนที่ คือ

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = f(t) \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.3 ระบบมวลสปริงตัวหน่วงภายใต้แรงกระทำ (ก) แบบจำลองของระบบ  
(ข) แผนภาพวัตถุอิสระของระบบ

แรงที่กระทำกับระบบเป็นแรงฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Force) ดังนั้นแรงดังกล่าวกำหนดให้เป็น

$$f(t) = F_0 \sin \omega t \quad (2.9)$$



โดยที่  $F_0$  เป็นขนาดของแรง และ  $\omega$  เป็นความถี่ฮาร์โมนิกส์ จากสมการที่ (2.8) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = f(t) \quad (2.10)$$

หรือเขียนให้อยู่ในโดเมนความถี่เชิงซ้อน โดยกำหนดให้มีสถานะเริ่มต้นเป็นศูนย์ (Zero Initial Condition) หรือ  $x(t=0)=0$  และ  $\dot{x}(t=0)=0$  จะได้

$$[s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2]X(s) = \frac{1}{m}F(s) \quad (2.11)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้

$$X(s) = K \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} F(s) \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$K = \frac{1}{m\omega_n^2} \quad (2.13)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูป

$$X(s) = G(s)F(s) \quad (2.14)$$

นิยามให้  $G(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) จากสมการที่ (2.12) ฟังก์ชันถ่ายโอนจะมีค่า

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.15)$$

ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับสอง (Second Order System) หากอินพุตหรือแรงที่กระทำต่อระบบเป็นแรงฮาร์โมนิกส์ เช่นสมการที่ (2.16) ผลการตอบสนองของระบบที่สถานะคงตัว คือ

$$x(t) = F_0 |G(j\omega)| \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.16)$$

โดยที่

$$X = F_0 |G(j\omega)| \quad (2.17)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอน (2.15) เมื่อจัดให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน ส่วนจริง (Real Part; Re) และส่วนจินตภาพ (Imaginary Part; Im) ของฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวสามารถหาได้จาก

$$\text{Re}(\omega) = \frac{K[1 - (\omega / \omega_n)^2]}{[1 - (\omega / \omega_n)^2]^2 + [2\zeta(\omega / \omega_n)]^2} \quad (2.18)$$

และ

$$\text{Im}(\omega) = -\frac{2K\zeta(\omega / \omega_n)}{[1 - (\omega / \omega_n)^2]^2 + [2\zeta(\omega / \omega_n)]^2} \quad (2.19)$$

ดังนั้นขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ

$$|G(j\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)} \quad (2.20)$$

จะได้

$$|G(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_n)^2]^2 + [2\zeta(\omega / \omega_n)]^2}} \quad (2.21)$$

และมุมเฟสที่เปลี่ยนไป (Phase Shift) ของเอาต์พุตหรือผลการตอบสนองของระบบ คือ

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)} \right) \quad (2.22)$$

หรือเท่ากับ

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \right) \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.17) (2.21) และ (2.23) จะได้ผลการตอบสนองของระบบภายใต้แรงฮาร์โมนิกส์ คือ

$$x(t) = F_0 \frac{K}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \sin \left( \omega t + \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1-r^2} \right) \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (2.25)$$

ดังนั้น ระบบจะมีแอมพลิจูดการสั่นเท่ากับ

$$X = F_0 \frac{K}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.26)$$

เมื่อนิยามให้การขจัดสถิต (Static Deflection;  $\delta_{st}$ ) มีค่า

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{K} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.26) อัตราส่วนขนาด (Amplitude Ratio) หรือแฟกเตอร์ขยาย (Magnification Factor) ของระบบ คือ

$$\frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{\sqrt{[1-(r)^2]^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.28)$$

### 2.3 ความไม่สมดุลจากการหมุน

ที่มาของปัญหาการสั่นทางกลส่วนมากที่เกิดขึ้นนั้น เพราะเครื่องจักรต้นกำลังที่มีใช้งานในภาคอุตสาหกรรมจำนวนมาก เป็นเครื่องจักรหมุน (Rotating Machine) เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าต่าง ๆ เครื่องจักรเทอร์โบ เครื่องยนต์ เป็นต้น

ความไม่สมดุลของการหมุนของเครื่องจักรทำให้เกิดแรงสั่นแบบบังคับกระทำต่อระบบขึ้น ความไม่สมดุลอาจเกิดขึ้นจากการประกอบส่วนของเครื่องจักรไม่ได้ตามที่กำหนด หรือขนาดของส่วนประกอบเครื่องจักรไม่เป็นไปตามที่กำหนด ซึ่งนำไปสู่การสั่นทางกล จากแผนภาพแบบจำลอง ความไม่สมดุลของการหมุน ดังแสดงในรูปที่ มวลไม่สมดุล  $m$  ระยะจากศูนย์กลางการหมุนถึงมวลไม่สมดุลเท่ากับ  $e$  เมตรและ  $\omega_r$  ความถี่ของเครื่องจักรหมุน ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละแกนคือ

$$ma_x = -me\omega_r^2 \sin \omega_r t \quad (2.29)$$

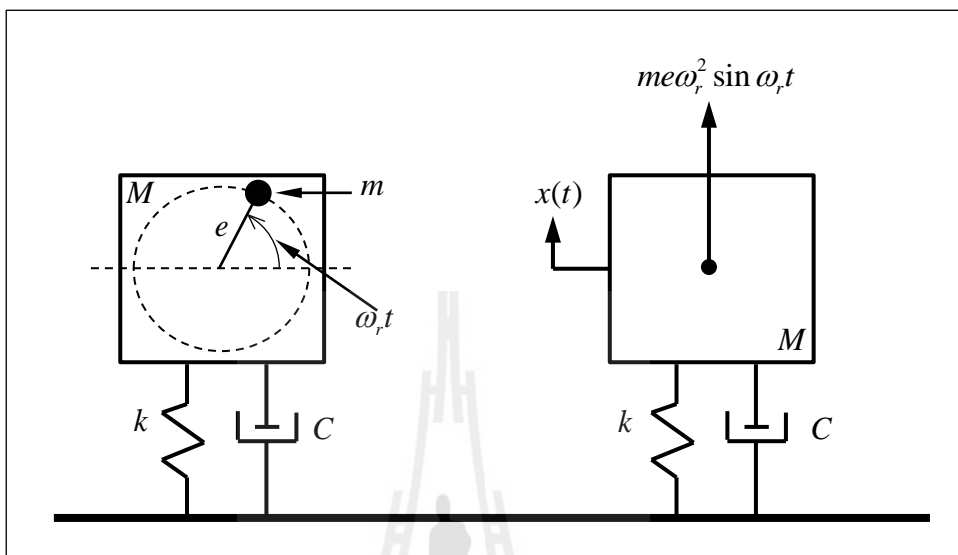
และ

$$ma_y = -me\omega_r^2 \cos \omega_r t \quad (2.30)$$

ถ้าเราพิจารณาผลรวมของแรงในแนวแกนตั้ง (x) ดังรูปที่ 2.4 จะได้สมการการเคลื่อนที่ คือ

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = me\omega_r^2 \sin \omega_r t \quad (2.31)$$

เราพบว่าขนาดของแรงที่กระทำเนื่องจากความไม่สมดุลในการหมุนของเครื่องจักร จะเท่ากับ  $m\omega_r^2$  และจะเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงที่กระทำตามความเร็วรอบการหมุนของเครื่องจักร ดังนั้นผลเฉลยของสมการที่ (2.31) ที่สถานะคงตัว จะมีผลเฉลยเฉพาะคือ



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของระบบที่มีการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากความไม่สมดุลในการหมุนและแผนภาพวัตถุอิสระของระบบ

$$x(t) = X \sin(\omega_r t - \alpha) \quad (2.32)$$

$$\text{โดยที่ } r = \frac{\omega_r}{\omega_n} \text{ และ } X = \frac{me}{M} \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}, \alpha = \tan^{-1} \left( \frac{2\zeta r}{1-r^2} \right)$$

ซึ่งเราจะได้ความสัมพันธ์ ระหว่างขนาดการสั่นที่เกิดขึ้นกับอัตราส่วนความถี่ คือ

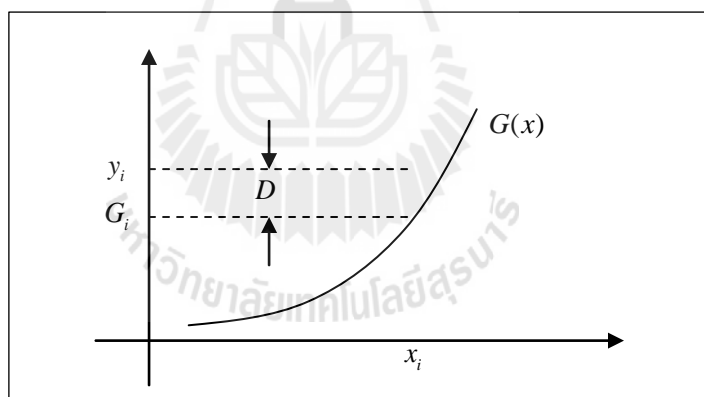
$$\frac{MX}{me} = \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.33)$$

## 2.4 การประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Least Squares Method)

การประมาณค่าฟังก์ชันโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้ฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของข้อมูล เพราะได้จากการเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้เหลือน้อยที่สุด ดังนั้น เมื่อเขียนเส้นกราฟของฟังก์ชัน เส้นกราฟจะผ่านไปบริเวณจุดต่าง ๆ ของข้อมูล โดยจะตัดผ่านจุดของข้อมูลบางจุด หลักการของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดมีดังนี้ ถ้ามีข้อมูล  $x, y$  ทั้งหมด  $n$  ชุด ให้ฟังก์ชันที่ประมาณค่าของข้อมูลชุดนี้เป็น  $G(x)$  โดยที่  $G(x)$  อยู่ในรูป

$$G(x) = a_1g_1(x) + a_2g_2(x) + \dots + a_mg_m(x) \quad (2.34)$$

โดยที่  $m \leq n$  และ  $g_1(x), g_m(x)$  เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับค่า  $x$  อาจอยู่ในรูปพหุนาม รูปสี่เหลี่ยมคางหมู หรือเอ็กโปเนนเชียล สมการ (2.34) จะสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อทราบค่า  $a_1, a_2, \dots, a_m$  โดยหาค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ได้จากการทำให้ค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลกับค่าประมาณที่ได้จากฟังก์ชัน  $G(x)$  มีค่าน้อยที่สุด จากรูปที่ 2.5 ค่าแตกต่างของข้อมูลชุดที่  $i$  คือ  $y_i - g_i(x)$  เมื่อหาค่าแตกต่างของข้อมูลทุกชุดแล้ว นำค่าแตกต่างเหล่านี้มารวมกัน แล้วยกกำลังสองเพื่อขจัดเครื่องหมายลบจะได้



รูปที่ 2.5 แสดงการหาค่าเบี่ยงเบนของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

$$D = \sum_{i=1}^n [y_i - G(x_i)]^2 \quad (2.35)$$

ค่าสัมประสิทธิ์  $a_1, a_2 \dots a_m$  จะเป็นตัวแปรเพราะเมื่อค่าเหล่านี้มีค่าต่าง ๆ กัน ฟังก์ชัน  $G(x)$  จะเป็นฟังก์ชันที่แตกต่างกันออกไป แต่ต้องการหาค่า  $a_1, a_2 \dots a_m$  เหล่านี้ที่มีเงื่อนไขทำให้เกิดค่า  $D$  ที่มีค่าน้อยที่สุดจาก จะได้สมการออกมา  $m$  ชุด สามารถหาค่า  $a_1, a_2 \dots a_m$  ได้

$$\frac{\partial D}{\partial a_1} = 0, \frac{\partial D}{\partial a_2} = 0, \dots, \frac{\partial D}{\partial a_n} = 0$$

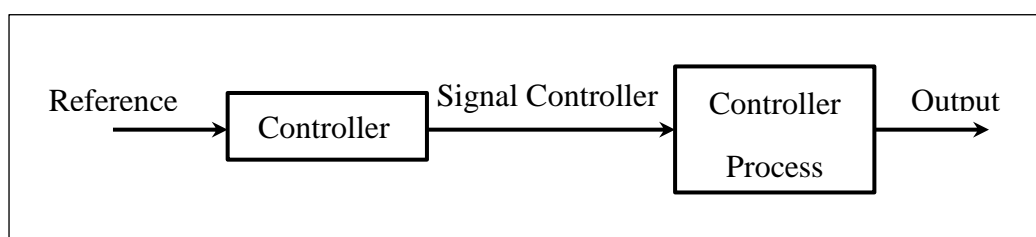
## 2.5 การควบคุมระบบ

ในปัจจุบันนี้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีมากมายนัก ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดในชีวิตประจำวันได้แก่ระบบควบคุมในเครื่องปรับอากาศซึ่งจะคอยควบคุมอุณหภูมิภายในห้องให้คงที่ ในอุตสาหกรรมได้มีการนำระบบควบคุมอัตโนมัติไปใช้ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ควบคุมการทำงานของเครื่องจักร และอื่น ๆ อีกมากมาย เทคโนโลยีทางด้านอวกาศและการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์ก็ได้มีการนำระบบควบคุมไปใช้ในระบบนำวิถี ระบบควบคุมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เป็นต้น

### 2.5.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ

#### (Open - loop Control Systems, Nonfeedback Control Systems)

ระบบควบคุมพื้นฐานที่กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้วเป็นระบบควบคุมแบบวงเปิด ในระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้การควบคุมส่วนใหญ่ต้องอาศัยการคาดคะเนและการตัดสินใจของมนุษย์ ตัวอย่างเช่น การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องโดยเตาผิง ถ้าเตาผิงที่ใช้มีเพียงอุปกรณ์ตั้งเวลาเปิด - ปิดเท่านั้น ผู้ใช้หรือผู้ควบคุมจะต้องคาดคะเนและตั้งเวลาในการเปิดเตาผิงที่นานพอเหมาะเพื่อให้อุณหภูมิห้องอยู่ในระดับที่ต้องการ แต่การควบคุมโดยมนุษย์เช่นนี้จะไม่แม่นยำและน่าเชื่อถือนัก เนื่องจากผู้ควบคุมไม่สามารถรู้ถึงคุณสมบัติเฉพาะในการสร้างความร้อนของเตาผิงนี้ อีกทั้งยังมีปัจจัยต่าง ๆ จากภายนอก เช่น อุณหภูมิภายนอกห้องที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในห้อง จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้ไม่สามารถปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงของระบบอันเนื่องมาจากปัจจัยจากภายนอกได้



## รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมแบบวงเปิด

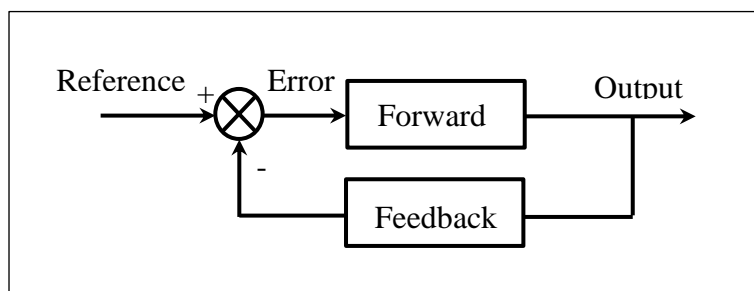
รูปที่ 2.6 แสดงแผนผังของระบบควบคุมแบบวงเปิด โดยสัญญาณอินพุตหรือสัญญาณตั้งการหรือสัญญาณอ้างอิงส่งผ่าน Controller ออกมาเป็นสัญญาณกระตุ้นหรือสัญญาณควบคุมเพื่อส่งให้ Controlled Process ขับเอาต์พุตที่ต้องการออกมา

### 2.5.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

#### (Closed – loop Control Systems, Feedback Control Systems)

จากหัวข้อที่แล้วจะเห็นว่าเมื่อปัจจัยภายนอกออกมามีอิทธิพลต่อระบบจะทำให้ผู้ควบคุมไม่สามารถควบคุมเอาต์พุตให้เป็นไปตามต้องการได้ ในหัวข้อนี้ได้แก้ไขโดยการส่งสัญญาณเอาต์พุต  $c(t)$  ป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณตั้งการหรือสัญญาณอ้างอิงจะทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอ้างอิงทางด้านอินพุตเพื่อนำไปสร้างสัญญาณกระตุ้นและส่งต่อไปแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของเอาต์พุตให้น้อยลง ระบบที่กล่าวมานี้เรียกว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับ กิจกรรมส่วนใหญ่ที่มนุษย์ปฏิบัติในชีวิตประจำวันนั้นเป็นตัวอย่างหนึ่งของระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ซับซ้อน

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ จากหลักการพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถกล่าวได้ว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับประกอบด้วยเส้นทางหรือวงรอบของสัญญาณป้อนกลับซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุต ตั้งแต่หนึ่งวงรอบขึ้นไป แล้วนำสัญญาณป้อนกลับนี้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณตั้งการหรือสัญญาณอ้างอิงจะได้ผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองเป็น Error เพื่อนำไปควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าตามที่กำหนดโดยสัญญาณอ้างอิง



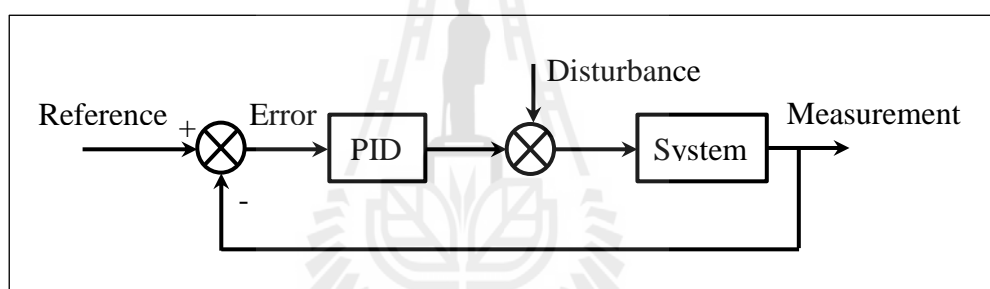
รูปที่ 2.7 ตัวควบคุม PID ที่ต่อเข้าควบคุมแบบอนุกรม



รูปที่ 2.7 แสดงแผนผังของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ระบบควบคุมนี้ประกอบด้วยส่วน Forward (Forward Path) ส่วนป้อนกลับ (Feedback Path) และส่วนตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อน (Error – Sensing Device) ส่วนตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะเปรียบเทียบค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับค่าสัญญาณเอาต์พุตจริง ๆ หรือค่าที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณเอาต์พุต แล้วส่งสัญญาณที่เกิดจากผลต่างของสัญญาณทั้งสองนี้ออกไป

## 2.6 คุณสมบัติของตัวควบคุม

ในระบบควบคุมมีตัวควบคุมหลายชนิด ตัวควบคุมส่วนใหญ่ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ เป็นแบบ PID โดยต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.8 สัญญาณออกจากตัวควบคุม PID สามารถบรรยายได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 ตัวควบคุม PID ของระบบวงปิด

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.36)$$

โดยที่  $u(t)$  คือสัญญาณควบคุม  $e(t)$  คือค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณออกจากค่ากำหนด ตัวควบคุม PID ประกอบไปเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ แบบสัดส่วน (Proportional; P) แบบอินทิกรัล (Integral; I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative; D) แต่ละแบบสามารถนำมาประกอบกัน เพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการ ตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน ( $K_p$ ) ค่า Integral Time ( $T_i$ ) และ Derivative Time ( $T_d$ ) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละแบบมีดังนี้

### 2.6.1 การควบคุมแบบสัดส่วน

การควบคุมแบบสัดส่วนเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการคือสัญญาณควบคุม  $u(t)$  จากตัวควบคุมที่ส่งไปปรับกระบวนการมีค่าเป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.37)$$

โดยที่  $K_p$  คือค่าอัตราขยายและ  $e(t)$  □ ความคลาดเคลื่อน = ค่ากำหนด - ค่าวัด

### 2.6.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล

ผลตอบของการควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับการควบคุมแบบอินทิกรัล สามารถอธิบายได้ในสมการ

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (2.38)$$

เมื่อ  $K_p$  คือค่าอัตราขยายและ  $e(t)$  คือความคลาดเคลื่อน และ  $T_i$  คือ Integral Time (วินาที)

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ความแตกต่างอยู่ตรงที่เทอมไบแอส นั่นคือตัวควบคุมแบบสัดส่วนถูกจำกัดด้วยส่วนไบแอสเป็นค่าคงที่ ส่วนการควบคุมแบบอินทิกรัล มีการสะสมความคลาดเคลื่อนในการปรับแต่งไบแอส (นั่นคือ ทำหน้าที่เป็นตัวอินทิกรัล) และจะหยุดสะสมเมื่อความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นศูนย์ เมื่อผลตอบเข้าที่สมบูรณ์แล้ว เทอมไบแอสของระบบจะมีค่ามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวน (Disturbance) การทำงานในลักษณะเช่นนี้มีลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันรีเซตด้วยมือ (Manual – Reset Function) ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกตัวอินทิกรัลว่าฟังก์ชันรีเซต (Reset Function)

คุณสมบัติของตัวอินทิกรัลในการกำจัดความคลาดเคลื่อน (หรือออฟเซต) เป็นข้อดีอย่างมาก จึงเป็นที่นิยมใช้กับระบบควบคุมป้อนกลับ อย่างไรก็ตาม ตัวอินทิกรัลก็มีข้อเสีย นั่นคือทำให้เกิดการล่าช้า (Capacity – Like Lag) และทำให้ช่วงเวลาของการแกว่งยาวนานขึ้นโดยทั่วไป ระบบแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล จะมีช่วงเวลาของการแกว่งนานกว่าระบบเชิงสัดส่วนอย่างเดียว 50% หรือ  $T_{PI} = 1.5T_p$  สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (Time Constant) น้อย (เช่น ระบบควบคุม

อัตราการไหล) ปัญหานี้จะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก (เช่น ระบบควบคุมระดับ) ปัญหานี้อาจมีผลมาก จนทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมสัดส่วนตรงผลกระทบของการเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม หากอัตราขยายมีค่ามากเกินไปจะทำให้ผลตอบของระบบมีการแกว่ง โดยทั่วไป Integral Time ( $T_i = 1/K_i$  sec โดยที่  $K_i = \text{repeats/sec}$ ) เป็นตัวแสดงว่าอัตราการตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณการควบคุมค่า  $T_i$  ที่น้อยกว่า จะทำให้ตัวควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วกว่าในระยะเริ่มต้น โดยที่ความคลาดเคลื่อนยังเป็นค่าบวกอยู่ ดังนั้นกว่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์ (ซึ่งทำให้เทอม  $\int_0^t e(t)dt$  หยุดทำงาน) เทอมไบแอสก็จะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ ดังนั้นผลตอบสนองจึงเกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) สูงกว่าค่ากำหนด เป็นผลให้ตัวอินทิกรัลทำหน้าที่ปรับให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง การใช้ตัวอินทิกรัลในการควบคุมควรระวังในเรื่องของความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ (เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำหนดขนาดใหญ่) เพราะจะทำให้เกิดปัญหา Integral Windup ถึงแม้ว่า  $T_i$  มีค่าถูกต้องในสภาวะการทำงานธรรมดา แต่สัญญาณควบคุมอาจถึงจุดอิ่มตัวขณะผลตอบเกิดส่วนพุ่งเกิน

#### ข้อสรุปของตัวควบคุมอินทิกรัล

- ทำหน้าที่คล้ายกับรีเซ็ตด้วยมือ (Manual Reset) เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อน
- มีปัญหาการล่าช้าหลัง ยังผลให้เกิดการหักล้างทางเวลาในตัวควบคุม จึงไม่เหมาะสมกับระบบที่มีค่าคงตัวเวลายาวนาน
- ทำให้ช่วงเวลาในการแกว่งยาวนานขึ้น

ในระบบควบคุม ค่าที่วัดได้และค่ากำหนดควรเป็นค่าเดียวกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวควรเป็นศูนย์ ถ้ามีความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว สัญญาณที่ออกจากอินทิเกรเตอร์ (เพิ่มขึ้น ด้วยอัตราคงที่ เมื่อสัญญาณเข้ามีค่าคงที่) ส่งต่อไปกับวงจรรขยายความคลาดเคลื่อนเป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมทั้งสัดส่วนและอินทิกรัล โดยสัญญาณออกจะมารวมกันที่วงจรรขยายและส่งสัญญาณไปควบคุมระบบตัวควบคุมจะทำให้ค่าที่วัดได้ เพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่ากำหนด นั่นคือทำให้ความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์อย่างไรก็ตาม หาก  $T_i$  มีค่าน้อยลง ผลตอบอาจเกิดการแกว่งได้

### 2.6.3 ตัวควบคุมอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัล ต่างก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการ แต่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้ สามารถรู้ได้ล่วงหน้าโดยพิจารณาจากแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง ตัวอนุพันธ์มีหลักการทำงาน คือ ตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของ

ความคลาดเคลื่อนถึงแม้ว่าความคลาดเคลื่อนมียังค่าเล็กน้อย สัญญาณออกของตัวอนุพันธ์ไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดของความคลาดเคลื่อนแต่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ ตัวอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์ คุณลักษณะข้อนี้มีผลคือตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p \left( e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.39)$$

โดยที่ Derivative Time ( $T_d$ ) เป็นเวลาที่แสดงถึงผลตอบสนองเนื่องจากตัวอนุพันธ์ การเพิ่ม  $T_d$  จะทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับค่าที่วัดได้เท่านั้น แต่ไม่ใช้กับค่ากำหนด เพราะการเปลี่ยนค่ากำหนดมักจะเป็นแบบขั้น (Step) ทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์เป็นพัลส์และทำให้เกิดการกระแทก (Bump) ของอุปกรณ์ในกระบวนการ สำหรับค่ากำหนดใช้เฉพาะกับตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลตัวอนุพันธ์คือตัวควบคุมที่ก่อให้เกิดผลตรงข้ามกับตัวอินทิกรัล ดังนั้นจึงใช้ในการปรับปรุงกระบวนการที่มีการล่าช้าทางเวลา (Time Lag) มาก ๆ ทำให้ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้น และช่วงเวลากว้างที่สั้นลง ข้อเสียของตัวอนุพันธ์คือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนเป็นอย่างมาก เพราะมีผลตอบสนองโดยตรง ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้ดังนั้น แม้สัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็ก แต่ก็อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสัญญาณออกของตัวควบคุม จึงเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวอนุพันธ์ในการควบคุมผลของสัญญาณรบกวน ยิ่งไปกว่านั้นระบบใดที่มีสัญญาณรบกวนมาก จะไม่สามารถใช้ตัวอนุพันธ์ในวงการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้เพียงตัวควบคุม PI เท่านั้น

#### ข้อสรุปของตัวควบคุมอนุพันธ์

- เหมาะสำหรับกระบวนการที่ล่าช้าทางเวลามาก ทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้น
- ถ้า  $T_d$  มากเกินไป ผลของตัวอนุพันธ์จะทำให้ผลตอบสนองไวขึ้นจนกระทั่งระบบอาจขาดเสถียรภาพได้
- ไม่เหมาะกับระบบที่มีตัวแปรกระบวนการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย หรือมีการล่าช้าทางเวลาน้อย เพราะจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ
- ไม่ควรใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนมาก
- ใช้ชดเชยการล่าช้าที่เกิดจากตัวอินทิกรัลด้วยการนำหน้า (Lead) ในตัวอนุพันธ์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดทันที ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างทันที และส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบ ถ้านำอนุพันธ์ของความคลาดเคลื่อนนั้นคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนแล้ว ไปรวมกับสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิเกรเตอร์ จะทำให้การทำงานของระบบดีขึ้น การควบคุมเชิงอนุพันธ์ไม่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว แต่จะลดช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) โดยลดการแกว่งลง

## 2.7 สัญญาณควบคุม

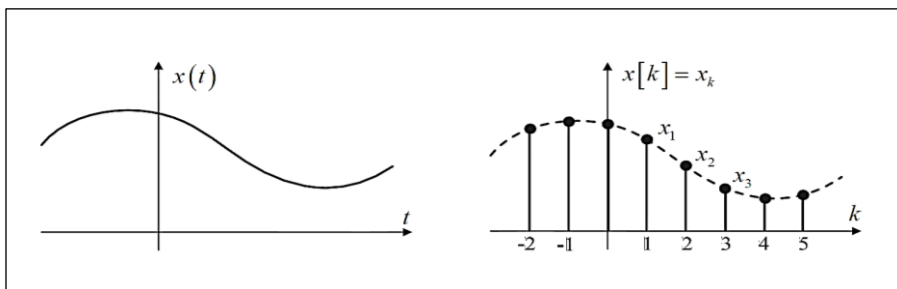
ในทางปฏิบัติสัญญาณที่ใช้งานทั่วไปสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทตามคุณลักษณะของสัญญาณดังต่อไปนี้

### 2.7.1 สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา

1) สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา (Continuous - Time Signal) คือสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องทางเวลาโดยทั่วไปจะใช้สัญลักษณ์  $x(t)$  แทนสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา  $x$  เมื่อ  $t$  คือตัวแปรอิสระที่ต่อเนื่องทางเวลา (นั่นคือตัวแปร  $t$  มีค่าเป็นจำนวนจริง) เพราะฉะนั้นค่าของสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาจึงเป็นสมาชิกของเซตจำนวนจริงหรือเซตอนันต์ (Infinite Set) ตัวอย่างของสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาได้แก่ เสียงพูด สัญญาณภาพ และคลื่นวิทยุ เป็นต้น

2) สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete - Time Signal) คือสัญญาณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องทางเวลา โดยทั่วไปจะใช้สัญลักษณ์  $x[k]$  หรือ  $x_k$  แทนสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา  $x$  เมื่อ  $k$  คือตัวแปรอิสระที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (นั่นคือตัวแปร  $k$  เป็นเลขจำนวนเต็มที่มีค่าจำกัด) ดังนั้นค่าของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาจึงเป็นสมาชิกของเซตจำกัด (Finite Set) ตัวอย่างของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาได้แก่ ดัชนี ตลาดหุ้น ไทย จำนวนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่ผลิตได้ และจำนวนประชากรของประเทศ เป็นต้น รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ในทางปฏิบัติสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา  $x_k$  มักจะได้อมาจากการซัดตัวอย่าง (Sampling) สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา  $x(t)$  ที่ทุกช่วงเวลา  $t = kT_s$  เมื่อ  $k$  เป็นเลขจำนวนเต็ม และ  $T_s$  คือคาบการซัดตัวอย่าง (Sampling Period) โดย  $f_s = 1/T_s$  คือความถี่การซัดตัวอย่าง (Sampling Frequency) ดังนั้นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาที่ได้จากการซัดตัวอย่างสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้คือ

$$x[k] = x_k = x(t) \Big|_{t=kT_s} = x(kT_s) \quad (2.40)$$



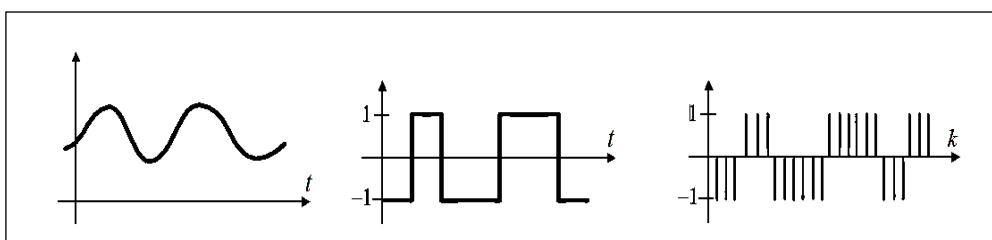
รูปที่ 2.9 สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา

ซึ่งหมายความว่าข้อมูล  $x_k$  แต่ละตัวจะอยู่ห่างกัน  $T_s$  หน่วย ข้อมูลแต่ละตัวของ  $x_k$  จะถูกเรียกว่า “แซมเปิล (Sample)” และแซมเปิลหลาย ๆ แซมเปิลที่เรียงต่อกันเป็นชุดจะเรียกว่า “ลำดับข้อมูล (Data Sequence)” ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\{x_k\}$  สมการ (2.40) แสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา  $x[k]$  สามารถใช้เป็นตัวแทนของสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา  $x(t)$  ได้อย่างสมบูรณ์ ถ้าความถี่การซัดตัวอย่างสอดคล้องกับทฤษฎีบทการซัดตัวอย่าง (Sampling Theorem)

### 2.7.2 สัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล

สัญญาณแอนะล็อก (Analog Signal) คือสัญญาณที่แอมพลิจูด (Amplitude) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องทางเวลา ดังนั้นสัญญาณแอนะล็อกทุกสัญญาณจึงถือว่าเป็นสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา นั่นคือค่าของสัญญาณแอนะล็อกจะเป็นสมาชิกของเซตจำนวนจริง

ในขณะที่สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) คือสัญญาณที่มีแอมพลิจูดหรือค่าของสัญญาณภายในเซตจำกัด ดังนั้นสัญญาณดิจิทัลอาจหมายถึงสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาหรือสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สัญญาณแอนะล็อก สัญญาณดิจิทัลแบบที่ต่อเนื่องทางเวลา  
และสัญญาณดิจิทัลแบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา

## 2.8 เกณฑ์การประเมินสมรรถนะในการควบคุม (Performance Index Criteria)

จุดมุ่งหมายของการออกแบบระบบควบคุมต่าง ๆ นั้น คือการคำนวณหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเหล่านั้น เราอาจตั้งเงื่อนไขอะไรขึ้นมาอย่างหนึ่งและตั้งเป้าหมายของการออกแบบระบบควบคุมเพื่อให้ระบบควบคุมทำงานได้ดีที่สุดตามเงื่อนไขที่ได้ตั้งไว้ นั่นคือเงื่อนไขที่กำหนดให้ในการออกแบบตัวควบคุมที่ดีที่สุด (Optimal Control) เรียกว่า มาตรฐานสมรรถนะ (Performance Index) ซึ่งจะเป็นมาตรฐานที่ชี้ว่าระบบที่ต้องการจะควบคุมทำงานเป็นอย่างไรบ้างตามเป้าหมายที่ตั้งไว้หรือไม่ ค่ามาตรฐานสมรรถนะนี้ บางครั้งจะเรียกว่า ฟังก์ชันต้นทุน (Costing Function) การออกแบบหรือคำนวณหาอัตราขยายของตัวควบคุมด้วยวิธีการนี้จะต้องออกแบบเพื่อให้ได้ค่าส่งควบคุมของระบบนั้นเป็นสัญญาณคำสั่งที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขหรือมาตรฐานสมรรถนะที่กำหนด ซึ่งอาจจะเป็นการหาค่าส่งควบคุมที่ทำให้ค่ามาตรฐานสมรรถนะมีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดก็ได้แล้วแต่กรณี ซึ่งในที่นี้จะใช้ อินทิกรัลของค่าผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time Multiplied Absolute Error; ITAE) ซึ่งมีสมการมาตรฐานดังนี้

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2.41)$$

โดยที่  $e(t)$  เป็นสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณคำสั่งกับสัญญาณเอาต์พุตที่วัดจากระบบที่กำลังควบคุม อย่างไรก็ตามถ้าสัญญาณค่าความผิดพลาด  $e(t)$  นี้ไม่เป็นศูนย์เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  แล้วค่ามาตรฐานสมรรถนะจะมีค่าสูงสุดหรืออาจจะเป็นค่าอนันต์ ทำให้เป้าหมายที่ตั้งไว้ไม่เป็นจริง เป้าหมายของการออกแบบคือต้องการให้มาตรฐานสมรรถนะนี้มีค่าน้อยที่สุด หรือค่า  $e(t)$  จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป บางครั้งอาจจะกำหนดค่าขอบเขตของเวลาเพื่อให้เป้าหมายหรือค่ามาตรฐานสมรรถนะมีความเป็นจริง ดังนั้นขอบเขตของเวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตจะต้องเปลี่ยนจาก  $\infty$  ไปเป็นค่าเวลาสุดท้าย และมีค่ามาตรฐานเทียบสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางมาตรฐานเทียบสัมประสิทธิ์ ITAE

อันดับเทียบสัมประสิทธิ์ ITAE
$s + \omega_n$

$$\frac{s^2 + 1.4\omega_n s + \omega_n^2}{s^3 + 1.75\omega_n s^2 + 2.15\omega_n^2 s + \omega_n^3}$$

## 2.9 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่มีการหมุนหรือเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนไหว โดยอาศัยหลักการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ต่าง ๆ ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในการออกแบบรองลื่นหรือดัดลื่นลูกปืน (Bearing) ให้สามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูง โดยใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมุน ด้วยขีดจำกัดของแบร์ริงที่ต้องใช้สารหล่อลื่น (Lubricants) เป็นส่วนประกอบ ทำให้ไม่สามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูงได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเปลี่ยนไป และอาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการหมุนได้

Matsumura and Yoshimoto (1986) ได้มีการนำเสนอระบบสมการและปัญหาการออกแบบการควบคุมสำหรับเพลาประเภทแนวนอนรองรับระบบแม่เหล็กแบร์ริง โดยจะกล่าวถึงสมการพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์โดยการปรับทฤษฎีทาง Dynamic แก้ปัญหาการลอยตัวและที่มาของระบบสมการการกระจัดและกระแสควบคุม เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแปรสแตต (State Variables) โดยการสร้างรูปแบบปริพันธ์ (Integral - Type) ระบบควบคุม ที่สามารถจะรักษาให้โรเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางในสภาวะคงตัว แต่เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นในการควบคุมทำให้มีการนำเสนอการควบคุมทั้งในส่วนของสัญญาณและตัวควบคุม

Beale, Shafai, LaRocca, and Cusson (1993) กล่าวว่าปัญหาที่พบบ่อยของระบบเครื่องจักรที่มีการหมุนเพลา รวมถึงระบบที่ใช้แบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น คือการสั่นที่เกิดพร้อมกับความไม่สมดุลมวล การชดเชยความสมดุลอัตโนมัติที่เป็นสาเหตุมาจากการกระตุ้น AMB การหมุนของโรเตอร์รอบแกนเฉื่อยและเป็นการประมาณค่าแรงสู่ศูนย์กลางเนื่องจากความไม่สมดุลมวล อย่างไรก็ตาม เพราะความไม่สมดุลการสร้างแบบจำลองที่เกิดขึ้นจากสัญญาณเซนเซอร์ในรูปแบบชานต์ต่ำกว่าช่วงของความถี่ ไม่สามารถใช้วิธีการชดเชยเพื่อลดการสั่นเพื่อรักษาการตอบสนองความถี่ที่ต้องการ การปรับตัวความไม่สมดุลแรง (Adaptive Forced Balancing) ใช้แก้ปัญหานี้ได้และนำไปประยุกต์ใช้กับปลายเดียว ในงานวิจัยนี้จะอธิบายถึงการชดเชยการปรับตัวความไม่สมดุลแรงในกรณีรองรับด้วย AMB ในกรณีอินพุตเดี่ยวเอาต์พุตเดี่ยว (Single Input Single Output) และหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (Multiple Input Multiple Output)

Herzog, Buhler, Gahler, and Larsonneur (1996) ศึกษาความไม่สมดุลแม่เหล็กของโรเตอร์ที่ลอยอยู่ในอากาศเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์พร้อมกับการสั่นซึ่งอาจนำไปสู่การแยกตัวกระตุ้นของแม่เหล็ก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้จึงได้เสนอการกรองสัญญาณช่วงแคบ ๆ ด้วยวิธี Generalized



Narrow – Band Notch Filter ที่ถูกแทรกลงในการป้อนกลับหลายตัวแปร (Multivariable Feedback) ซึ่งไม่ทำให้ Closed Loop มีความยุ่งยาก โดยที่พารามิเตอร์ของ Generalized Notch Filter ขึ้นอยู่กับ เมทริกซ์อินเวอร์สความไว (Inverse Sensitivity Matrix) ประมาณได้จากความเร็วในการหมุน เมทริกซ์นี้เป็นค่าที่วัดได้โดยง่ายจากวิธีการ โดยทั่วไป ซึ่งแสดงถึงการกระจาย Notch ที่เป็นไปได้ สำหรับ Gyroscopic ของโรเตอร์ที่ไม่สมบูรณ์ การนำเสนอวิธีการกรอง Notch เป็นประโยชน์ ในทอมความซับซ้อนของการทำงานรวมถึงการวิเคราะห์ตรวจสอบเสถียรภาพของ Closed Loop

Lum, Coppola, and Bernstein (1996) งานวิจัยนี้จะกล่าวถึง การปรับตัวสู่ศูนย์กลาง อัตโนมัตินี้ (Adaptive Autocentering) ที่ชดเชยแรงส่งจากความไม่สมดุลของระบบแบร์ริงแม่เหล็ก แบบกระตุ้น ตามกฎการควบคุม (Control Laws) และหลักการพื้นฐานของวิธีการดำเนินการระบุ เอกลักษณะ On – Line ของระบบที่มีความเฉพาะทางกายภาพของความไม่สมดุลของโรเตอร์และใช้ ผลที่ได้จากการระบุเอกลักษณะปรับแต่งตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ วิธีการนี้แตกต่างจาก กระบวนการปรับแก้ของการชดเชยการปรับตัวไปข้างหน้า (Adaptive Feed - Forward Compensation) ซึ่งแบบจำลองเป็นผลกระทบของความไม่สมดุลที่กระจายภายนอกหรือผลกระทบ จากสัญญาณรบกวนและไม่สนใจผลกระทบทั่วไปกับสัญญาณอ้างอิงชั่วขณะ แตกต่างจาก การชดเชยการปรับตัวไปข้างหน้า การควบคุมการปรับตัวสู่ศูนย์กลางอัตโนมัติที่มีความ เป็นอิสระและทำงานภายใต้ความเร็วโรเตอร์ที่เปลี่ยนไป ประสิทธิภาพของการควบคุมอัลกอริทึม ใช้กับความไม่สมดุลสถิต (Static Unbalance) และความไม่สมดุลพลวัต (Dynamic Unbalance) ของโรเตอร์แบบแข็งเกร็ง

Ji and Hansen (2001) ศึกษาการตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของโรเตอร์ที่รองรับด้วยแบร์ริง แม่เหล็กแบบกระตุ้นเป็นการตรวจสอบทั้งเบี่ยงเบนและเงื่อนไขเรโซแนนซ์ (Resonance) ในการ พิจารณา คุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบแบร์ริงแม่เหล็กสามารถนำไปสู่ปรากฏการณ์ ที่ไม่ได้อธิบายในแบบจำลองเชิงเส้น ด้วยวิธีการ Multiple Scales ที่ใช้การกำหนดลำดับแรก สมการอนุพันธ์สามมิติที่อธิบายการปรับของแอมพลิจูดและเฟสของการสั่น โดยตรงในแนวนอนและ แนวตั้ง การตอบสนองที่สภาวะคงตัวและเสถียรภาพของผลเฉลยกำหนดโดยวิธีการเชิง ตัวเลข (Numerically) จากการลดรูประบบ แสดงให้เห็นผลในสภาวะคงตัว ผลกระทบของระยะ ความไม่สมดุลตลอดจนผลกระทบของอัตราขยายสัดส่วน (Proportional Gain) และอัตราขยาย อนุพันธ์ (Derivative Gain) ของตัวควบคุมบนการตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ

Sivrioglu (2007) นำเสนอว่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากแบร์ริงแม่เหล็กมีความ ไม่เป็นเชิงเส้นสูงและความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ในการคำนวณแรงของแม่เหล็กทำให้ การควบคุมแบร์ริงแม่เหล็กมีความซับซ้อน โดยให้กระแสแบร์ริงแม่เหล็ก Zero – Bias มีความเป็นไปได้ที่จะลดการสูญเสียไฟฟ้าเนื่องจากมีแม่เหล็กเพียงหนึ่งคู่เท่านั้นที่ทำงานในเวลา

ที่กำหนด การควบคุมกระแสของแบริ่งแม่เหล็ก Zero – Bias โดยการให้โรเตอร์และพารามิเตอร์ของแบริ่งเป็นค่าที่ไม่ทราบโดยสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้นจะถูกใช้เพื่อประมาณสถานะที่ไม่สามารถวัดได้ซึ่งความผิดพลาดจะลดลงสู่เข้าเป็น Exponentially ตั้งแต่ Full State ของระบบควบคุมที่ไม่สามารถใช้การป้อนกลับได้ ใช้การควบคุมการปรับตัวประเภทเอาต์พุตแบบคสตีป (Output – Type Adaptive Backstepping) ปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมเนื่องจาก Dynamic สถานะที่ไม่สามารถวัดค่าได้ของระบบแบริ่งเป็นการประมาณค่าโดยการสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้นและการปรับตัวของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าโดยคำนึงถึงกฎปรับปรุง (Update Laws) ที่ได้ในการอนุพันธ์ของกฎการควบคุม (Control Laws) ในการตรวจสอบ

Sabirin, Binder, Popa, and Craciunescu (2007) นำเสนอวิธีการการควบคุมการกระตุ้นการสั่นและชดเชยความไม่สมดุล ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลอง Simulation และการควบคุมระบบ AMB แบบวีซีเอ็ม สำหรับการหมุนที่ความเร็วสูง ด้วยแบบจำลองของ Power Amplifier ด้วยการควบคุม PWM ด้วยเหตุนี้พฤติกรรม Dynamic ของกระแสในการพันแบริ่ง นอกจากนี้ยังตรวจสอบแบบจำลอง ด้วยการควบคุม PID และ State – Space บนพื้นฐานระเบียบวิธี LQR (Linear Quadratic Regulator) หรือการควบคุมสมการกำลังสองเชิงเส้น ซึ่งทั้งสองวิธีจะเปรียบเทียบการยกตัวขึ้นของโรเตอร์และความไม่สมดุลของโรเตอร์ซึ่งคาดการณ์สาเหตุการกระจายของแรง ยังมีการชดเชยแบริ่งแม่เหล็กด้วยแรงโน้มถ่วงที่ใส่เพิ่มเข้าไป

Zhang and Zhang (2010) นำเสนอว่าในโรเตอร์ความเร็วสูงรองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น การหมุนของโรเตอร์มีอิทธิพลอย่างมากจากความไม่สมดุลในโรเตอร์และบางโหมดการสั่นที่ความถี่ต่ำจากโครงสร้างของระบบโรเตอร์ ความไม่สมดุลทั่วไปทาง Dynamic เป็นพฤติกรรมที่ไม่ต้องการของโรเตอร์ ซึ่งใช้วิธีการควบคุมการปรับตัวความไม่สมดุลของแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น พุดถึง Generalized Notch Filter ซึ่งเป็นการช่วยให้โรเตอร์ทำงานได้ตามต้องการและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความสมดุลทาง Dynamic มีสองวิธีที่แตกต่างกันคือ วิธีแรก Generalized Notch Filter จะใช้ยับยั้งการสั่นพร้อมกับโรเตอร์แล้วระบุการกระจายความไม่สมดุลของโรเตอร์ วิธีที่สอง ถูกนำมาใช้เพื่อลดแอมพลิจูดการสั่นมีอิทธิพลจากวิธีการทางสัมประสิทธิ์สามารถนำมาใช้เพื่อความสมดุลของโรเตอร์

## 2.10 สรุป

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรม ด้วยคุณสมบัติอันเป็นเอกลักษณ์และยังเป็นทางเลือกใหม่ในการแก้ปัญหาโรเตอร์แบริ่งของเครื่องจักรที่มีการหมุนด้วยความเร็วรอบสูง และเพิ่มความหลากหลายในการ

ประยุกต์ใช้งาน แต่เนื่องจากระบบควบคุมยังมีความซับซ้อนทั้งส่วนของโครงสร้าง ซึ่งความไม่เป็นเชิงเส้นของสนามแม่เหล็กและเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพ อีกทั้งยังมีรูปแบบการควบคุมที่หลากหลาย ทำให้ระบบยังไม่เป็นที่นิยมนักและมีราคาสูง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและออกแบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล รองรับด้านเดียว โดยการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล เพื่ออธิบายการตอบสนองทางพลวัตและลดการสั่นของเพลลา โดยใช้หลักการ Switching Relay ON/OFF เพื่อควบคุมแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นและออกแบบตัวควบคุมเพื่อชดเชยเฟสรวมถึงตัวควบคุมแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแยกควบคุมแกน  $x$  และ  $y$



## บทที่ 3

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

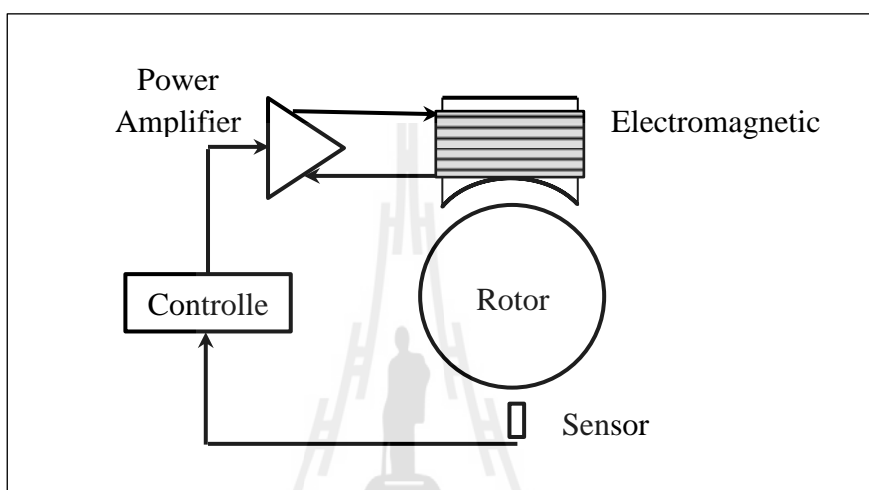
การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสามารถหาได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎี (Analysis Model) หรือแบบจำลองที่ได้เคยมีการศึกษา ซึ่งจะทำได้แบบจำลองพื้นฐานของระบบ จากนั้นนำแบบจำลองมาวิเคราะห์ บนขอบเขตหรือข้อจำกัดของการทดลอง ในการจำลอง มีค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบแตกต่างกัน ซึ่งการนำแบบจำลองพื้นฐานที่ได้มาวิเคราะห์นั้นจะได้ว่า มีพารามิเตอร์ใดบ้างที่มีผลกระทบกับระบบของเราแล้วทำการวิเคราะห์หาความเกี่ยวข้องหรือแตกต่างกับแบบจำลองพื้นฐาน

ในบทนี้กล่าวถึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบริ่งแม่เหล็ก อุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า หลักการพื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะพูดถึงสนามแม่เหล็ก การเหนี่ยวนำจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า การกระตุ้นให้เกิดแรงดึงดูดรอบ ๆ วัตถุ เพื่อเป็นหลักการในการสร้างระบบแบริ่งแม่เหล็กในการวิเคราะห์อุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้ารวมถึงการตรวจวัด การเปลี่ยนแปลงของทั้งระบบเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นเพื่อนำไปสู่การสร้างแบบจำลองของระบบแบริ่งแม่เหล็กรองรับด้านเดียว จึงใช้วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ เป็นวิธีช่วยในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้ โดยการวัดอินพุตและเอาต์พุตของระบบแล้วนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญ เพื่อใช้ในการจำลองและทดสอบระบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 โครงสร้างพื้นฐานแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น

โครงสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมระบบทางไฟฟ้า เช่น Power Amplifiers ระบบควบคุม และตำแหน่งเซนเซอร์ โดยที่โรเตอร์จะลอยอยู่ในอากาศอย่างเป็นอิสระ ภายใต้เงื่อนไขที่สถานะคงตัว โดยทั่วไปแรงดึงดูดจะถูกปรับให้สมดุลกับมวลและความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโรเตอร์หรือแรงที่กระทำกับโรเตอร์ ซึ่งสัญญาณจากเซนเซอร์จะส่งไปยังตัวควบคุมเพื่อปรับ Power Amplifier ผ่านกระแสไปยังขดลวดที่พันอยู่กับแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันสนามแม่เหล็กจะปรับตัวซึ่งทำให้แรงแม่เหล็กเป็นไปตามที่กำหนดดังรูปที่ 3.1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านทำให้เกิดฟลักซ์ เมื่อเซนเซอร์วัดการกระจัดของโรเตอร์จากตำแหน่งอ้างอิงของโรเตอร์ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซนเซอร์

เป็นอินพุตในการควบคุมแล้วป้อนสัญญาณไปควบคุมหรือรักษาตำแหน่งของโรเตอร์ให้อยู่ในตำแหน่ง แต่เนื่องจากความไม่มีเสถียรภาพของระบบโรเตอร์ที่รองรับด้วยเบร็ริงแม่เหล็ก ทำให้ระบบแม่เหล็กไฟฟ้าต้องมีระบบควบคุม ซึ่งการควบคุมของการป้อนกลับ (Feedback Control) เป็นการตอบสนองต่อระบบในสภาวะคงตัว สามารถปรับการเปลี่ยนแปลงในขอบเขตทางกายภาพของระบบเบร็ริงแม่เหล็ก และเปลี่ยนแปลงได้ระหว่างที่มีการควบคุมหรือทำงาน



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างเบร็ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น

### 3.2 แม่เหล็กไฟฟ้าและเบร็ริงแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กอธิบายด้วยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density),  $B$  มีหน่วยเป็นเทสลา (Tesla) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field strength),  $H$  มีหน่วย  $A/m$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Permeability,  $\mu$  หรือค่าบ่งบอกคุณสมบัติของสารแม่เหล็กแต่ละชนิดที่ยอมให้เกิดสนามแม่เหล็กได้มากหรือน้อย ดังนี้

$$B = \mu H \quad (3.1)$$

ในสุญญากาศค่า Permeability  $\mu = \mu_0$  คงที่เท่ากับ

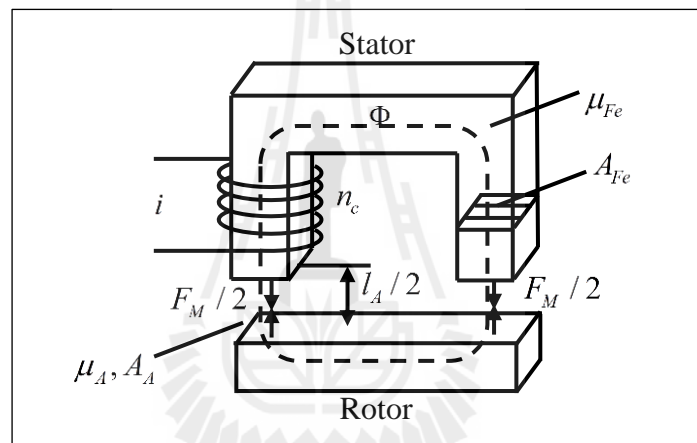
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m} \quad (3.2)$$

ในวัสดุสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) คือ สารที่มีสารแม่เหล็กสูง นำมาทำแม่เหล็กถาวร (ได้แก่ แมกเนไทต์ เหล็ก นิกเกิล) และ  $\mu_{Fe} \approx (10^2 - 10^4) \mu_0$

การอินทิกรัลของความหนาแน่นฟลักซ์  $B$  แม่เหล็กทั่วพื้นที่  $A$  นั่นคือฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux)  $\Phi$

$$\Phi = \int_A B dA \quad (3.3)$$

มีค่าคงที่ตลอดความยาวของวงปิดแม่เหล็ก



รูปที่ 3.2 วงจรพื้นฐานของเบริงแม่เหล็ก

รูปที่ 3.2 แสดงวงจรพื้นฐานของเบริงแม่เหล็กโดยมีสเตเตอร์ซึ่งเป็นแกนเหล็กไว้พัน และโรเตอร์ เส้นวงปิดของฟลักซ์แม่เหล็กเป็นการสมมุติว่ามีค่าเท่ากันตลอดความยาวคงที่มีเส้นฟลักซ์ในแกนเหล็กเป็น  $l_{Fe}$  และมีช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์หรือช่องว่างอากาศ  $l_A = 2s$  ถ้า  $n_c$  จำนวนรอบของการพันแกนเหล็ก และ  $i$  คือกระแส เรียกว่า Ampere – Turns กำหนดโดย

$$\Theta = n_c i \quad (3.4)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและผลของแม่เหล็กสามารถจะอธิบายด้วยสมการของ Maxwell's คือ

$$\Theta = \oint H dl \quad (3.5)$$

ถ้าสนามแม่เหล็กเป็น Homogeneous และอินทิกรัลตลอดความยาวของฟลักซ์ ได้ว่า

$$\Theta = H_{Fe} l_{Fe} + H_A l_A = \Phi \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe} A_{Fe}} + \frac{l_A}{\mu_A A_A} \right) \quad (3.6)$$

พารามิเตอร์ทั้งหมดของสนามแม่เหล็กสามารถจะอธิบายอยู่ในรูปของฟังก์ชันของกระแสและช่องว่างอากาศ

$$\Phi = \frac{n_c i}{(l_{Fe} / \mu_{Fe} A_{Fe}) + (l_A / \mu_A A_A)} \quad \text{Magnetic Flux} \quad (3.7)$$

$$B_A = \frac{n_c i}{(l_{Fe} A_A / \mu_{Fe} A_{Fe}) + (l_A / \mu_A)} \quad \text{Flux Density} \quad (3.8)$$

$$B_{Fe} = \frac{n_c i}{(l_{Fe} / \mu_{Fe}) + (l_A A_{Fe} / \mu_A A_A)}$$

$$H_A = \frac{n_c i}{(l_{Fe} \mu_A A_A / \mu_{Fe} A_{Fe}) + l_A} \quad \text{Magnetomotive Force} \quad (3.9)$$

$$H_{Fe} = \frac{n_c i}{l_{Fe} + (l_A \mu_{Fe} A_{Fe} / \mu_A A_A)}$$

ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  เล็กมาก ๆ (ไม่อิ่มตัว) คือ  $\mu_{Fe} \square \mu_A$  ซึ่ง  $\mu_A \approx \mu_0$  จากสมการที่ (3.7) – (3.9) เขียนได้ใหม่ว่า

$$\Phi = \frac{\mu_0 A_A n_c i}{l_A} \quad \text{Magnetic Flux} \quad (3.10)$$

$$B_A = \frac{\mu_0 n_c i}{l_A} \quad B_{Fe} = B_A \quad \text{Flux Density} \quad (3.11)$$

และ

$$H_A = \frac{n_c i}{l_A} \quad H_{Fe} = 0 \quad \text{Magnetomotive Force} \quad (3.12)$$

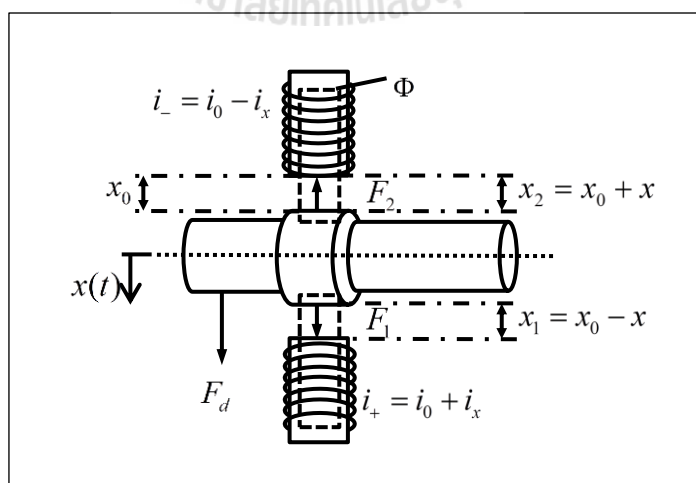
โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหาได้จากฟลักซ์ภายในช่องว่างของอากาศกับแม่เหล็กและโรเตอร์ มาจากกฎอนุรักษ์พลังงานที่เกิดขึ้นหาได้จากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในปริมาตร

$$W = -\frac{1}{2} \int_{V_A} B_A H_A dV_A = -\frac{\mu_0 A_A n_c^2}{4} \cdot \frac{i^2}{s} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $s = \frac{1}{2} l_A$

แรงแม่เหล็ก  $F$  เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $s$  ดังนี้

$$F_M = \frac{\partial W_A}{\partial s} = \frac{\mu_0 A_A n_c^2}{4} \left( \frac{i}{s} \right)^2 \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.3 แสดงแรงแม่เหล็กใน 1 แกน



แม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้แสดงในรูปที่ 3.2 โดยทั่วไปจะมีแรงในทิศทางขึ้นบนเท่านั้น คงไม่มีประโยชน์ที่นำเสนอ แต่ถ้านำมาประกอบเป็นเบริงแม่เหล็กในในรัศมีดังแสดงในรูปที่ 3.3 คงจะเป็นประโยชน์มากกว่าเนื่องจากจะเกิดแรงในทิศทางบวกและลบ ซึ่งจะไม่พิจารณาผลกระทบจากแรงคู่ควบ (Coupling Effects) สมการทั้งหมดต่อจากนี้สามารถอธิบายได้ทั้งทิศทาง  $x$  และ  $y$  ซึ่งการกระจัดของโรเตอร์จากตำแหน่งศูนย์กลางคือ  $x$  และช่องว่างอากาศเริ่มต้น (สมดุค) คือ  $s = x_0$  ดังนั้นแรงของแม่เหล็กในกรณีที่ทิศทางกระจัดเป็นบวกคือ

$$F_+ = k_M \left( \frac{i_+}{x_0 - x} \right)^2 \quad (3.15)$$

และแรงในทิศทางตรงกันข้ามคือ

$$F_- = k_M \left( \frac{i_-}{x_0 + x} \right)^2 \quad (3.16)$$

เมื่อ  $k_M$  คือค่าคงที่ของเบริงแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ

$$k_M = \frac{\mu_0 A_A n_c^2}{4} \quad (3.17)$$

แรงแม่เหล็กทั้งมีความสัมพันธ์ของการกระจัด แรงและกระแส ดังนี้

$$F_{MB} = F_+ - F_- = k_M \left[ \left( \frac{i_+}{x_0 - x} \right)^2 - \left( \frac{i_-}{x_0 + x} \right)^2 \right] \quad (3.18)$$

แรง  $F_{MB}$  ที่ได้กำหนดเป็นแรงกระทำของเบริงแม่เหล็ก คือ แรง  $F_{MB}$  เป็นบวกจะกระทำให้ตำแหน่งของโรเตอร์เป็นลบ

เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของแรงแม่เหล็ก โดยทั่วไปจะทำลดด้วยการเพิ่มกระแสเริ่มต้น  $i_0$  สูง ในการควบคุมกระแส  $i_x$  ดังนี้

$$\begin{aligned} i_+ &= i_0 + i_x \\ i_- &= i_0 - i_x \end{aligned} \quad (3.19)$$

โดยทั่วไปจะกำหนดให้  $i_0 \approx \frac{1}{2} \min(i_{\max}, i_{sat})$  เพื่อใช้ควบคุมในช่วงทั้งหมดของ Amplifiers และ/หรือแม่เหล็กไฟฟ้า

$$F_{MB} = F_+ - F_- = k_M \left[ \left( \frac{i_0 + i_x}{x_0 - x} \right)^2 - \left( \frac{i_0 - i_x}{x_0 + x} \right)^2 \right] \quad (3.20)$$

การทำให้เป็นเชิงเส้นของแรงนั้นใช้อนุกรมเทเลอร์อธิบายรอบจุด Operating ซึ่งเป็นการทำระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นจากสมการที่ (3.20) จะเห็นได้ว่า มีเทอมของค่ากระแสดำวยการกระตุ้นโดยเป็นฟังก์ชันกำลังสอง ซึ่งแสดงว่าไม่เป็นเชิงเส้น และมีรูปแบบการทำให้เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (3.21)

$$F_{MB,lin} = F_{MB}|_{OP} + \left. \frac{\partial F_{MB}}{\partial i_x} \right|_{OP} (i_x - i_{xOP}) + \left. \frac{\partial F_{MB}}{\partial x} \right|_{OP} (x - x_{OP}) \quad (3.21)$$

ดังนั้น ที่  $i_{xOP} = 0$  และ  $x_{OP} = 0$  ทำให้แรงแม่เหล็กที่เป็นเชิงเส้นสำหรับกระแสควบคุมขนาดเล็กและการกระตุ้นขนาดเล็ก

$$F_{MB,lin} = 4k_M \left[ \frac{i_0}{x_0^2} i_x - \frac{i_0^2}{x_0^3} x \right] \quad (3.22)$$

ได้สัมประสิทธิ์ในการควบคุมกระแส  $i_x$  และการกระตุ้น  $x$  ดังนี้

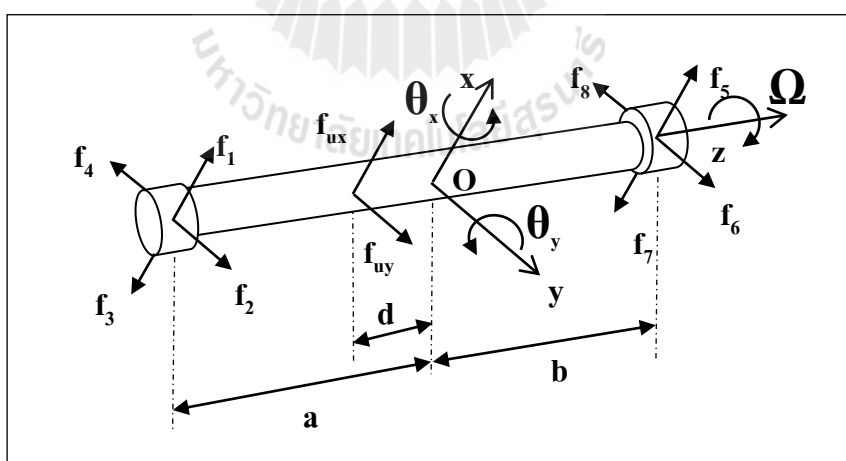
$$k_i = 4k_M \frac{i_0}{x_0^2} \quad (3.23)$$

$$k_x = -4k_M \frac{i_0^2}{x_0^3} \quad (3.24)$$

โดยเรียก  $k_x$  คือ Displacement Stiffness และ  $k_i$  คือ Current Stiffness

### 3.3 การเคลื่อนที่ของเพลลา

โครงสร้างของระบบโรเตอร์ ที่ใช้ในการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อโรเตอร์รองรับด้วยแบร็งแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลายด้านหนึ่ง และปลายอีกด้านรองรับด้วยแบร็งทั่วไป เชื่อมต่อเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยคัปปลิงแบบยืดหยุ่น (Flexible Coupling) มีเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง (Position Sensors) วัดการกระจัดของเพลลาในทิศทางแนวแกน  $x$  และแนวแกน  $y$  โดยติดตั้งที่ตำแหน่งแบร็งแม่เหล็ก จากรูปที่ 3.4 แสดงทิศทางและตำแหน่งของแรงที่กระทำแต่ละแกน ขณะที่กำหนดพิกัดของกรอบ  $O-xyz$  ถูกตั้งที่จุดกำเนิด  $O$  สอดคล้องกับจุดศูนย์กลางมวล (Center of Mass) ของเพลลาและแกน  $z$  เป็นแกน Spining ของเพลลา พารามิเตอร์  $x$  และ  $y$  แสดงการกระจัดเชิงเส้นของจุดศูนย์กลางมวลของเพลลาตลอดความยาว แกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ  $\theta_x$  และ  $\theta_y$  แสดงมุมการกระจัดเชิงมุมรอบแกน  $x$  และ  $y$  ซึ่งมี  $a$   $b$  และ  $d$  คือระยะระหว่างแบร็งทั้งสองและระยะของดิสก์เทียบกับจุดศูนย์กลางมวลตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แสดงแบบจำลองของเพลลาที่มีแบร็งรองรับทั้งสองด้าน

การเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) สามารถอธิบาย โดยสมมุติฐานว่า เพลลาเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid Shaft) สมมาตรกับความไม่สมดุล และมีความเร็วรอบของการหมุนคงที่

ซึ่งมีสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing Equation) อธิบายพฤติกรรมพลวัตในการเคลื่อนที่ของเพลลาที่จุดรองรับรอบจุดศูนย์กลางมวล  $O$  เป็นไปตามกฎของนิวตัน (Newton's Law) และการหมุนรอบจุดศูนย์กลางมวลเป็นไปตามสมการออยเลอร์ (Euler's Equation)

$$\sum \vec{F}_o = m\vec{a}_o \quad (3.25)$$

$$\sum \vec{M}_o = \dot{\vec{H}}_o \quad (3.26)$$

สมการที่ (3.25) อธิบายได้ว่า ความเร่งที่จุดศูนย์กลางมวล  $O$  เท่ากับผลรวมของแรงภายนอกที่มากระทำและสมการที่ (3.26) คือผลรวมของโมเมนต์ภายนอกหรือแรงบิด (Torque)  $\vec{M}_o$  รอบจุดศูนย์กลางมวล  $O$  เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัมเชิงมุม (Angular Momentum)  $\dot{\vec{H}}_o$  รอบจุดศูนย์กลางมวล  $O$  จากสมการที่ (3.26) สามารถพิจารณาอยู่ในรูปแบบสเกลาร์ดังนี้

$$M_x = I_x \dot{\omega}_x - I_y \omega_y \Omega_z + I_z \omega_z \Omega_y \quad (3.27)$$

$$M_y = I_y \dot{\omega}_y - I_z \omega_z \Omega_x + I_x \omega_x \Omega_z \quad (3.28)$$

$$M_z = I_z \dot{\omega}_z - I_x \omega_x \Omega_y + I_y \omega_y \Omega_x \quad (3.29)$$

- โดยที่  $I_x, I_y$  และ  $I_z$  คือโมเมนต์เฉื่อยหลัก (Principle Moment of Inertia)  
 $\omega_x, \omega_y$  และ  $\omega_z$  คือส่วนประกอบความเร็วเชิงมุมในกรอบรูปร่าง (Body Frame)  
 $\Omega_x, \Omega_y$  และ  $\Omega_z$  คือส่วนประกอบความเร็วเชิงมุมของกรอบอ้างอิง (Reference Frame)  
 $M_x, M_y$  และ  $M_z$  คือโมเมนต์สุทธิรอบแกน (Body – Fixed)

โรเตอร์ที่สมมาตรทำให้  $I_x = I_y = I$  และ  $I_z = I_p$  โดยที่  $I$  และ  $I_p$  เป็นโมเมนต์เฉื่อยในแนวรัศมีและโมเมนต์เฉื่อยในแนวแกนตามลำดับ ซึ่งการหมุนของโรเตอร์นั้นมีเฉพาะการ Spinning ของแกนรอบ  $Z$  ของกรอบอ้างอิงทำให้  $\Omega_x$  และ  $\Omega_y$  มีค่าเท่ากับศูนย์ และสมการที่ (3.29) นี้แสดงให้เห็นว่าแรงบิดจากมอเตอร์กระแสสลับใช้ในการควบคุมความเร็วเชิงมุม

$\omega_z$  ร่วมกับโรเตอร์ อย่างไรก็ตามในการพิจารณาเหล่านี้สมมติให้ความเร็วของมอเตอร์คงที่และเป็นค่าที่ทราบทำให้  $\dot{\omega}_z = 0$  โดย  $\ddot{\theta}_x = \dot{\omega}_x$  และ  $\ddot{\theta}_y = \dot{\omega}_y$

$$\sum M_x = I\ddot{\theta}_x - I_p\dot{\theta}_y\Omega \quad (3.30)$$

$$\sum M_y = I\ddot{\theta}_y + I_p\dot{\theta}_x\Omega \quad (3.31)$$

โดยที่  $M_{gyro,X} = -I_p\dot{\theta}_y\Omega$  และ  $M_{gyro,Y} = I_p\dot{\theta}_x\Omega$  เป็นเทอมผลกระทบที่เรียกว่า Gyroscopic Effect คือ ผลกระทบเพื่อช่วยรักษาระดับทิศทางของแกนหมุน ประกอบด้วยล้อหมุนบรรจุอยู่ในกรอบอีกทีหนึ่ง ทำให้เอียงในทิศทางต่าง ๆ ได้โดยอิสระนั่นคือ หมุนในแกนใด ๆ ก็ได้ โมเมนต์เชิงมุมของล้อดังกล่าวทำให้มันคงรักษาค่าแห่งของมันไว้แม้กรอบล้อจะเอียง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางพลวัตที่ได้จากสมการแรงและ โมเมนต์ทั้งหมดเมื่อทิศทางการหมุนของ  $\dot{\theta}_x$  เป็นลบทำให้สมการของโรเตอร์มีดังนี้

$$\sum F_x = m\ddot{x} = F_1 - F_3 + F_5 - F_7 + F_{ux} \quad (3.32)$$

$$\sum F_y = m\ddot{y} = F_2 - F_4 + F_6 - F_8 + F_{uy} - mg \quad (3.33)$$

$$\sum M_y = I\ddot{\theta}_y - \Omega I_p\dot{\theta}_x = b(F_5 - F_7) - a(F_1 - F_3) - dF_{ux} \quad (3.34)$$

$$\sum M_x = I\ddot{\theta}_x + \Omega I_p\dot{\theta}_y = a(F_2 - F_4) - b(F_6 - F_8) + dF_{uy} \quad (3.35)$$

แรงเนื่องจากความไม่สมดุล (Unbalance Force) ของดิสก์ที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้น

$$F_{ux} = m_u e \Omega^2 \cos(\Omega t + \theta) \quad (3.36)$$

$$F_{uy} = m_u e \Omega^2 \sin(\Omega t + \theta) \quad (3.37)$$

แรงที่กระทำกับเบร้งแบบทั่วไป ซึ่งสามารถประมาณค่าได้ดังสมการที่ (3.39) และ (3.40) ซึ่งขึ้นกับ ความหน่วงและความแข็งเกร็งของเบร้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ

$$F_5 - F_7 = -c\dot{x}_1 - kx_1 \quad (3.39)$$

$$F_6 - F_8 = -c\dot{y}_1 - ky_1 \quad (3.40)$$

โดยที่ค่า  $c$  คือค่าคงที่ความหน่วงของเบร้งและ  $k$  คือค่าความแข็งของสปริง ซึ่งการกระจัดของ เพลาแบบแข็งเกร็งจึงสมมุติการเปลี่ยนแปลงมุมที่มีขนาดเล็ก ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง ของเพลา  $(x_1, x_2, y_1, y_2)$  และตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล  $(x, y, \theta_x, \theta_y)$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$x = \frac{bx_1 + ax_2}{a+b} = \frac{bx_1 + ax_2}{L} \quad (3.41)$$

$$y = \frac{by_1 + ay_2}{a+b} = \frac{by_1 + ay_2}{L} \quad (3.42)$$

$$\theta_x = \frac{y_1 - y_2}{a+b} = \frac{y_1 - y_2}{L} \quad (3.43)$$

$$\theta_y = \frac{x_2 - x_1}{a+b} = \frac{x_2 - x_1}{L} \quad (3.44)$$

เมื่อ  $L = a + b$  แทนสมการที่ (3.36) – (3.44) ลงในสมการที่ (3.32) – (3.35) และ

$$\text{กำหนดให้} \quad \alpha_1 = aI_p\Omega/IL, \quad \alpha_2 = bI_p\Omega/IL,$$

$$\gamma_1 = (bd/I) - (1/m), \quad \gamma_2 = (ad/I) + (1/m),$$

$$\beta_1 = (b^2/I) + (1/m), \quad \beta_2 = (ab/I) - (1/m) \text{ และ } \beta_3 = (a^2/I) + (1/m)$$

ทำให้สรุปได้ว่า

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + c\beta_3\dot{x}_1 + \alpha_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k\beta_3x_1 + k_x\beta_2x = -k_i\beta_2i_x \\ + \gamma_2m_u e\Omega^2 \cos(\Omega t + \theta) \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 - c\beta_2\dot{x}_1 - \alpha_2(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - k\beta_2x_1 - k_x\beta_1x = k_i\beta_1i_x \\ - \gamma_1m_u e\Omega^2 \cos(\Omega t + \theta) \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 + c\beta_3\dot{y}_1 + \alpha_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k\beta_3y_1 + k_y\beta_2y_2 = -k_i\beta_2i_y \\ + \gamma_2m_u e\Omega^2 \sin(\Omega t + \theta) - g \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_2 - c\beta_2\dot{y}_2 - \alpha_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k\beta_2y_1 - k_y\beta_1y_2 = k_i\beta_2i_y \\ - \gamma_1m_u e\Omega^2 \sin(\Omega t + \theta) - g \end{aligned} \quad (3.48)$$

ซึ่งสามารถในรูปแบบเมทริกซ์ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c\beta_3 & 0 & \alpha_1 & -\alpha_1 \\ -c\beta_2 & 0 & -\alpha_2 & \alpha_2 \\ -\alpha_1 & \alpha_1 & c\beta_3 & 0 \\ \alpha_2 & -\alpha_2 & -c\beta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} k\beta_3 & k_x\beta_2 & 0 & 0 \\ -k\beta_2 & -k_x\beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k\beta_3 & k_y\beta_2 \\ 0 & 0 & -k\beta_2 & -k_y\beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} -k_i\beta_2 & 0 \\ k_i\beta_1 & 0 \\ 0 & -k_i\beta_2 \\ 0 & k_i\beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_2 & 0 \\ -\gamma_1 & 0 \\ 0 & \gamma_2 \\ 0 & -\gamma_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_u e\Omega^2 \cos(\Omega t) \\ m_u e\Omega^2 \sin(\Omega t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} g \end{aligned} \quad (3.49)$$

จากสมการที่ (3.61) ซึ่งสามารถเขียนเฉพาะในส่วนของแบริงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (3.50) เมื่อเทอมของ  $dx_2$  และ  $dy_2$  เป็นผลรวมของแรงรบกวน (Disturbance Forces) ของทั้งระบบ

ประกอบไปด้วย แรงไม่สมดุล (Unbalance Forces) แรงจากน้ำหนัก (Gravity Forces) แรงคู่ควบ (Coupling Forces) และแรงใจโรสโคป (Gyroscopic Forces) ของทั้งทิศทาง  $x$  และ  $y$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_x \beta_1 & 0 \\ 0 & -k_y \beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_i \beta_1 & 0 \\ 0 & k_i \beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx_2 \\ dy_2 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

โดยที่

$$dx_2 = -\gamma_1 m_u e \Omega^2 \cos(\Omega t + \theta) + c \beta_2 \dot{x}_1 + \alpha_2 \dot{y}_1 + k \beta_2 x_1 - \alpha_2 \dot{y}_2 \quad (3.51)$$

$$dy_2 = -\gamma_1 m_u e \Omega^2 \sin(\Omega t + \theta) - \alpha_2 \dot{x}_1 + c \beta_2 \dot{y}_1 + k \beta_2 x_1 - \alpha_2 \dot{y}_2 - g \quad (3.52)$$

จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากใช้วิธีการวิเคราะห์ ดังที่กล่าวมาแล้ว ในข้างต้น ยังมีแนวทางที่พึ่งพาผลการทดลองด้วยการทดลองในโดเมนเวลาที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เป็นการกระตุ้นระบบด้วยอินพุตแบบขั้นบันได (Step Input) หรืออาจจะเป็นลักษณะของสัญญาณรบกวน (Distributions) และใช้เครื่องบันทึกการตอบสนองไว้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อาจได้จากการวิเคราะห์การตอบสนองดังกล่าว ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้มักจะจำกัดรูปแบบเป็นอันดับหนึ่ง อันดับหนึ่งมีพจน์ประวิงเวลา (Delay Time) หรืออันดับสอง การทดลองเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีนี้ ได้รับความนิยมเพราะสะดวกในการดำเนินงาน ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง และสามารถนำจำลองที่ได้ไปใช้ประโยชน์ได้จริง เพียงแต่มีข้อจำกัดด้านอินพุตของระบบ และไม่มีหลักประกันว่า แบบจำลองที่ได้จะให้ผลถูกต้อง ถ้าอินพุตที่กระตุ้นระบบเปลี่ยนไปจากที่ได้กำหนดไว้ นอกจากการดำเนินงานในโดเมนเวลาแล้ว การทดลองทางความถี่ก็ยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ด้วยการกระตุ้นระบบด้วยอินพุตรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Input) ที่มีความถี่แตกต่างกันจากความถี่ต่ำไปถึงความถี่สูง รอให้ระบบมีการตอบสนองคงตัว เมื่อได้รับอินพุตความถี่ใด ความถี่หนึ่ง ทำการบันทึกลักษณะสมบัติทั้งขนาดและเฟสของการตอบสนอง และนำข้อมูลนี้ไปวาดแผนภาพโบดเพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนต่อไป การทดลองทางโดเมนความถี่นี้ ใช้เวลาดำเนินงานมาก คงจะเหมาะสมเฉพาะกรณีที่มีเวลามากพอที่จะดำเนินการด้วยวิธีการนี้ เราสามารถที่จะวิเคราะห์ระบบพลวัต โดยอาศัยทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์เข้าช่วย เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำ แต่เมื่อได้มาแล้วจะมีวิธีการหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองได้อย่างไร วิธีการที่ใช้ได้ผลเป็นอย่างดี อาศัยหลักการทางสถิติคำนวณหาค่า ที่ประกันได้ว่าจะเกิด



ความผิดพลาดน้อยที่สุด วิธีการดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่ม เทคนิควิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบ (System Identification) ซึ่งมีรายละเอียดที่จะต้องศึกษามากมาย อาจกล่าวโดยภาพรวมได้ว่า ผู้ดำเนินการจะต้องกระตุ้นระบบพลวัตที่ต้องการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยสัญญาณแบบสุ่มเทียม (Pseudo – Random Signal) บันทึกผลตอบสนองที่ได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ จากนั้นนำผลการตอบสนองนี้ไปผ่านกระบวนการคำนวณ ที่จะให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุด (Best Fit) แก่ชุดข้อมูลที่น่าไปคำนวณ แบบจำลองที่ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของระบบ สิ่งที่ยังระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง คือผลที่ได้แม้ว่าจะดีที่สุดจากการคำนวณให้ชุดข้อมูล ก็มิได้หมายความว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น จะอธิบายระบบได้อย่างดีและสมบูรณ์ อาจกล่าวได้ว่าเทคนิคที่เลือกใช้ อาจให้ผลเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เหมาะสมมากนัก ไม่ควรแก่การนำไปใช้งานก็เป็นได้ และอีกประการหนึ่งการเลือกให้แบบจำลองมีอันดับที่สูง ๆ (Higher Order) ก็มีใช้ว่าจะให้ผลดีเสมอไป ดังนั้น การจะเลือกให้เทคนิคใดในการระบุเอกลักษณ์ระบบ จะต้องพิจารณา และไตร่ตรองอย่างรอบคอบ ถึงข้อจำกัดและความเหมาะสม รวมไปถึงการใช้งานเทคนิคเหล่านั้นอย่างระมัดระวังด้วย

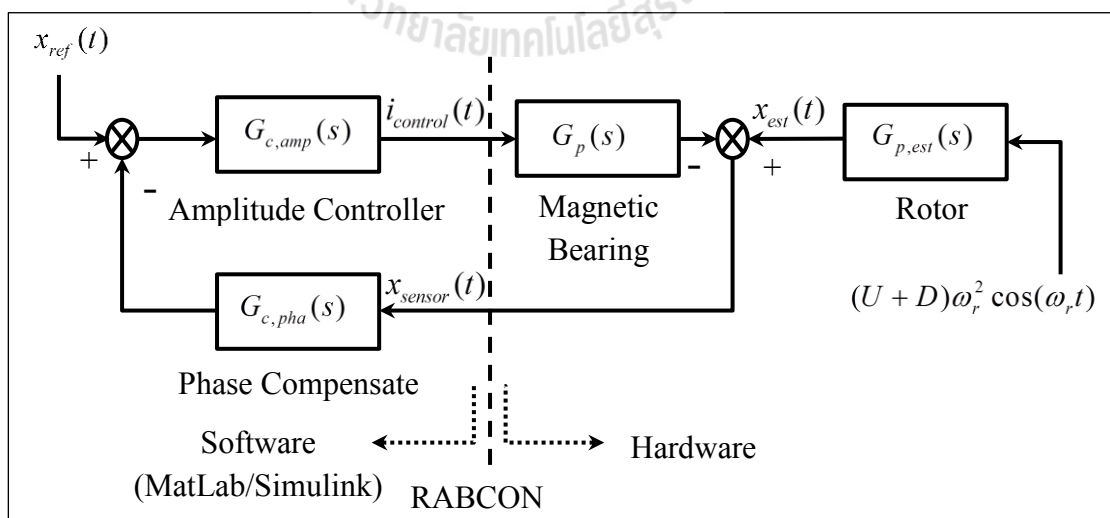
### 3.4 สรุป

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสามารถหาได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีด้วยแบบจำลองที่ได้เคยมีการศึกษามา ซึ่งจะทำได้แบบจำลองพื้นฐานของระบบ จากนั้นนำแบบจำลองมาวิเคราะห์เพื่อออกแบบบนขอบเขตหรือข้อจำกัดของการทดลอง ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของเพลลาที่ปลายด้านหนึ่งรองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล จะเห็นว่า มีพารามิเตอร์อยู่หลายตัวที่ไม่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของระบบได้ในทางปฏิบัติ อีกทั้งยังมีความซับซ้อนทางกายภาพของระบบแบริ่งแม่เหล็กและระบบรองรับเพลลาด้วยแบริ่งแม่เหล็ก ดังนั้น เพื่อนำไปสู่การสร้างแบบจำลองของระบบแบริ่งแม่เหล็กรองรับด้านเดียว จึงใช้วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ เพื่อช่วยในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้ โดยการวัดอินพุตและเอาต์พุตของระบบแล้วนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาค่าของพารามิเตอร์ที่สำคัญ เพื่อใช้ในการจำลองและทดสอบระบบต่อไป

## บทที่ 4

### การประมาณค่าแบบจำลองและผลการจำลองสถานการณ์

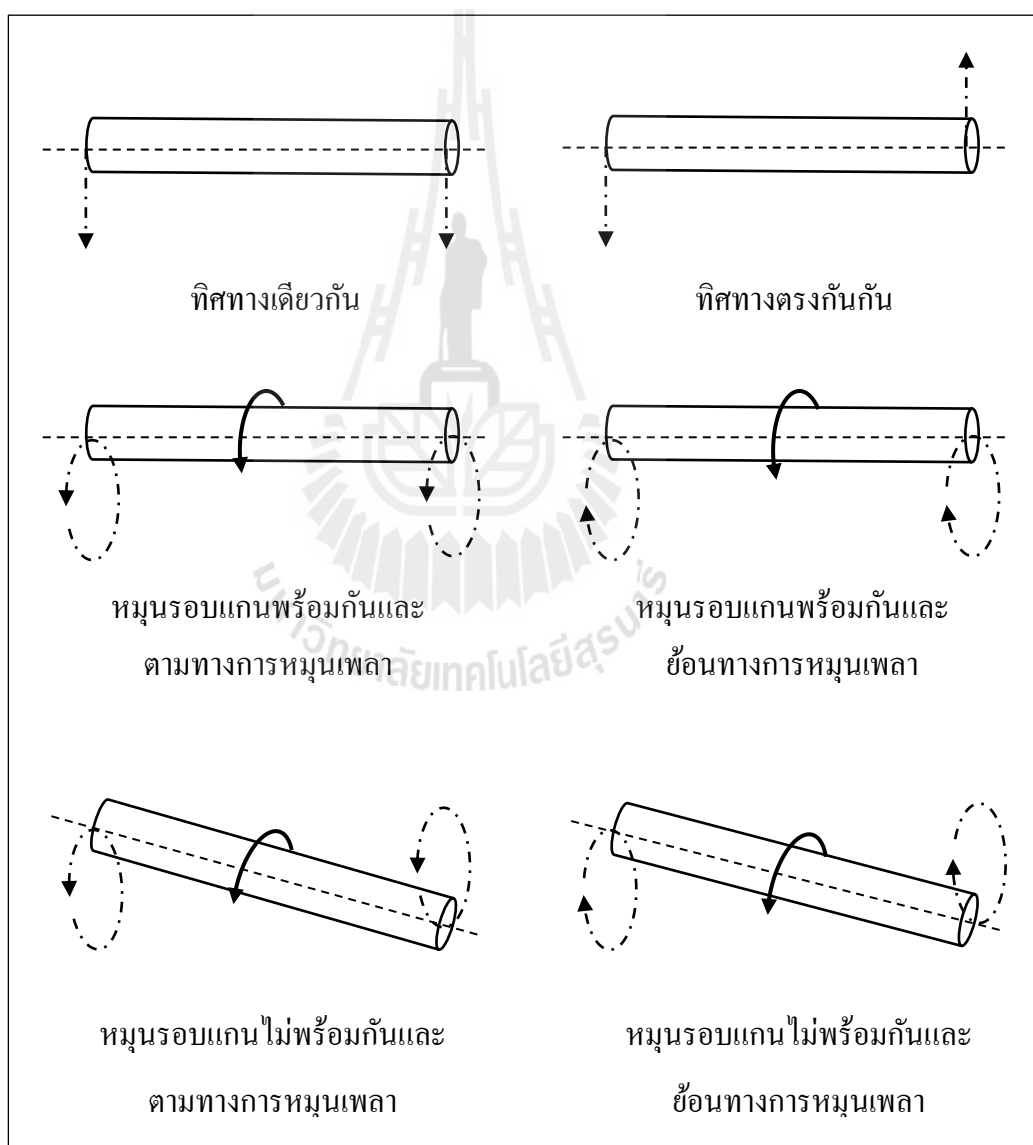
ในบทนี้จะใช้วิธีการประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้นใน Simulink Parameter Estimation เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเทียบเท่าของโรเตอร์โดยอาศัยการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจากการวัดและเก็บค่าข้อมูลเอาท์พุทแล้วนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากเป็นระบบที่มีความซับซ้อนทั้งระบบแม่เหล็กและระบบรองรับเพลาด้วยเบริงแม่เหล็ก จึงไม่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้โดยตรงหรือทั้งหมด ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบเทียบเท่าของโรเตอร์ ที่สามารถทำงานได้ตลอดช่วงการทำงานที่ต้องการ โดยการระบุเอกลักษณ์ในระบบเปิด จากแรงที่ทำให้เพลามุมมีลักษณะเป็น Sinusoidal Input ซึ่งค่าการกระจัดในทิศทาง x และ y จะมีทั้งขนาดและมุมเฟส ในการควบคุมสัญญาณที่เกิดจากการสั่นนั้นสิ่งที่สำคัญคือ ตำแหน่งของเวลาที่จะควบคุมจะต้องมีความเหมาะสม เนื่องจากระบบมีอุปกรณ์ต่าง ๆ จำนวนมากที่ใช้ในการรับส่งของข้อมูลทำให้มีผลกระทบของ Delay เข้ามาเกี่ยวข้องอีกทั้งขนาดความถี่ในการเก็บข้อมูลหรือ Sampling Time ก็มีผลต่อการประมวลผลของสัญญาณดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการชดเชย Delay ของทั้งระบบเพื่อให้สามารถควบคุมได้ในตำแหน่งที่ต้องการ



รูปที่ 4.1 แผนภาพการควบคุมการสั่นของเพลาร

ดังนั้นเราจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การประมาณค่าแบบจำลองจะพิจารณาเฉพาะขนาดที่ทำให้แอมพลิจูดเท่ากับระบบจริงเท่านั้น เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นระบบอันดับสองแล้ว จะเปรียบเทียบเพื่อหามุมเฟสที่เหมาะสม ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ปรับตามรูปแบบวงโคจรและปรับตาม Delay Time ซึ่งทั้งสองวิธีเป็นการปรับแบบ Manual คือหามุมเฟสและเวลาที่เหมาะสมให้กับระบบ
2. ปรับเฟสด้วยตัวชดเชยเฟส ซึ่งพิจารณาจากการปรับแบบ Manual เพื่อออกแบบตัวชดเชยเฟสของระบบให้เหมาะสมกับพฤติกรรมทางพลวัตของระบบ

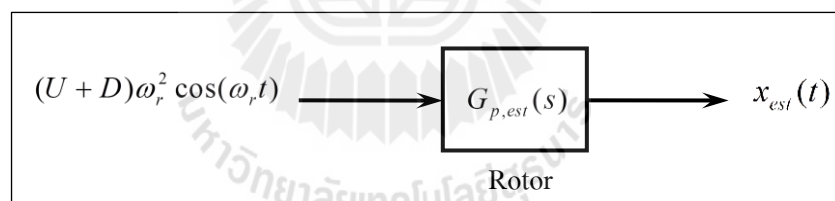


รูปที่ 4.2 แสดงการเคลื่อนที่ของเฟลาแบบเชิงเกร็งในรูปแบบต่าง ๆ

ในลำดับต่อไปเป็นการออกแบบตัวควบคุมแอมพลิจูดซึ่งใช้ตัวควบคุมแบบ PD เพื่อลดการสั่นที่เกิดขึ้นของระบบ จากระบบสมการที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าระบบมี 4 ลำดับชั้นความอิสระคือ  $x$ ,  $y$ ,  $\theta_x$  และ  $\theta_y$  ทำให้มีพฤติกรรมเคลื่อนที่ต่าง ๆ ของเพลลาที่โหมดธรรมชาติ (Natural Modes) แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากที่จะนำมาพิจารณาทั้งหมด จึงเป็นที่มาของสมมุติฐานที่ว่า การประมาณค่าจะพิจารณาเพียงการเคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  โดยไม่ขึ้นต่อกันหรือแยกอิสระในตำแหน่งที่ต้องการควบคุมคือที่ปลายของเพลลาซึ่งมีแบร์ริงแม่เหล็กรองรับอยู่เท่านั้น

#### 4.1 การประมาณค่าแบบจำลองของระบบเทียบเท่าของโรเตอร์

จากหลักการแม่เหล็กไฟฟ้าและการเคลื่อนที่ของเพลลาเพื่อหาโครงสร้างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยให้เพลลาหมุนที่ความเร็วรอบคงที่ เมื่อเพลลาหมุนจะเกิดความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุนขึ้นส่งผลให้เพลลาเกิดการสั่น (การกระจัด) ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ในตำแหน่งรองรับทั้งสองด้านหรือแม่กระทั่งที่จุดศูนย์กลางเพลลา แต่เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3 มีข้อจำกัดของเครื่องมือวัด และการเก็บข้อมูลเพื่อควบคุม ทำให้ไม่สามารถวัดค่าหรือประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด ดังนั้นเราจึงใช้ระบบหรือแบบจำลองเทียบเท่าดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพระบบเปิดของระบบเทียบเท่าโรเตอร์

$U = m_u e$  คือขนาดความไม่สมดุลขึ้นกับความเร็วรอบ  $\omega_r$  กำลังสอง และ  $D$  คือเทอมชดเชยแรงรบกวอนทั้งหมดของระบบ เมื่อกระทำกับระบบเทียบเท่าจะทำให้เกิดการกระจัด  $x_{est}(t)$  ขึ้น สามารถอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ให้ใกล้เคียงกับระบบจริงได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้ระบบอันดับ 2 ดังนี้

$$G_{p,est}(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.1)$$

#### 4.1.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยการวัดเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์

ในทางปฏิบัติพารามิเตอร์ของระบบจะไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง จึงต้องทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบเทียบเท่าโรเตอร์ ที่สามารถทำงานได้ตลอดช่วงการทำงานที่ต้อง โดยการระบุเอกลักษณ์ในระบบเปิด (Open – Loop Identification) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จากแรงที่ทำให้เพลาลมุนมีลักษณะเป็น Sinusoidal Input ค่าการกระจัดในทิศทาง  $x$  และ  $y$  จะมีทั้งขนาดและมุมเฟส ทำให้การประมาณค่าด้วยโปรแกรม MATLAB จึงทำได้เพียงหาขนาดของแรงเท่านั้น และขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ของระบบเทียบเท่าของเบริงแม่เหล็กกับโรเตอร์ มีดังนี้

1. วัดค่าการกระจัดในทิศทาง  $x$  และ  $y$  โดยปรับอินพุตคือความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์เท่ากับ 100 200 และ 300 RPM โดยแต่ละความเร็วรอบจะเก็บค่าสูงสุดและต่ำสุดเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในประมาณค่า ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงการกระจัดของเพลที่ตำแหน่งเบริงแม่เหล็กในทิศทางต่าง ๆ

ความเร็วรอบ (RPM)	การกระจัดทิศทาง $x$ (mm) Max – Min (Mean)	การกระจัดทิศทาง $y$ (mm) Max – Min (Mean)
100	0.488 – 0.410 (0.449)	0.585 – 0.540 (0.563)
200	0.490 – 0.420 (0.455)	0.625 – 0.588 (0.607)
300	0.536 – 0.432 (0.484)	0.685 – 0.648 (0.667)

2. การระบุเอกลักษณ์ที่ความถี่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของระบบเทียบเท่า ซึ่งมีพารามิเตอร์ร่วมกัน คือ  $k_{est}$ ,  $c$ ,  $m_{est}$ ,  $U_x$  และ  $U_y$  ส่วนค่าพารามิเตอร์ของแรงรบกวนจะพิจารณาตามความเร็วรอบคือ ที่ 100 RPM จะมี  $D_{100x}$  กับ  $D_{100y}$  และในทำนองเดียวกันที่ 200 กับ 300 RPM ก็จะมี  $D_{200x}$  กับ  $D_{200y}$  และ  $D_{200x}$  กับ  $D_{200y}$  ตามลำดับ

3. สร้างแบบจำลองระบบเทียบเท่าของโรเตอร์ระบบเปิด พร้อมทั้งอินพุตและเอาต์พุตใน โปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink สำหรับวิธีการใช้งาน Parameter Estimation ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.

#### 4.1.2 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์โดยการวัด

ผลของค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ ในแต่ละความเร็วรอบที่ต้องการ คือ 100 200 และ 300 RPM ซึ่งแต่ละค่าความเร็วรอบจะมีพารามิเตอร์ร่วมดังตารางที่ 4.2 และพารามิเตอร์ของแรงรบกวนระบบดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ร่วมของระบบ

	$m_{est}$ (kg)	$c$ (N.s/m)	$k_{est}$ (N/m)	$U_x$ (kg.m)	$U_y$ (kg.m)
Run 1	2.0294	31.900	82,275	0.02103	0.02917
Run 2	2.0173	31.984	83,822	0.02147	0.02978
Run 3	2.0234	31.944	83,047	0.02125	0.02948
Mean	2.0234	31.9427	83,048	0.02135	0.02947

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์แรงรบกวนระบบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

	$D_{100x}$ (kg.m)	$D_{100y}$ (kg.m)	$D_{200x}$ (kg.m)	$D_{200y}$ (kg.m)	$D_{300x}$ (kg.m)	$D_{300y}$ (kg.m)
Run 1	0.3149	0.3917	0.0615	0.0834	0.0184	0.0251
Run 2	0.3208	0.3991	0.0626	0.0849	0.0187	0.0255
Run 3	0.3179	0.3954	0.0621	0.0841	0.0186	0.0252
Mean	0.3179	0.3954	0.0621	0.0841	0.0186	0.0253

จากตารางที่ 4.2 ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของระบบเทียบเท่าของโรเตอร์ในทิศทาง x และ y เท่ากับ

$$m_{est} = 2.0234 \text{ kg}, c = 31.9427 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} \text{ และ } k_{est} = 83,048 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

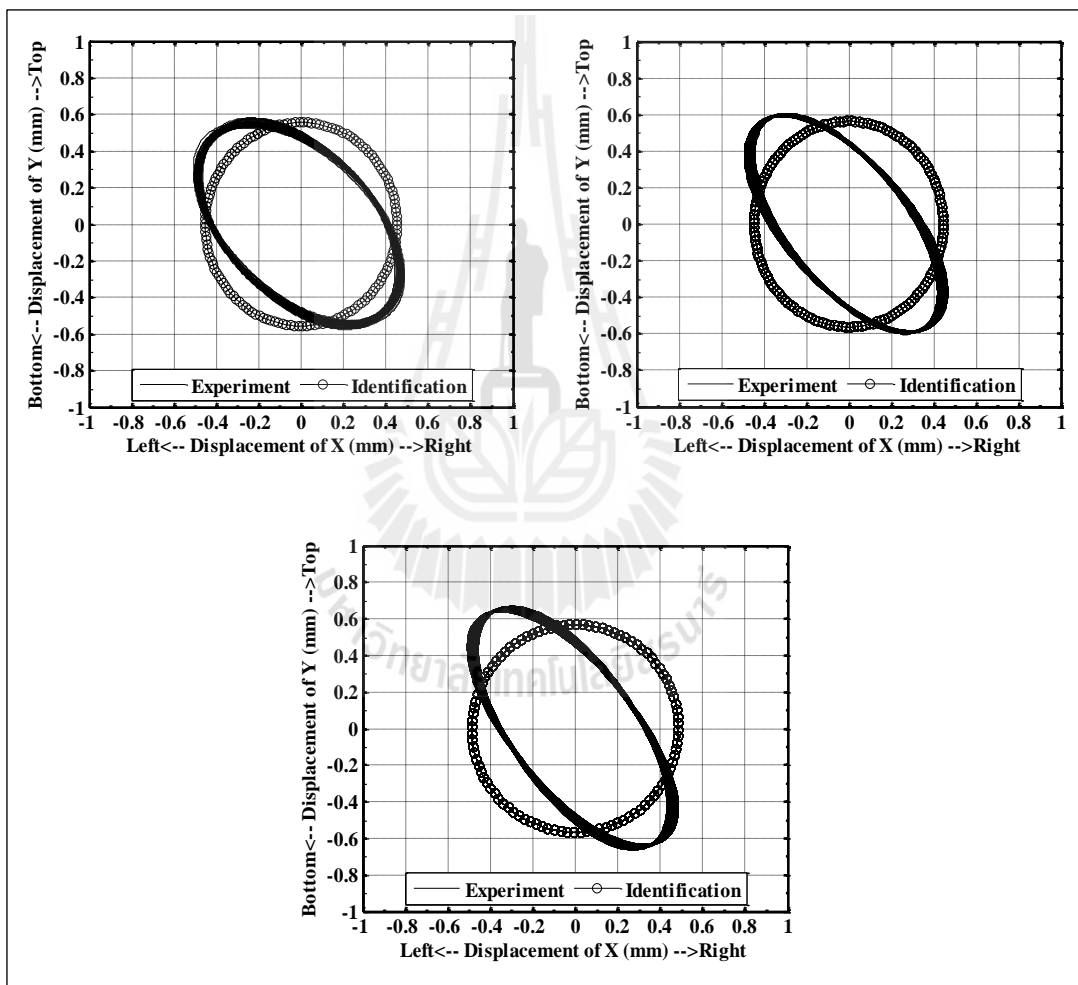
เมื่อ  $\omega_n = \sqrt{\frac{k_{est}}{m_{est}}} = 202.59 \text{ rad / sec}$

และ  $\zeta = \frac{c}{2m_{est}\omega_n} = 0.0389$

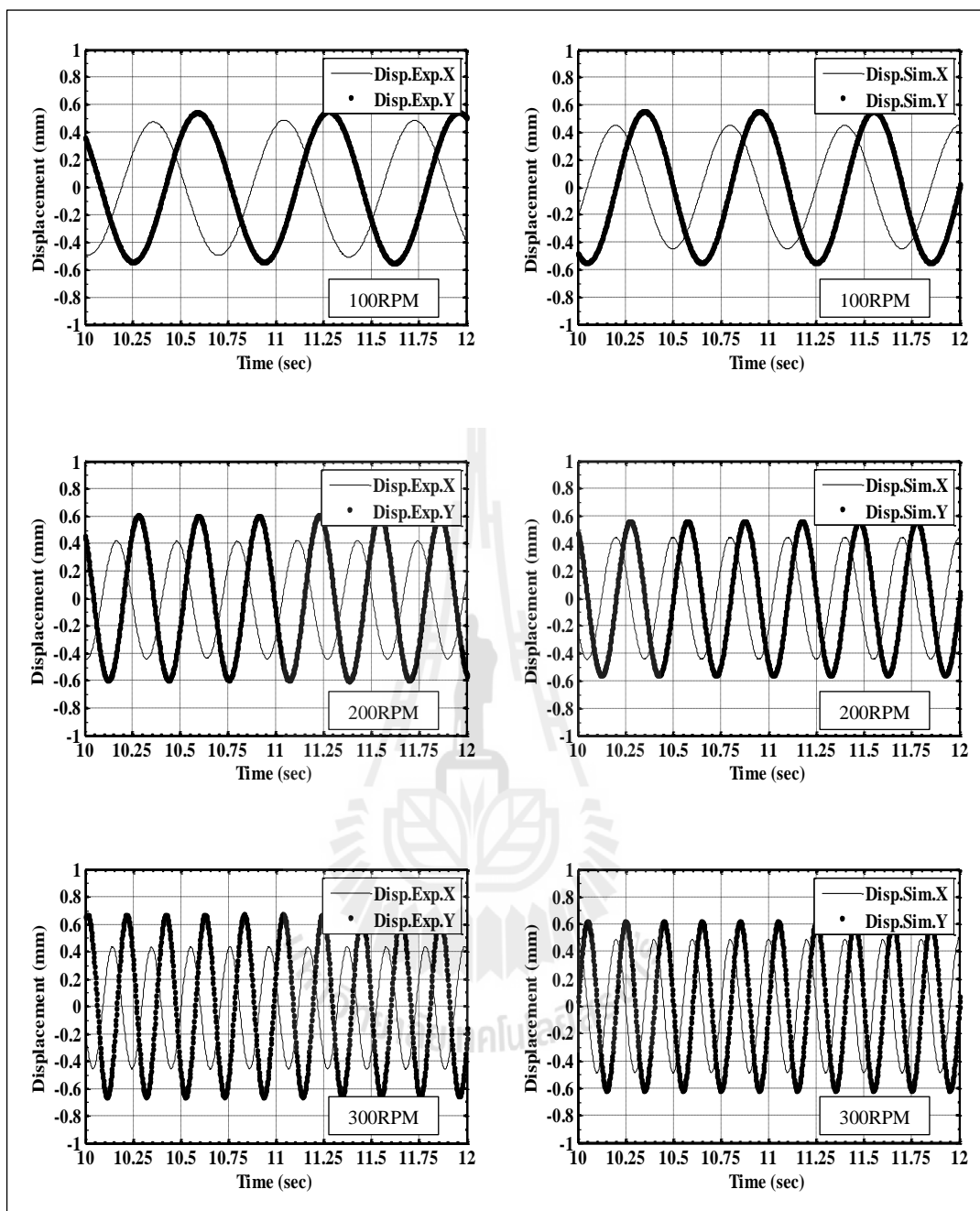
สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$G_{p,est}(s) = \frac{0.4942}{s^2 + 15.76s + 41,043} \quad (4.2)$$

เมื่อนำผลที่ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนแล้วป้อนกลับด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณมาพล็อตเป็นคู่อันดับ x และ y ก็จะได้ วงโคจรการหมุน หรือ Orbit



รูปที่ 4.4 วงโคจรการหมุนเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ประมาณค่ากับผลการทดลอง  
ที่ 100 200 และ 300 PRM



รูปที่ 4.5 แสดงการกระจัดในทิศทาง x และ y เทียบระหว่างผลการทดลองกับระบบที่ประมาณค่าที่ 100 200 และ 300 PRM

จากรูปที่ 4.4 เป็นวงโคจรการหมุนซึ่งเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ประมาณค่ากับผลการทดลอง และรูปที่ 4.5 แสดงการกระจัดในทิศทาง x และ y เทียบระหว่างผลการทดลองกับระบบที่ประมาณค่าที่ 100 200 และ 300 PRM ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการประมาณค่า



มุมขนาดของแอมพลิจูดหรือการกระจัดที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง และมีลักษณะเป็นรูปวงกลมอธิบายได้ว่า ในทางทฤษฎีความต่างเฟสของการสั่นในทิศทาง  $x$  และ  $y$  จะอยู่ที่  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) คือเส้นสี่ค่า แต่สำหรับผลที่ได้จากการทดลองจะมีการบิดตัวของวงโคจรการหมุนและมีลักษณะเป็นรูปวงรี ซึ่งบิดตัวอยู่ใน Quadrant 2 คืออยู่ในช่วง  $\pi/2$  ถึง  $\pi$  และ Quadrant 4 คืออยู่ในช่วง  $3\pi/2$  ถึง  $2\pi$  อาจเป็นผลมาจากความต่างเฟสที่เกิดขึ้น และจากการประมาณค่าแบบจำลอง จะเห็นได้ว่า มีเทอมของแรงที่มากกระทำกับระบบ ซึ่งจะชดเชยกลับไปแบบจำลอง ดังนั้นในลำดับต่อไปเราจะทำการพิจารณามุมเฟสที่เกิดขึ้น

## 4.2 การประมาณค่าความต่างเฟส

การประมาณค่าจากแบบจำลองนั้นเป็นเพียงการประมาณค่าแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นทั้งระบบ ซึ่งไม่สามารถประมาณค่ามุมเฟสที่เกิดขึ้นจริงได้ เนื่องจากระบบจริง เมื่อทำการรันระบบจะใช้วิธีเปิด - ปิดสวิตช์ด้วยมือ (Manual) จึงทำให้การวัดค่ามุมเฟสที่ได้ไม่ตรงกับเฟสที่จะใช้ในการอ้างอิงที่ได้จำลองขึ้นด้วยโปรแกรม Simulink จึงส่งผลให้ที่ ณ ตำแหน่งเวลาใด ๆ ของระบบจริงไม่สามารถเทียบกับการจำลองได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการเก็บสัญญาณแล้วหาช่วงเวลาต่างเฟส

จากรูปที่ 4.5 แสดงแอมพลิจูดหรือการกระจัดในทิศทาง  $x$  และ  $y$  แสดงด้วยเส้นสีแดงและสีน้ำเงิน ที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM ตามลำดับ โดยระบุตำแหน่งเวลาตัดคาบการสั่นที่ศูนย์ หรือการเคลื่อนที่ 1 รอบคลื่นการสั่น (1 คาบ) ซึ่งอธิบายตำแหน่งต่าง ๆ ได้ดังนี้

- ตำแหน่งที่ 1 จุดเริ่มต้นจุดตัด 1 คาบการสั่นในทิศทาง  $x$
- ตำแหน่งที่ 2 จุดเริ่มต้นจุดตัด 1 คาบการสั่นในทิศทาง  $y$
- ตำแหน่งที่ 3 จุดตัดครึ่งคาบการสั่นในทิศทาง  $x$
- ตำแหน่งที่ 4 จุดสิ้นสุดจุดตัด 1 คาบการสั่นในทิศทาง  $x$
- ตำแหน่งที่ 5 จุดสิ้นสุดจุดตัด 1 คาบการสั่นในทิศทาง  $y$

โดยค่าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบคลื่นการสั่น

ความเร็วรอบ (RPM)	ตำแหน่งเวลา (sec)				
	1	2	3	4	5
100	10.19	10.42	10.53	10.88	11.11
200	10.41	10.52	10.56	10.72	10.83
300	10.30	10.37	10.40	10.50	10.58

จากตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงผลเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบคลื่นการสั่นในทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM จะมีคาบการสั่นในทิศทาง x คือ (ตำแหน่งที่ 4) ลบ (ตำแหน่งที่ 1) และมีคาบการสั่นในทิศทาง y คือ (ตำแหน่งที่ 4) ลบ (ตำแหน่งที่ 1) ดังนี้

- ที่ 100 RPM มีคาบการสั่นทั้ง x และ y

จากการทดลองเท่ากับ 0.69 วินาที

$$\text{จากการคำนวณเท่ากับ } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{(100/60)} = 0.6 \text{ วินาที}$$

- ที่ 200 RPM มีคาบการสั่นทั้ง x และ y

จากการทดลองเท่ากับ 0.31 วินาที

$$\text{จากการคำนวณเท่ากับ } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{(200/60)} = 0.3 \text{ วินาที}$$

- ที่ 300 RPM มีคาบการสั่นทั้ง x และ y

จากการทดลองเท่ากับ 0.2 วินาที

$$\text{จากการคำนวณเท่ากับ } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{(300/60)} = 0.2 \text{ วินาที}$$

จากผลการหาคาบการสั่นจากการทดลองและคำนวณที่ได้ พิจารณาได้ว่า

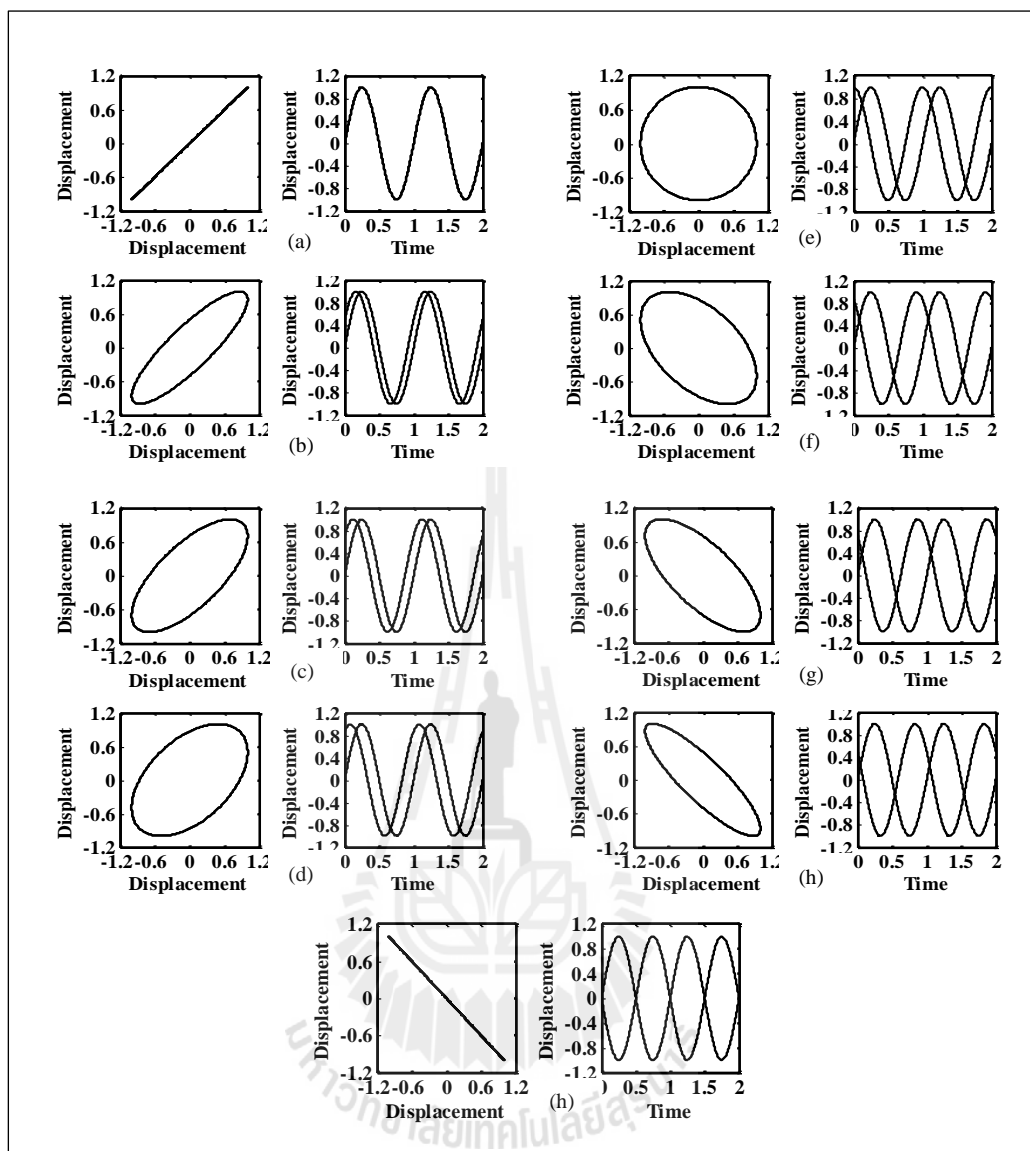
1. ผลที่ได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบต่าง ๆ จะมีคาบการสั่นคงที่ในทิศทาง x และ y
2. คาบการสั่นที่ได้จากการทดลองจะช้ากว่าค่าที่ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีค่าสูงสุดที่ 100 RPM แล้วลดลงที่ความเร็วรอบสูงขึ้น ในลำดับต่อไปเราจะทำการพิจารณาความต่างเฟสซึ่งหาได้จากการวัดความต่างเฟสของสัญญาณ

#### 4.2.1 หาเฟสการสั่นด้วยวิธีการลิสซาจูลส์

วิธีการลิสซาจูลส์ (Lissajous Figure) ใช้การพิจารณาวงโคจรการหมุน x-y กรณีที่เราป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ต่างกันเข้าที่แกน x และแกน y จะได้เส้นกราฟที่มีรูปแบบ (Pattern) กำหนดจากค่าอัตราส่วนความถี่และค่าความต่างเฟสของสัญญาณขาเข้าทั้งสอง ซึ่งในกรณีนี้เราอาจเขียนสัญญาณที่ป้อนเข้าแกน x และ y เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} x &= A \sin(\omega t) \\ y &= B \sin(\omega t + \theta) \end{aligned} \tag{4.3}$$

$\theta$  เป็นค่ามุมเฟสของสัญญาณ



รูปที่ 4.6 รูปแบบของ Lissajous ของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่เท่ากันแต่มีเฟสต่างกันในกรณีต่าง ๆ

(a)  $\theta = 0$ , (b)  $\theta = \pi/6$ , (c)  $\theta = \pi/4$ , (d)  $\theta = \pi/3$ , (e)  $\theta = \pi/2$

(f)  $\theta = 3\pi/2$ , (g)  $\theta = 3\pi/4$ , (h)  $\theta = 5\pi/6$  และ (i)  $\theta = \pi$

การเกิด Lissajous Figures ในกรณีที่สัญญาณไซน์ที่ป้อนเข้าแกน x และ y มีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากันแต่มีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  ซึ่ง Lissajous Figures ที่ได้จะมีลักษณะเป็นวงกลม แต่ถ้าแอมพลิจูดของสัญญาณไซน์ทั้งสองมีค่าต่างกันจะได้รูปแบบที่เป็นวงรี และแสดง Lissajous Figures รูปแบบต่าง ๆ เมื่อมีความถี่เท่ากันแต่มีความต่างเฟสต่าง ๆ กันดังรูปที่ 4.6

#### 4.2.2 หาเฟสการสั่นด้วยการชดเชยเวลาประวิง

เนื่องจากระบบที่มีเวลาประวิง (Delay Time) เวลาประวิงจะปรากฏในฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปของพจน์  $e^{-t_d s}$  ซึ่ง  $t_d$  คือช่วงเวลาประวิง ที่มีหน่วยเป็นวินาที ซึ่งสามารถเปรียบเทียบด้วยการประมาณพจน์  $e^{-t_d s}$  ด้วยพหุนาม กล่าวคือ

$$G_d(s) = e^{-t_d s} = 1 - t_d s + \frac{(t_d s)^2}{2!} - \frac{(t_d s)^3}{3!} + \dots + (-1)^k \frac{(t_d s)^k}{k!} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $k = 0, 1, 2, \dots$

ซึ่งมีความจำเป็นในทางปฏิบัติว่า จะต้องตัดทอนพจน์ของ  $s$  ยกกำลังสูงทางขวาของสมการ ในฟังก์ชันถ่ายโอนให้เหมาะสม นั้นหมายความว่า เมื่อประมาณพจน์  $e^{-t_d s}$  ด้วยพหุนามของ  $s$  แล้วฟังก์ชันถ่ายโอน จะมีจำนวนซีโรเกินจำนวนโพลไม่ได้ เมื่อฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเทียบเท่าโรเตอร์ เป็นอันดับสอง

$$G_p(s) = \frac{0.4942}{s^2 + 15.76s + 41,043} \quad (4.5)$$

กำลังสูงสุดที่ประมาณค่าจาก  $e^{-t_d s}$  จะเกินสองไม่ได้ ซึ่งหมายความว่าอาจเลือกประมาณพจน์  $e^{-t_d s}$  ด้วยพหุนาม  $s$  กำลัง แต่อาจส่งผลให้มีค่าผิดพลาดจากการประมาณค่าขึ้น ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนเมื่อประมาณ  $e^{-t_d s}$  ด้วย  $s$  กำลังสองซึ่งต้องการให้เวลาประวิงก่อนคาบการสั่น  $t_d$  จึงมีค่าเป็นลบและมีรูปแบบดังนี้

$$G_p(s)G_d(s) = \frac{0.4942(0.5t_d^2 s^2 + t_d s + 1)}{s^2 + 15.76s + 41,043} \quad (4.6)$$

#### 4.2.3 หาเฟสการสั่นด้วยตัวชดเชย ITAE

การออกแบบตัวชดเชยด้วย ITAE นั้นเหมาะสำหรับระบบที่มีการตอบสนองเนื่องจากสัญญาณอินพุตที่เป็นฟังก์ชันที่มีค่าโอเวอร์ชูต (Overshoot) ไม่มากนักหรือเหมาะสำหรับการตอบสนองที่มีการแกว่ง (Oscillating) ที่มีลักษณะการหน่วงที่ดี ตารางที่ 2.1 เป็นตารางแสดงรูปแบบของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบปิด ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของสมการลักษณะเฉพาะ

นั้นหาได้จากวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ค่าบรรจบนี้สมรรถนะที่เป็นแบบ ITAE ซึ่งมีสมการบรรจบนี้สมรรถนะดังนี้

$$J = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (4.7)$$

โดยที่  $e(t)$  เป็นสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณคำสั่งกับสัญญาณเอาต์พุตที่วัดจากระบบที่กำลังควบคุม อย่างไรก็ตามถ้าสัญญาณค่าความผิดพลาด  $e(t)$  นี้ไม่เป็นศูนย์เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  แล้วค่าบรรจบนี้จะมีค่าสูงสุดหรืออาจจะเป็นค่าอนันต์ ทำให้เป้าหมายที่ตั้งไว้ไม่เป็นจริง เป้าหมายของการออกแบบคือต้องการให้บรรจบนี้มีค่าน้อยที่สุดหรือค่า  $e(t)$  จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป บางครั้งอาจกำหนดค่าขอบเขตของเวลาเพื่อให้เป้าหมายหรือค่าบรรจบนี้มีความเป็นจริง ดังนั้นขอบเขตของเวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตจะต้องเปลี่ยนจาก  $\infty$  ไปเป็นค่าเวลาสุดท้าย โดยทำการทดสอบตัวชดเชยเฟส ITAE ดังนี้

เลือกให้ความถี่ธรรมชาติ  $\omega_n$  ของตัวชดเชยเฟส ITAE เท่ากับ 1 เมื่อพิจารณา ระบบ 2<sup>nd</sup> Order และระบบ 3<sup>rd</sup> Order

$$G_{c,pha}(s) = s^2 + 1.4s + 1 \quad (4.8)$$

$$G_{c,pha}(s) = s^3 + 1.75s^2 + 2.15s + 1 \quad (4.9)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยเฟส ITAE 3<sup>rd</sup> Order ซึ่งมีปริมาณเชิงซ้อนคือ

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| \angle \phi(\omega) \quad (4.10)$$

เมื่อได้ข้อมูลทางขนาดของ  $G(j\omega)$  จะนำไปผ่านการหาค่าล็อกการิทึมฐาน 10 เสียก่อนที่จะนำไปวาดแผนภาพโบด (Bode Diagram) โดยใช้สมการที่ (4.11)

$$\text{ขนาดที่มีหน่วย } dB = 20 \log_{10} |G(j\omega)| \quad (4.11)$$

ขนาดในที่นี่อาจเรียกว่า อัตราขยาย (Gain) ก็ได้ ส่วนข้อมูลทางเฟสหรือมุมเฟส  $\phi$  ของ  $G(j\omega)$  นิยมคงหน่วยเป็นองศาตามปกติ เมื่อนำมาวาดกราฟเทียบกับความถี่  $\omega$  บนกราฟที่เป็นมาตราส่วนแบบลอการิทึมตามแกนนอน และมีมาตราส่วนเชิงเส้นตามแนวแกนตั้งเมื่อพลอตแผนภาพโบด (Bode Diagram) ดังรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าระบบ  $2^{\text{nd}}$  Order จะมีการเปลี่ยนเฟสอยู่ในช่วง 0 ถึง 180 องศาและระบบ  $3^{\text{rd}}$  Order จะมีการเปลี่ยนเฟสอยู่ในช่วง 0 ถึง 270 องศา ดังรูปที่ 4.11 ต่อจากนั้นเราจะทำการพิจารณาว่าระบบไหนจะสามารถนำไปชดเชยเฟสให้กับทั้งระบบได้โดยดูจากวงโคจรของการบิดตัวของการสั้นของผลที่ได้จากการทดลองจะอยู่ใน Quadrant 2 และ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบของ Lissajous Figure ของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่เท่ากัน แต่มีเฟสต่างกันจะอยู่ Quadrant 2 และ 4 เหมือนกัน ซึ่งหมายถึงว่า หากต้องการชดเชยเฟสจะต้องป้อนสัญญาณทิศทาง x และ y ในช่วง  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) ถึง  $\pi$  ( $180^\circ$ ) และในช่วง  $3\pi/2$  ( $270^\circ$ ) ถึง  $2\pi$  ( $360^\circ$ ) จึงจำเป็นต้องใช้การชดเชยเฟสด้วย ITAE ที่เป็น  $3^{\text{rd}}$  Order แต่เมื่อพิจารณาขนาดของ Magnitude ที่ความเร็วรอบ 100 ถึง 300 RPM จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ตัวชดเชยเฟสด้วยระบบ  $3^{\text{rd}}$  Order จะมีขนาด Magnitude หรือแอมพลิจูดการสั้นเพิ่มขึ้นดังนั้น จึงต้องหารกลับด้วยอัตราขยายซึ่งหาได้จากแผนภาพโบดแล้วคำนวณกลับมาเป็นอัตราขยายดังนี้

- ที่ 100 RPM หรือ 10.47 rad/s มีค่า Magnitude เท่ากับ 60.9 dB

$$20\log_{10}|G(j\omega)| = 60.9\text{dB}$$

ดังนั้นที่ 100 RPM จะมีค่าอัตราขยาย  $|G(j\omega)| = 1,100$

- ที่ 200 RPM หรือ 20.94 rad/s มีค่า Magnitude เท่ากับ 78.1 dB

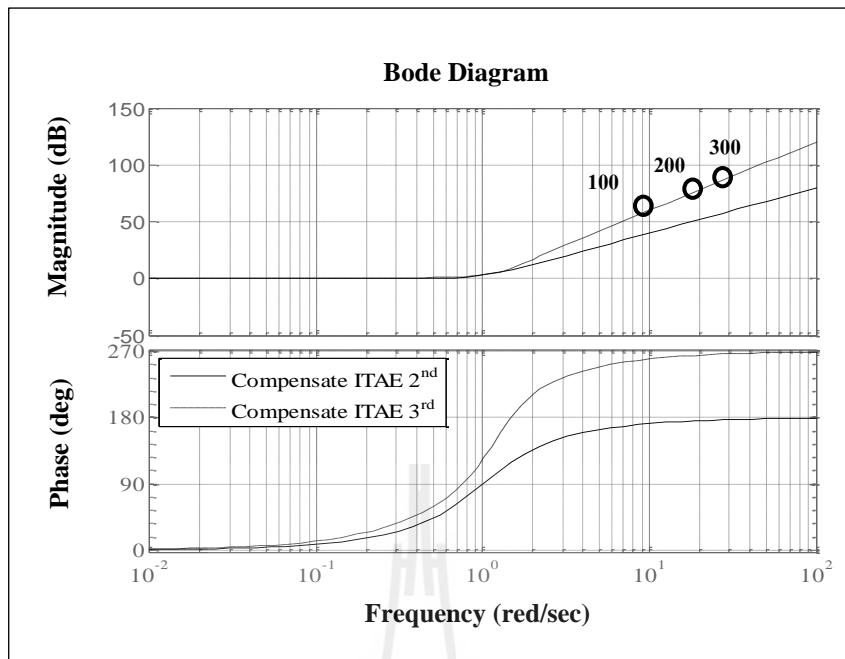
$$20\log_{10}|G(j\omega)| = 78.1\text{dB}$$

ดังนั้นที่ 200 RPM จะมีค่าอัตราขยาย  $|G(j\omega)| = 8,035$

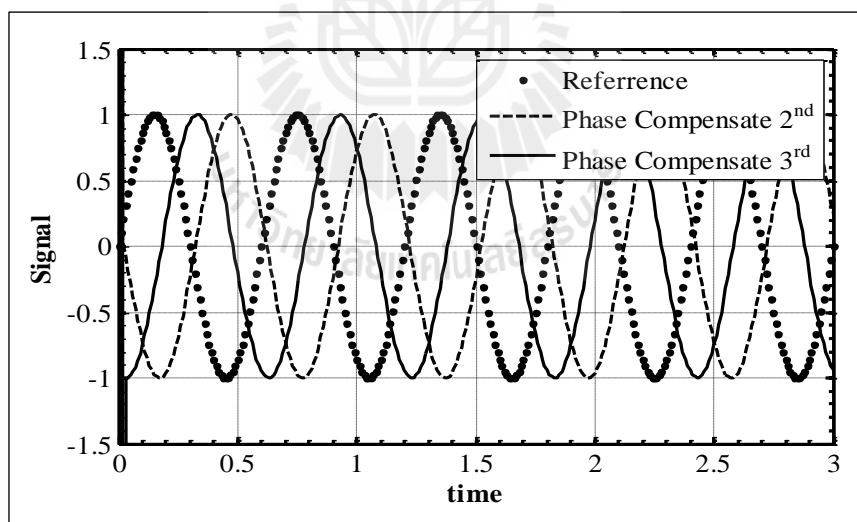
- ที่ 300 RPM หรือ 31.41 rad/s มีค่า Magnitude เท่ากับ 89.7 dB

$$20\log_{10}|G(j\omega)| = 89.7\text{dB}$$

ดังนั้นที่ 300 RPM จะมีค่าอัตราขยาย  $|G(j\omega)| = 30,550$



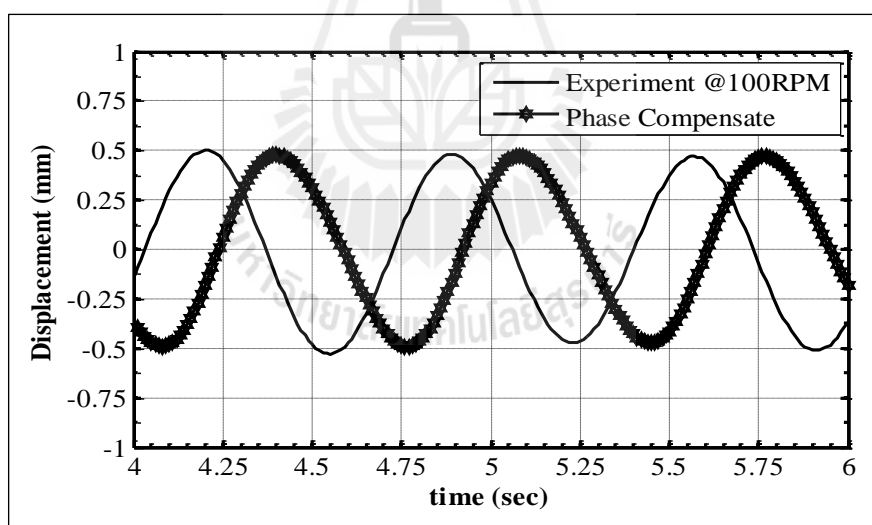
รูปที่ 4.7 แสดงแผนภาพโบดของตัวชดเชยเฟสแบบ ITAE



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบผลการตอบสนองทางพลวัตของสัญญาณที่มีการใช้ตัวชดเชยเฟสแบบ ITAE

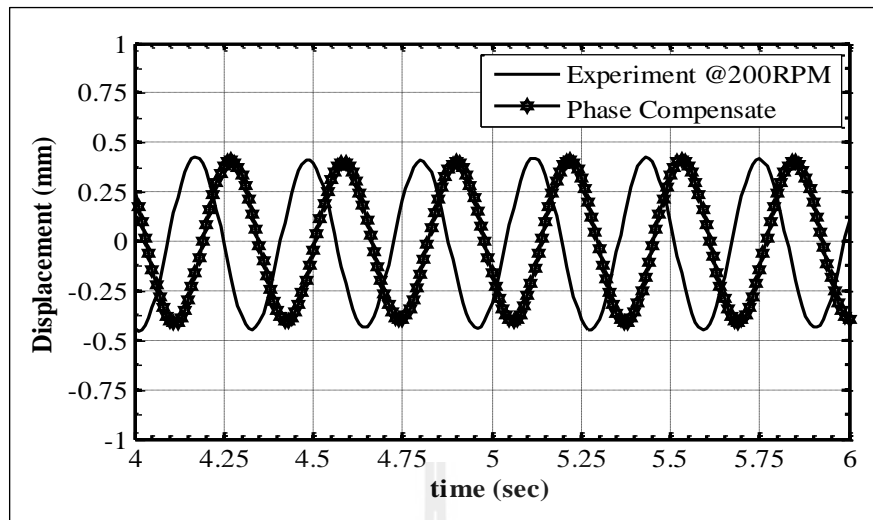
จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีสัญญาณที่มีความถี่ค่าหนึ่ง ในที่นี้จำลองให้เท่ากับความเร็วรอบ 100 RPM เมื่อเคลื่อนที่ครบ 1 คาบจะใช้เวลา 0.6 วินาที เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้ผ่านตัวชดเชยเฟสที่เป็นแบบ ITAE ทั้งอันดับ 2 และ 3 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ตัวชดเชยเฟส ITAE 2<sup>nd</sup> Order แสดงด้วยเส้นสีฟ้า การตอบสนองต่อเฟสของสัญญาณที่ได้จากการทดลองจะมีเฟสตรงกันข้ามกัน ซึ่งอธิบายได้ด้วยแผนภาพโบนในรูปที่ 4.7 ถ้าย่านความถี่น้อยกว่า 1 ค่าเฟสจะลู่เข้าหา  $0^\circ$  แต่ถ้าย่านความถี่มากกว่า 1 ค่าเฟสจะลู่เข้าหา  $180^\circ$  ซึ่งที่ความถี่ประมาณ 10 rad/sec (100 RPM) จะได้เฟสเข้าใกล้  $180^\circ$  ทำให้ผลของเฟสที่ผ่านตัวชดเชยเฟสมีการกลับเฟส หรือคาบเวลาเลื่อนออกไปครึ่งคาบเวลาเท่ากับ 0.3 วินาที แต่สำหรับตัวชดเชยเฟส ITAE 3<sup>rd</sup> Order แสดงด้วยเส้นสีแดง ความถี่ประมาณ 10 rad/sec จะลู่เข้าใกล้  $270^\circ$  ทำให้คาบเวลาเลื่อนออกไป 0.2 วินาที ด้วยเหตุผลนี้เองทำให้มีความจำเป็นต้องใช้ตัวชดเชยเฟสอันดับ 3

ในลำดับต่อไปจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มตัวชดเชยเฟสเข้าไปจะสามารถตอบสนองต่อพฤติกรรมทางพลวัตของสัญญาณการสั่นที่วัดได้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบกับสัญญาณการสั่นจากการทดลองที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 – 4.11

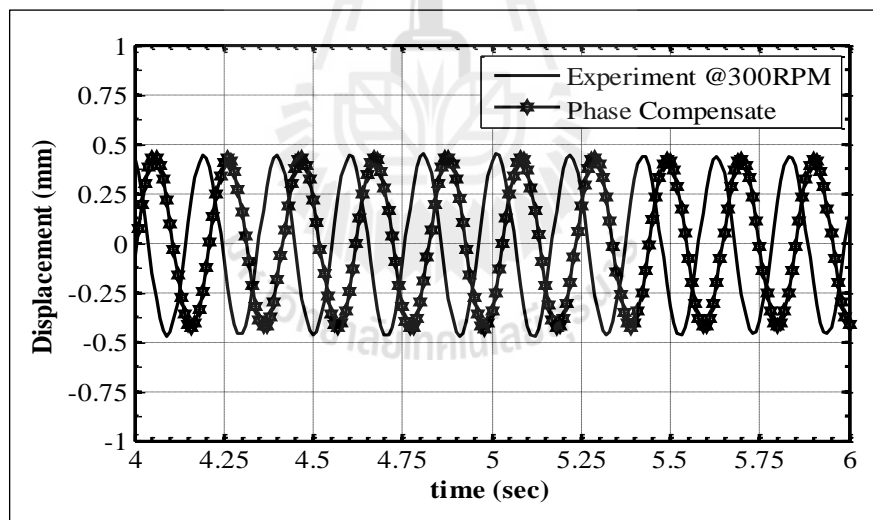


รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองทางพลวัตของสัญญาณที่มีการใช้ตัวชดเชยเฟสที่ความเร็วรอบ 100 RPM





รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองทางพลวัตของสัญญาณที่มีการใช้ตัวชดเชยเฟส  
ที่ความเร็วรอบ 200 RPM



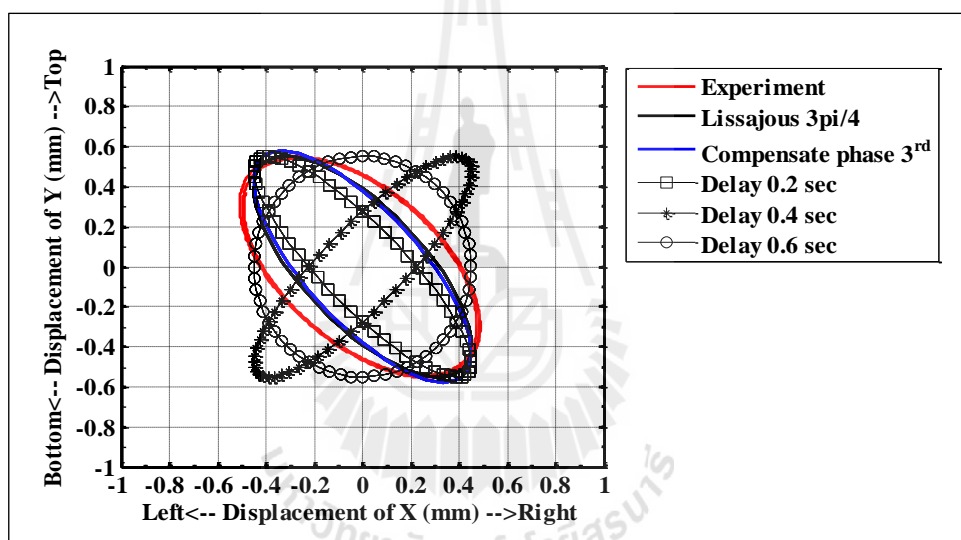
รูปที่ 4.11 ผลการตอบสนองทางพลวัตของสัญญาณที่มีการใช้ตัวชดเชยเฟส  
ที่ความเร็วรอบ 300 RPM

จากรูปที่ 4.9–4.11 ผลที่ได้คือ ที่ความเร็วรอบ 100 RPM หรือคาบการสั่น  
ที่ 0.6 วินาที มีการเลื่อนเฟสไปที 0.167 วินาที ที่ 200 RPM หรือ 0.3 วินาที มีการเลื่อนเฟสไป  
ที 0.082 วินาทีและที่ 300 RPM หรือ 0.2 วินาที มีการเลื่อนเฟสไปที 0.055 วินาที ซึ่งการเลื่อนเฟสนี้

เป็นผลมาจากตัวชดเชยที่ใช้ ซึ่งสามารถตอบสนองต่อพฤติกรรมทางพลวัตในช่วง 100 ถึง 300 RPM ได้เป็นอย่างดี

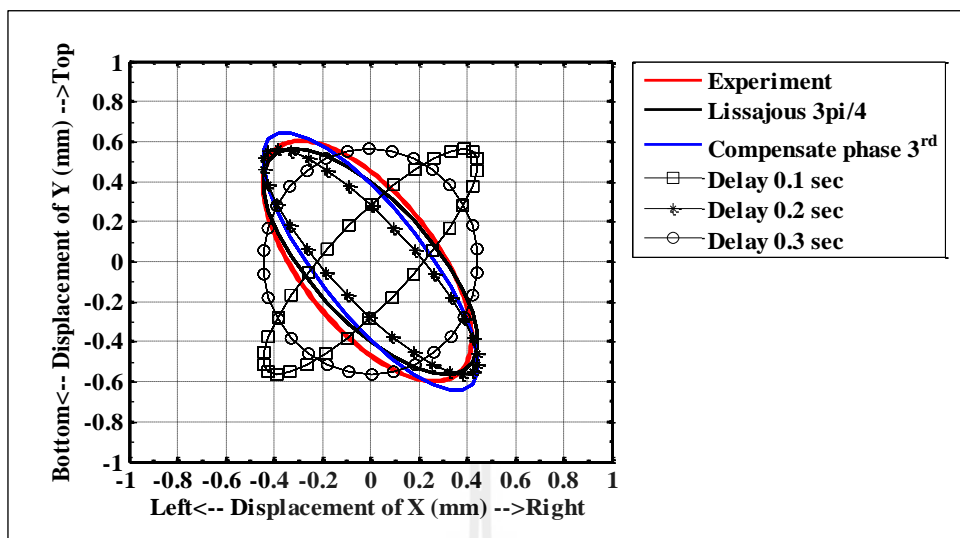
จากรูปที่ 4.12 – 4.14 เป็นวงโคจรการหมุนซึ่งเปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ 100 200 และ 300 RPM (แสดงด้วยเส้นสีแดง) กับวิธีการ Lissajous Figure (แสดงด้วยเส้นสีดำ) และการชดเชย Delay Time ให้กับระบบเทียบเท่า (แสดงด้วยเส้นสีดำที่มีสัญลักษณ์) ซึ่งจะชดเชย Delay Time ดังนี้

1. ที่ความเร็วรอบ 100 RPM ชดเชยที่เวลา 0.2, 0.4 และ 0.6 วินาที
2. ที่ความเร็วรอบ 200 RPM ชดเชยที่เวลา 0.1, 0.2 และ 0.3 วินาที
3. ที่ความเร็วรอบ 300 RPM ชดเชยที่เวลา 0.025 ,0.1 และ 0.1275 วินาที

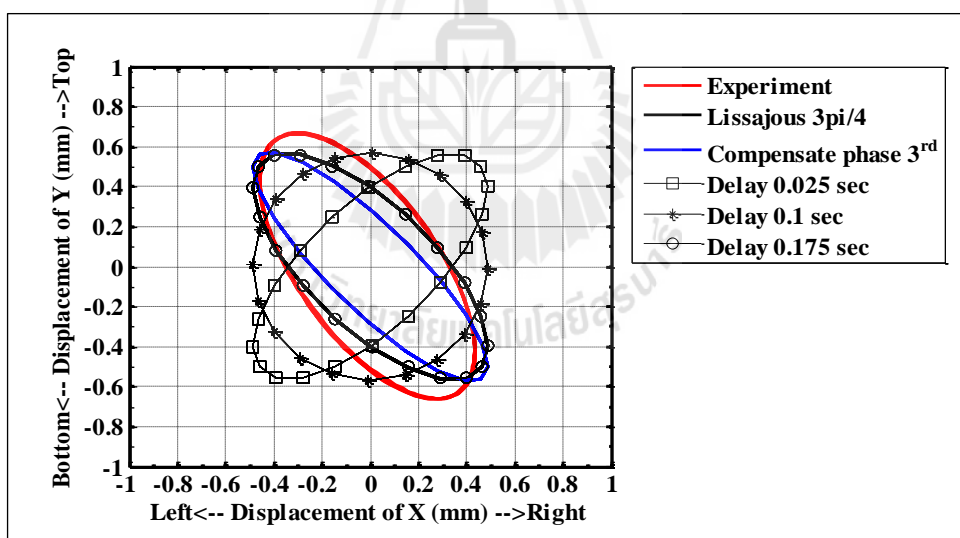


รูปที่ 4.12 วงโคจรเปรียบเทียบการทดลองกับวิธีการ Lissajous, ITAE และ Delay Time ที่ 100 RPM

ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองทางพลวัตต่อสัญญาณการสั่นที่เกิดขึ้นจากการวัดที่ได้จากวิธีการ Lissajous Figure จะมีมุมเฟสอยู่  $3\pi/4$  ( $270^\circ$ ) ซึ่งอยู่ในมุมเฟสเดียวกับผลที่ได้จากการทดลองแต่ขนาดแอมพลิจูดเล็กกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับ การชดเชย Delay Time กับระบบเทียบเท่าจะมีเฟสตรงกันที่ Delay Time เท่ากับ 0.2 วินาที ที่ความเร็วรอบ 100 และ 200 RPM แต่ที่ความเร็วรอบ 300 RPM จะมีเฟสตรงกันที่ Delay Time เท่ากับ 0.175 วินาที ดังรูปที่ 4.12 – 4.14



รูปที่ 4.13 วงโคจรเปรียบเทียบการทดลองกับวิธีการ Lissajous, ITAE  
และ Delay Time ที่ 200 RPM



รูปที่ 4.14 วงโคจรเปรียบเทียบการทดลองกับวิธีการ Lissajous, ITAE  
และ Delay Time ที่ 300 RPM

เมื่อพิจารณาของตัวชดเชยเฟส ITAE ที่เป็น 3<sup>rd</sup> Order เห็นว่าการตรวจจับเฟสของสัญญาณสามารถอธิบายได้บนโดเมนความถี่ เมื่อมีความถี่มากกว่า 10 rad/sec เฟสของสัญญาณที่ผ่านตัวชดเชยจะลู่เข้า 270° และยังทำให้ผลการตอบสนองบนโดเมนเวลาจึงเลื่อนออก

ไปประมาณ 27 – 30% ของคาบเวลาซึ่งขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ ทำให้สรุปได้ว่า ตัวชดเชยเฟสที่ใช้คือ ITAE ที่เป็น 3<sup>rd</sup> Order สามารถตอบสนองต่อพฤติกรรมทางพลวัตได้ เป็นอย่างดีในช่วงที่กำหนดคือที่ความเร็วรอบ 100 ถึง 300 RPM

### 4.3 การออกแบบตัวควบคุมเพื่อลดแอมพลิจูดการสั่น

การลอยตัวของโรเตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีโรเตอร์ลอยตัว ในอากาศและมีแรงแม่เหล็กไฟฟ้าดึงดูด โดยระยะระหว่างโรเตอร์กับแม่เหล็กไฟฟ้า คือตำแหน่ง อ้างอิงเป็นระยะในตำแหน่งสมดุล แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับโรเตอร์สามารถอธิบายด้วยสมการ ทางพลวัต ตามกฎหมายของนิวตันดังนี้

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = F_{MB}(i, x) \quad (4.12)$$

จากสมการที่ (3.22) และ (4.12) ได้สมการการเคลื่อนที่ดังนี้

$$m\ddot{x} = k_x x + k_i i \quad (4.13)$$

เมื่อประยุกต์ใช้การแปลงลาปลาซ (Laplace's Transform) สมการที่ (4.13)

$$ms^2 X(s) = k_x X(s) + k_i I(s) \quad (4.14)$$

เราสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ คือ

$$G_p(s) = \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{k_i}{ms^2 - k_x} \quad (4.15)$$

จากสมการที่ (4.15) เมื่อพิจารณาสมการลักษณะเฉพาะ (Characteristic Equation)  $ms^2 - k_x = 0$  ได้ว่าระบบวงเปิด (Open Loop) มีรากของสมการคือ  $s_{1,2} = \pm \sqrt{k_x/m}$  ซึ่งมีโพล (Pole) หนึ่งตัวอยู่ทางขวาของแกนจินตภาพ เป็นที่ทราบกันดีว่า ถ้าระบบใด ๆ มีโพลอยู่ทางขวา

ของแกนจินตภาพ ระบบนั้นจะขาดเสถียรภาพ (Unstable) ดังนั้น โรเตอร์ที่รองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็ก เมื่อเป็น Open Loop ต้องมีระบบควบคุม ซึ่งใช้การควบคุมป้อนกลับ (Feedback Control)

จากสมการที่ (4.15) มีค่าพารามิเตอร์ของระบบเพลลาที่รองรับด้านเดียวด้วยแบริ่งแม่เหล็ก แบบ 4 โพลที่ได้ออกแบบไว้ ดังตารางที่ 4.5 ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$G_p(s) = \frac{29.78}{0.8s^2 - 20,420} \quad (4.16)$$

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบเพลลาที่รองรับด้านเดียวด้วยแบริ่งแม่เหล็ก

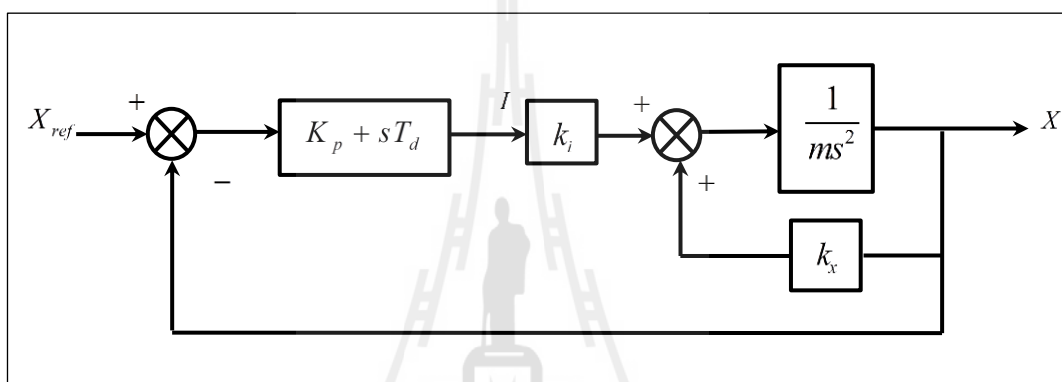
Data	Parameter	Value (unit)
จำนวนรอบการพัน	$n_c$	240 rev
พื้นที่หน้าตัดการพันขดลวด	$A$	$1.05 \times 10^{-3} m^2$
Permeability	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7} V.s / A.m$
Mass Shaft (Measurement)	$m_{shaft}$	0.49 kg
Mass Disk (Measurement)	$m_{disk}$	0.4 kg
Mass Journal (Measurement)	$m_{journal}$	0.248 kg
Length of Shaft (Measurement)	$L$	0.37 m
Diameter of Shaft (Measurement)	$d$	15 mm
Mass rotor (Calculate)	$m_{cal}$	0.8 kg
Initial Current	$i_0$	1.2 A
Nominal Air Gaps	$x_0$	$1.75 \times 10^{-3} m^2$
Magnetic Bearing Constant	$k_M = \frac{\mu_0 A n_c^2}{4}$	$1.9 \times 10^{-5} V.s.m / A$ or 19 $\mu H.m$
Displacement Stiffness	$k_x = k_M \frac{i_0^2}{x_0^3}$	20,420 N / m
Current Stiffness	$k_i = 4k_M \frac{i_0}{x_0^2}$	29.78 N / A

เมื่อพิจารณาสมการลักษณะเฉพาะเท่ากับ  $0.8s^2 - 20,420 = 0$  ได้ว่าระบบวงเปิดมีรากของสมการคือ  $s_{1,2} = \pm 159.76$  ซึ่งมีโพล (Pole) หนึ่งตัวอยู่ทางขวาของแกนจินตภาพ ทำให้ระบบแบริ่งแม่เหล็กนี้ขาดเสถียรภาพ ดังนั้น โรเตอร์ที่รองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็ก เมื่อเป็น Open Loop

ต้องมีระบบควบคุม โดยใช้การควบคุมป้อนกลับ ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้คือ ตัวควบคุม PD โดยมีรูปแบบ ดังสมการที่ 4.17

$$G_c = K_p + sT_d \quad (4.17)$$

เมื่อ  $K_p$  คือ ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P และ  $T_d$  คือ Time Constant ของตัวควบคุมแบบ D สามารถเขียนไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงระบบเบริงแม่เหล็กที่มีตัวควบคุม PD

โดยที่  $X_{ref}$  คือการกระจัดอ้างอิง  $X$  คือการกระจัดของระบบเบริงแม่เหล็กเมื่อมีการควบคุม และ  $I$  คือกระแสควบคุมขดลวดแม่เหล็ก

โดยมี Closed Loop ดังนี้

$$\frac{X}{X_{ref}} = \frac{k_i(K_p + sT_d)}{ms^2 + k_iT_d s + (k_iK_p - k_x)} \quad (4.18)$$

ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถวัดการกระจัด  $X$  ได้โดยตรง ซึ่งสัญญาณที่วัดได้อยู่ในรูปแรงดันและเป็นฟังก์ชันของการกระจัด  $V(x)$  ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$V = k_{sn} X \quad (4.19)$$

โดยมี  $k_{sm}$  เป็นค่าอัตราขยายของเซนเซอร์ มีหน่วยเป็น Vol/m ดังนั้น เมื่อพิจารณาสมการ ลักษณะเฉพาะจะได้ว่า ระบบปิดมีรากของสมการเท่ากับ

$$s_{1,2} = \frac{1}{2m} \left[ -k_i T_d \pm \sqrt{(k_i T_d)^2 - 4m(k_i K_p - k_x)} \right] \quad (4.20)$$

จากสมการที่ (4.20) ทำให้ได้เงื่อนไขของของเสถียรภาพของแบริงแม่เหล็กดังนี้

- ถ้า  $T_d$  เป็นศูนย์ และ  $K_p$  เป็นศูนย์ ได้ว่า

$$s_{1,2} = \frac{1}{2m} \left[ \pm \sqrt{4mk_x} \right] \quad (4.21)$$

ซึ่งตำแหน่งของโพลจะอยู่ทางขวาของแกนจินตภาพ ทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ

- ถ้า  $T_d$  เป็นศูนย์ และ  $k_i K_p - k_x > 0$  ได้ว่า

$$s_{1,2} = \frac{1}{2m} \left[ \pm j \sqrt{4m(k_i K_p - k_x)} \right] \quad (4.22)$$

ดังนั้นจะมีโพล 2 ตัวอยู่บนแกนจินตภาพ ตามทฤษฎีแล้วเงื่อนไขนี้มีเสถียรภาพ

- ถ้า  $T_d$  เป็นบวก และ  $k_i K_p - k_x > 0$  ได้ว่า

$$s_{1,2} = \frac{1}{2m} \left[ -k_i T_d \pm \sqrt{(k_i T_d)^2 - 4m(k_i K_p - k_x)} \right] \quad (4.23)$$

ซึ่งจะมีโพล 2 ตัวอยู่ทางซ้ายของแกนจินตภาพ ทำให้ระบบป้อนกลับนี้มีเสถียรภาพ จากเงื่อนไขข้างต้น แสดงให้เห็นแล้วว่า การใช้ตัวควบคุมป้อนกลับทำให้ระบบแบริงแม่เหล็กมีเสถียรภาพ โดยมีเงื่อนไขของอัตราขยายของตัวควบคุม  $P$  ที่สำคัญต้องกำหนดให้  $K_p > k_x/k_i$

จากสมการที่ (4.18) ได้ว่า

$$\frac{X}{X_{ref}} = \frac{29.78(K_p + sT_d)}{0.8s^2 + 29.78T_d s + (29.78K_p - 20,420)} \quad (4.24)$$

จากเงื่อนไขข้างต้น แสดงให้เห็นแล้วว่า การใช้ตัวควบคุมป้อนกลับทำให้ระบบแบร์ริงแม่เหล็กมีเสถียรภาพ โดยมีเงื่อนไขของค่าอัตราขยายของตัวควบคุม  $P$  ต่ำสุดต้องกำหนดให้  $K_p > 20,420/29.78$  หรือเท่ากับ 686.6 สำหรับค่า  $K_p$  ที่ Gerhard Schweitzer แนะนำคือ กำหนดค่า  $K_p \approx k_x/k_i$  หรือประมาณ 10 เท่าของ  $k_x/k_i$

ลำดับต่อไปเป็นการออกแบบเพื่อเลือกค่า  $T_d$  สามารถพิจารณาได้จากการคำนวณและการประมาณค่า ดังนี้จากการคำนวณลักษณะของเพลลาที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล จะเหมือนกับ Cantilever Beam ที่มีมวลของคานรวมกับมวลที่ติดอยู่กับคานจะได้

$$m_{cal} \approx (m_{journal} + m_{disk}) + 0.23m_{shaft} \quad (4.25)$$

จากตารางที่ 4.5 จะได้ว่า

$$m_{cal} \approx (0.248 + 0.4) + 0.23(0.49) = 0.8 \text{ kg}$$

และค่า  $k$  หาได้จากการคำนวณดังนี้

$$k_{cal} = \frac{3E\pi d^4}{64L^3} \approx 27,900 \frac{N}{m} \quad (4.26)$$

จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ในหัวข้อที่ 4.1 ได้  $m_{est} = 2.0234 \text{ kg}$  และ  $k_{est} = 83,048 \text{ N/m}$  โดยการเลือกค่า  $T_d$  นั้น จะพิจารณาจากสมการลักษณะเฉพาะที่ได้จากสมการที่ (4.24) ซึ่งใช้การเปรียบเทียบในการเลือกตำแหน่งของโพลกับสมการอันดับสองที่เป็นฟังก์ชันของค่าความหน่วง  $\zeta$  และความถี่ธรรมชาติ  $\omega_n$  ของตำแหน่งโพลนั้น ๆ โดยเทียบกับสมการได้ดังนี้

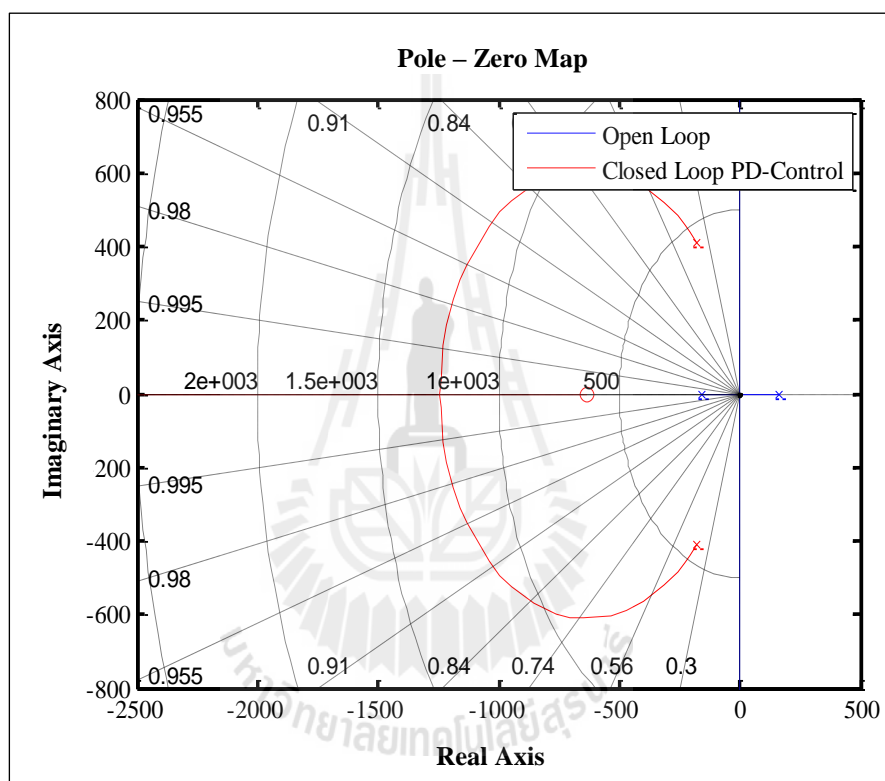
$$0.8s^2 + 29.78T_d s + (29.78K_p - 20,420) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (4.28)$$

โดยกำหนดให้  $\zeta = 0.7$  และ  $\omega_n \approx \sqrt{\frac{k_{cal}}{m_{cal}}} \approx \sqrt{\frac{k_{est}}{m_{est}}} = 200 \text{ rad/sec}$  ทำให้ได้  $T_d = 9.5$



ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ในการควบคุมระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบ 4 โพล จะใช้ตัวควบคุมแอมพลิจูดด้วยตัวควบคุมแบบ PD โดยที่มีค่าสัมประสิทธิ์  $K_p = 6,000$  และ  $T_d = 9.5$  ทั้งการควบคุมในทิศทาง x และ y โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$G_{c,amp}(s) = \frac{282.91s + 178,680}{0.8s^2 + 282.91s + 158,260} \quad (4.29)$$



รูปที่ 4.16 แสดงแผนภาพตำแหน่งของโพลและซีโรของระบบวงเปิดและวงปิดที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 4.16 แสดงแผนภาพตำแหน่งของโพล (Pole) และซีโร (Zero) ของระบบวงเปิดและระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมแอมพลิจูดแบบ PD ซึ่งจะเห็นได้ว่า จากระบบแบริ่งแม่เหล็กที่มีโพล 1 ตัวอยู่ทางขวาของแกนจินตภาพทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเมื่อนำตัวควบคุมแบบ PD เข้ามาควบคุมทำให้ระบบมีเสถียรภาพและเพียงพอในการควบคุมโดยสังเกตได้จากเส้นทางเดินรากที่แสดงด้วยเส้นสีแดงที่มีโพล 2 ตัวและซีโร 1 ตัวอยู่ทางซ้ายของแกนจินตภาพและมีการตัดทางเดินรากไปทางซ้ายของแกนจินตภาพจึงทำให้ระบบจะมีเสถียรภาพ

ในลำดับต่อไป จะเป็นการจำลองควบคุมการสั่นของเพลลาที่รองรับแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพล โดยควบคุมขนาดแอมพลิจูดด้วยตัวควบคุมแบบ PD และตัวชดเชยเฟส ITAE ที่เป็น 3<sup>rd</sup> Order โดยจำลองที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM ซึ่งแรงที่กระทำกับระบบเป็นผลมาจากความเร็วรอบและขนาดของความไม่สมดุลที่ได้จากการประมาณค่า แบ่งการทดลองดังนี้

1. ควบคุมกระแสในทิศทาง x ทิศทางเดียว
2. ควบคุมกระแสในทิศทาง y ทิศทางเดียว
3. ควบคุมกระแสทั้งทิศทาง x และ y

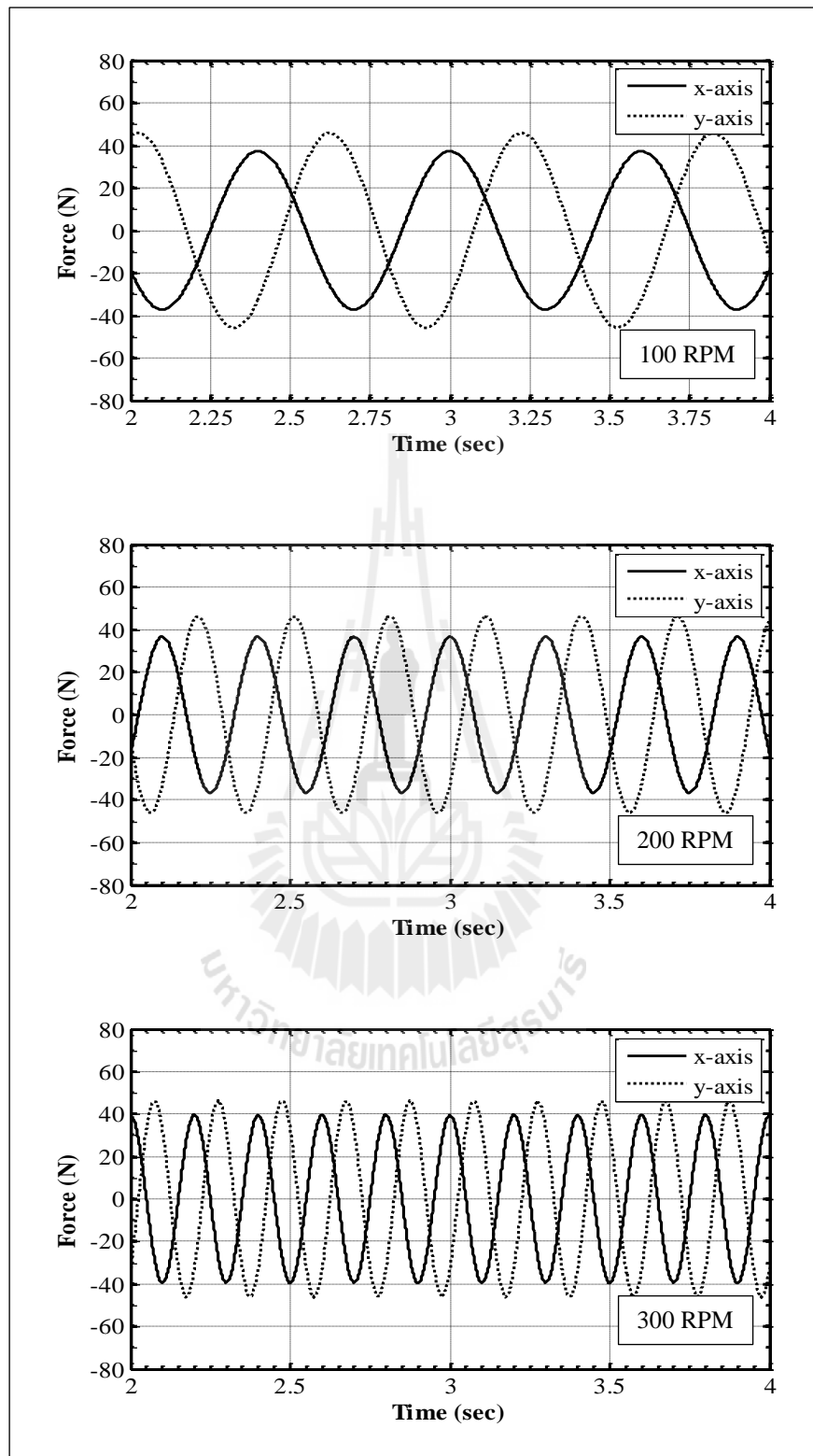
เปรียบเทียบผลการทดลองจากกระแสที่ป้อนให้กับขดลวดทั้งสองทิศทางและพิจารณาวงโคจรการหมุนของเพลลาเมื่อควบคุมกระแสในทิศทางต่าง ๆ ของแต่ละความเร็วรอบ

#### 4.4 ผลทดสอบจำลองควบคุมขนาดแอมพลิจูดด้วยตัวควบคุมแบบ PD และตัวชดเชยเฟสที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM

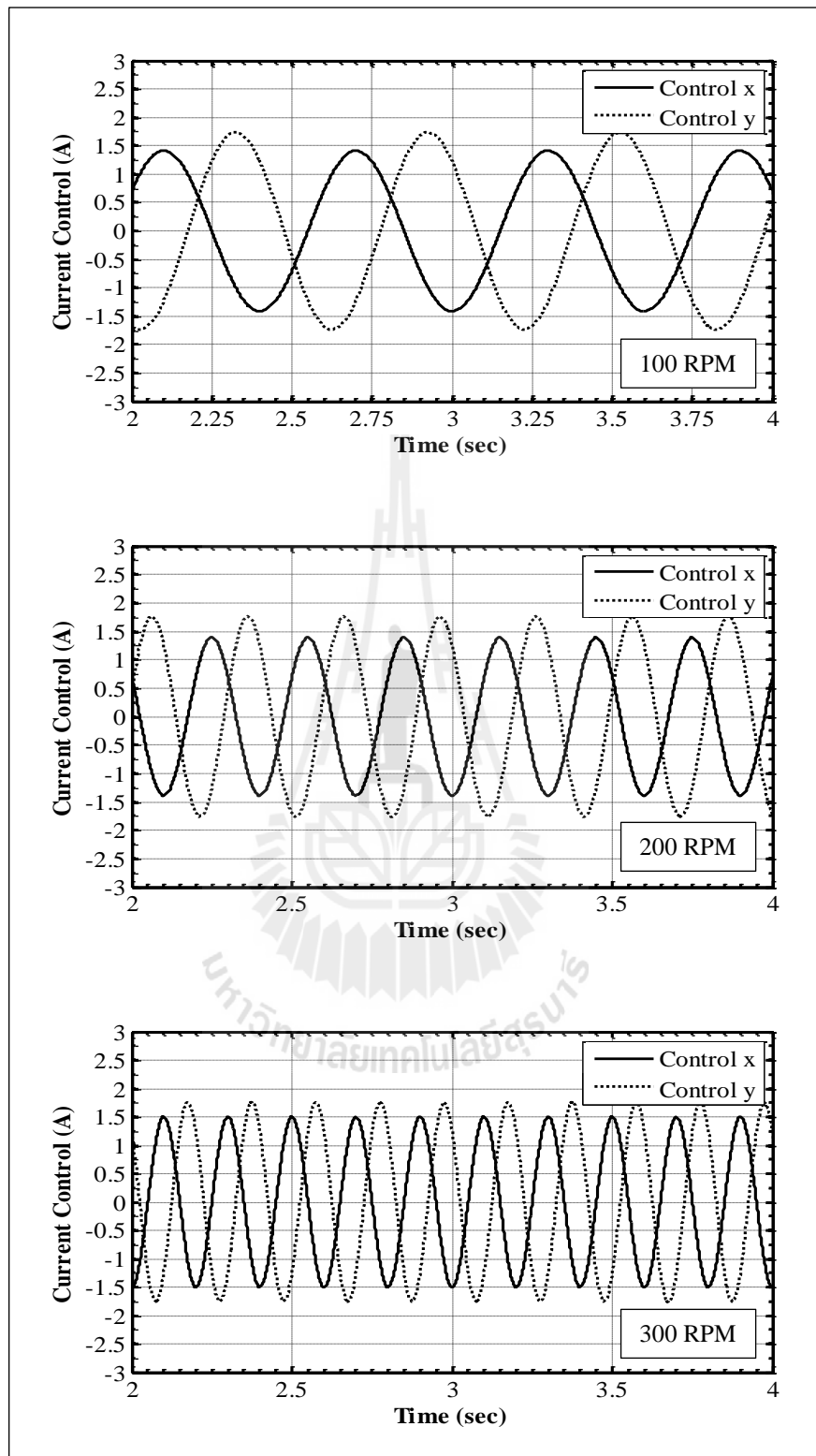
ดังรูปที่ 4.17 แสดงจำลองแรงที่กระทำกับระบบในทิศทาง x และ y ซึ่งมีค่าประมาณ 40 นิวตันในทิศทาง x และ 45 นิวตันในทิศทาง y ที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM เมื่อตัวควบคุมแบบ PD ทำงานจะทำการควบคุมกระแสที่ป้อนให้กับขดลวดในทิศทาง x จะป้อนกระแสเพื่อลดการสั่นที่ 1.5 A และ y 1.8 A สำหรับความเร็วรอบ 100 RPM ในทำนองเดียวกันที่ 200 และ 300 RPM ก็มีลักษณะการควบคุมกระแสเช่นเดียวกับที่ความเร็วรอบ 100 RPM

จากรูปที่ 4.18 แสดงกระแสที่ใช้ในการควบคุมแบริ่งแม่เหล็กในทิศทาง x และ y เมื่อมีแรงมากระทำกับระบบแบริ่งแม่เหล็ก โดยมีขนาดของแรงเป็นผลมาจากความเร็วรอบและขนาดของความไม่สมดุลที่ได้จากการประมาณค่าเท่ากับการประมาณค่าจากแบบจำลองเทียบเท่าที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM

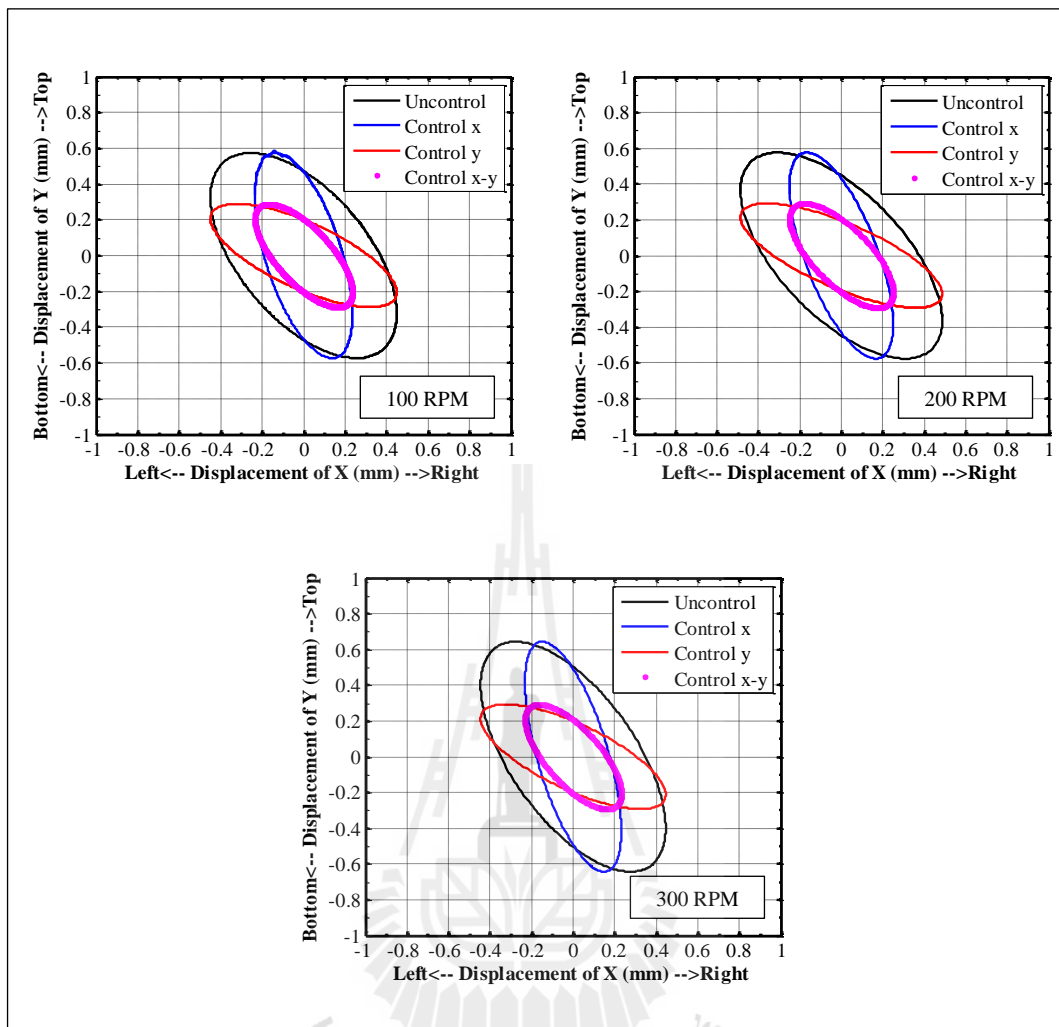
ซึ่งสามารถแสดงวงโคจรการหมุนเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการควบคุมกระแสกับมีการควบคุมที่ 100 RPM ได้ดังรูปที่ 4.19 สรุปได้ว่า การควบคุมกระแสในทิศทาง x เพียงอย่างเดียวทำให้สั่นลดลงจาก 0.45 mm เหลือ 0.25 mm เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะเห็นว่าลดลง 45% และควบคุมกระแสในทิศทาง y เพียงอย่างเดียวทำให้สั่นลดลงจาก 0.60 mm เหลือ 0.30 mm เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะเห็นว่าลดลง 50%



รูปที่ 4.17 แสดงการจำลองแรงที่กระทำกับระบบในทิศทาง x และ y  
ที่ 100 200 และ 300 RPM



รูปที่ 4.18 แสดงผลจำลองการควบคุมกระแสในทิศทาง x และ y  
ที่ 100 200 และ 300 RPM



รูปที่ 4.19 แสดงผลการจำลองวงโคจรการหมุนเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการควบคุม  
กับการควบคุมที่ 100 200 และ 300 RPM

เมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบ 300 RPM ที่มีแรงกระทำกับระบบแบร์ริงแม่เหล็กโดยมีขนาดของแรง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ความเร็วรอบ 100 และ 200 RPM เมื่อตัวควบคุมแบบ PD ทำงานจะทำการควบคุมกระแสที่ป้อนให้กับขดลวดในทิศทาง x ทิศทางเดียว ทิศทาง y ทิศทางเดียวและทั้งทิศทาง x และ y เพื่อลดการสั่นที่เหมือนกับที่ความเร็ว 100 และ 200 RPM ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการควบคุมที่ความเร็วรอบ 100 และ 200 RPM ซึ่งแสดงวงโคจรการหมุนเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการควบคุมกระแสกับการควบคุมที่ 300 RPM ดังรูปที่ 4.19

ผลจากการจำลองควบคุมการสั่นของเพลลาที่รองรับแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพล โดยควบคุมขนาดแอมพลิจูดด้วยตัวควบคุมแบบ PD และตัวชดเชยเฟส ITAE ที่เป็น 3<sup>rd</sup> Order

โดยจำลองที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM ซึ่งแรงที่กระทำกับระบบเป็นผลมาจากความเร็วรอบและขนาดของความไม่สมดุลที่ได้ได้จากการประมาณค่า โดยเปรียบเทียบผลการทดลองจากกระแสที่ป้อนให้กับขดลวดทั้งสองทิศทางและพิจารณาวงโคจรการหมุนของเพลลาเมื่อควบคุมกระแสในทิศทางต่าง ๆ ของแต่ละความเร็วรอบ ผลการควบคุมการจำลองควบคุมกระแสทั้งทิศทาง x และ y สามารถลดการสั่น ได้ 45% ในทิศทาง x และ 50% ในทิศทาง y

#### 4.5 สรุป

จากระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล รองรับด้านเดียวที่มีความซับซ้อนและไม่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดได้โดยตรง จึงต้องทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบเทียบเท่าของโรเตอร์ ที่สามารถทำงานได้ตลอดช่วงการทำงานที่ต้องการ โดยการระบุเอกลักษณ์ในระบบเปิดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในการควบคุมสัญญาณที่เกิดจากการสั่นนั้นสิ่งที่สำคัญก็คือ ตำแหน่งของเวลาที่จะควบคุมจะต้องมีความเหมาะสม เนื่องจากระบบมีอุปสรรคต่าง ๆ จำนวนมากที่ใช้ในการรับส่งของข้อมูลทำให้มีผลกระทบของเรื่อง Delay เข้ามาเกี่ยวข้องอีกทั้งขนาดความถี่ในการเก็บข้อมูลหรือ Sampling Time ก็มีผลต่อการประมาณผลของสัญญาณ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างมากที่จะต้องมีการชดเชย Delay ของทั้งระบบเพื่อให้สามารถควบคุมได้ในตำแหน่งที่ต้องการและขนาดที่เหมาะสม

ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองผลการตอบสนองทางพลวัตต่อสัญญาณการสั่นที่เกิดขึ้นจากการวัดที่ได้จากวิธีการ Lissajous Figure จะมีมุมเฟสอยู่  $3\pi/4$  ( $270^\circ$ ) ซึ่งอยู่ในมุมเฟสเดียวกับผลที่ได้จากการทดลองแต่ขนาดแอมพลิจูดเล็กกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับ การชดเชย Delay Time ให้กับระบบเทียบเท่า จะมีเฟสตรงกันที่ Delay Time เท่ากับ 0.2 วินาที ที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM และเมื่อพิจารณาตัวชดเชยเฟส ITAE ที่เป็น 3<sup>rd</sup> Order ก็สามารถสรุปได้ว่าการตรวจจับเฟสของสัญญาณสามารถอธิบายได้ทั้งบนโดเมนความถี่ ซึ่งจะเห็นว่า เมื่อมีความถี่มากกว่า 10 rad/sec เฟสของสัญญาณที่ผ่านตัวชดเชยจะลู่เข้า  $270^\circ$  ซึ่งทำให้ผลการตอบสนองโดเมนเวลาจึงเลื่อนออกไปประมาณ 27 – 30% ของคาบเวลา โดยขึ้นกับความถี่ของสัญญาณนั้น และการออกแบบตัวควบคุมแอมพลิจูดหรือขนาดเพื่อลดการสั่นที่เกิดขึ้นของระบบนั้น เมื่อพิจารณาสมการลักษณะเฉพาะของระบบวงเปิดซึ่งมีรากของสมการอยู่ที่  $\pm 159.76$  หรือ โพลหนึ่งตัวอยู่ทางขวาของแกนจินตภาพ ทำให้ระบบนั้นจะขาดเสถียรภาพ ดังนั้น โรเตอร์ที่รองรับด้วยแม่เหล็กได้ใช้ตัวควบคุม PD ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองที่ความเร็ว 100 ถึง 300 RPM สามารถลดการสั่นได้ 45% ในทิศทาง x และ 50% ในทิศทาง y

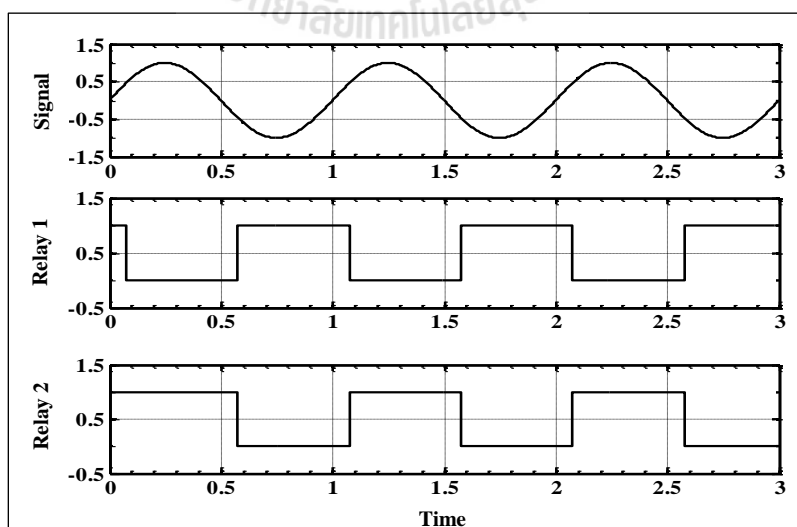
## บทที่ 5

### การทดสอบการลดการสั่นของเพลาดัวยระบบแบร์ริงแม่เหล็ก

#### แบบกระตุ้น 4 โพล ร่องรับด้านเดียว

ในการควบคุมสัญญาณที่ผ่านออกจากตัวควบคุมของระบบซึ่งเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่องทางเวลา ตัวควบคุมจะทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา เพื่อที่จะสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลง เมื่อสัญญาณตัดข้ามผ่านที่จุดศูนย์ ในจุดนี้จะบ่งบอกว่าระบบที่มี Sampling Time ที่สูงจะทำให้ระบบไม่มี Delay เกิดขึ้นหรืออาจเกิดขึ้นน้อยซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อ การควบคุม แต่ถ้ระบบมี Sampling Time ที่ต่ำจะทำให้เกิด Delay ขึ้นในการควบคุม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอวิธีการควบคุมสัญญาณให้อยู่ในรูป ON/OFF Control ซึ่งเป็นพื้นฐานของการควบคุมระบบต่าง ๆ ในการควบคุมแบร์ริงแม่เหล็กนั้น จะใช้หลักการสร้างสัญญาณในทิศทางตรงกันข้ามกับการสั่นนั้น แสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นการแยกสัญญาณการควบคุม ON/OFF ออกเป็น 2 ชุดเพื่อใช้ควบคุม Relay โดยมีเงื่อนไขของสัญญาณแต่ละชุดดังนี้

1. สัญญาณชุดแรก จะอ้างอิงการสั่น ถ้ามากกว่าศูนย์ให้ OFF และถ้าน้อยกว่าศูนย์ให้ ON
2. สัญญาณชุดสอง จะอ้างอิงการสั่น ถ้ามากกว่าศูนย์ให้ ON และถ้าน้อยกว่าศูนย์ให้ OFF ซึ่งสัญญาณทั้งสองชุดจะป้อนให้กับแบร์ริงแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามกับการสั่นนั้น ๆ



รูปที่ 5.1 แสดงการควบคุม Relay ON/OFF

## 5.1 เครื่องมือทดลองและการติดตั้ง

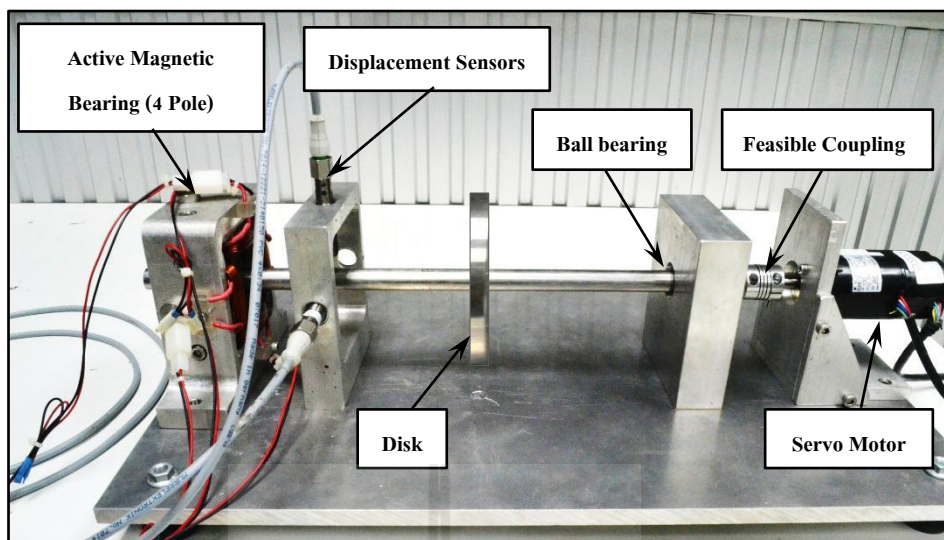
การควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ควบคุมคือ MATLAB/Simulink เชื่อมต่อสัญญาณการควบคุมระหว่างคอมพิวเตอร์ ส่วนระบบของเพลลาที่ปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล รองรับด้านเดียว จะใช้ PCI Serial Card ในการเชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable เข้ากับ RAPCON Platform ซึ่งเป็นบอร์ด Controller ในการเชื่อมต่อ MATLAB/Simulink กับ Real – Time Windows Target ภายใน Windows และบอร์ดนี้สามารถทำงานได้ทั้ง Input และ Output เป็นบอร์ดควบคุมแบบ Real Time การทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยสัญญาณที่เป็น Digital Signal จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากนั้นสัญญาณจะถูกเปลี่ยนจาก Digital Signal ไปเป็น Analog Signal โดย Digital to Analog ด้วยบอร์ด RAPCON และสัญญาณจะถูกขยายขึ้นอีก โดย Power Amplifier เพื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้แบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบจะเกิดการสั่นขึ้นในทิศทาง x และ y โดยมีเซนเซอร์วัดการกระจัดในรูปของค่าสัญญาณความต่างศักย์ (Voltage) ที่เป็น Analog Signal จะถูกส่งต่อไปยังบอร์ด RAPCON เพื่อแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital แล้วส่งกลับไปประมวลผลในโปรแกรมควบคุมการทำงานต่อไป

การทดลองนี้ได้ใช้เครื่องต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ คือ ระบบเพลลาที่ปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลรองรับด้านเดียว ประกอบไปด้วย

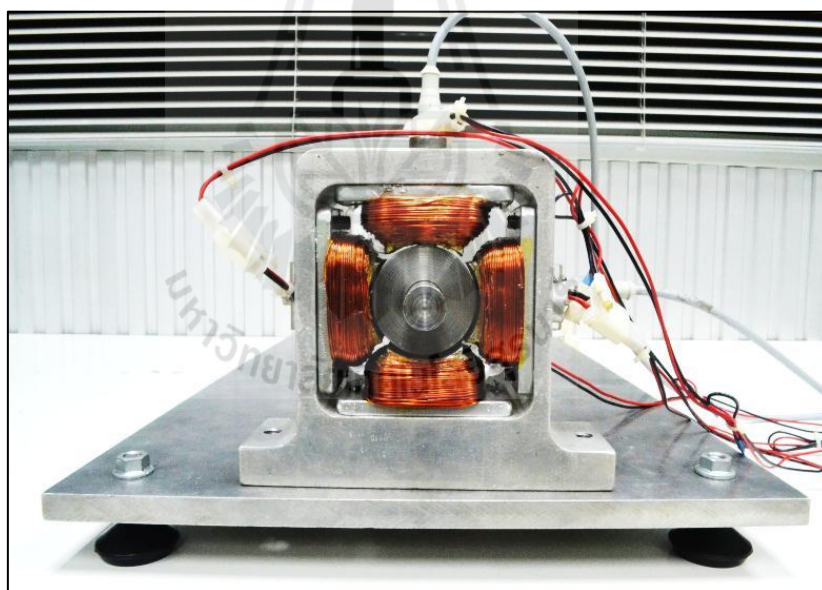
1. ระบบเพลลาที่ปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบริ่งแบบธรรมดาและปลายอีกด้านรองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล แสดงดังรูปที่ 5.2
2. แบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล 1 ชุด แสดงดังรูปที่ 5.3
3. บอร์ด Controller ชุด Power Amplifier และ PCI Aerial Card แสดงดังรูปที่ 5.4 และขั้นตอนการติดตั้งศึกษาได้จาก ภาคผนวก ข2.
4. เซนเซอร์วัดการกระจัด (Displacement Sensor)
5. คอมพิวเตอร์พร้อมระบบปฏิบัติการวินโดวส์และโปรแกรม MATLAB/Simulink

โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board ดังตารางที่ 5.1

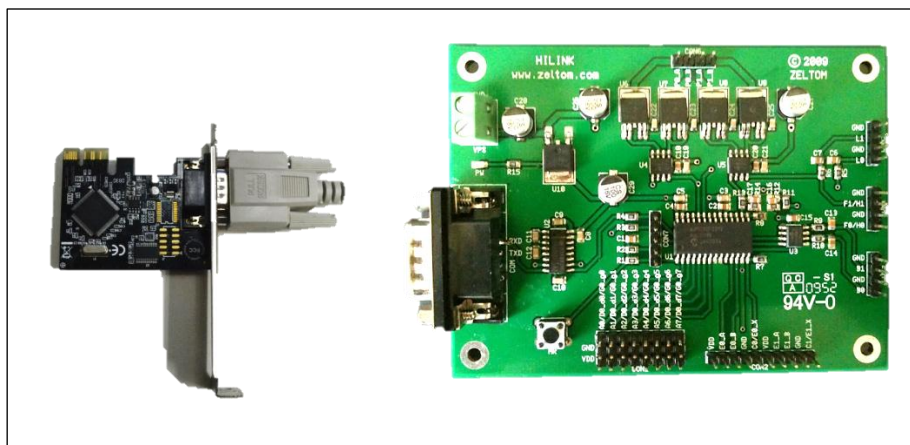




รูปที่ 5.2 เครื่องทดสอบการลดการสั่นพลาด้วยระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล



รูปที่ 5.3 ระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล



รูปที่ 5.4 PCI Serial Card เชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable  
และบอร์ด RAPCON

ตารางที่ 5.1 แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board (RAPCON Real – Time Rapid Control Prototyping Platform for MATLAB/SIMULINK)

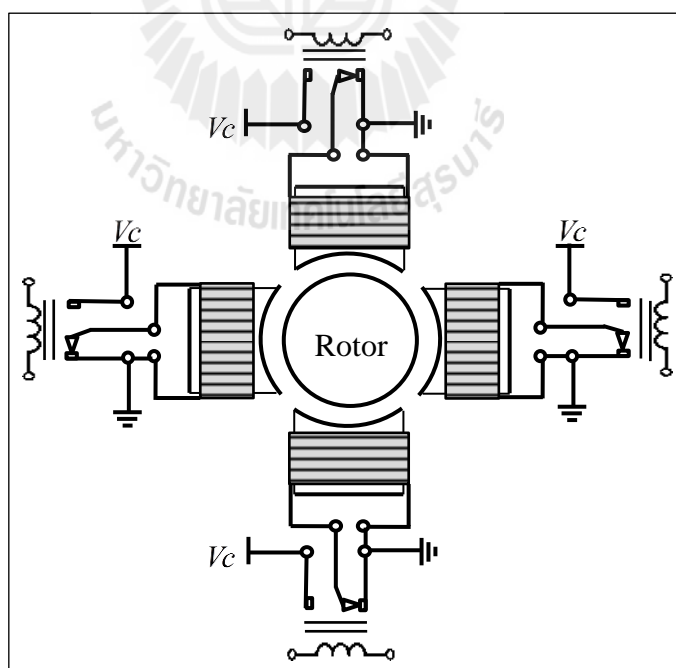
Meaning	Magnitude	Unit
Power Supply (Minimum Current)	6 – 15 (0.15)	VDC (A)
Analog Input A0 – A7 Analog 12 Bit	0 - 5	V
Capture Input C0 – C1 Digital 16 Bit		
Digital Input D0_d0 – D0_d0 Digital		
Encoder Input E0 – E1 Digital 16 Bit		
Frequency Output F0 – F1 Digital 16 Bit		
Analog Output B0 – B1 Analog 12 Bit		
Digital Output G0_g0 – G0_d7 Digital		
Pulse Output H0 – H1 Digital 16 Bit		
Filtered Pulse Output L0 – L1 Analog		
H – Bridge Output P0 – P1 Digital		
Voltage Regulator Output	5 (0.25)	V (A)
Ground GND	0	V
Sampling Range	Up to 15.2	kHz

ข้อควรแนะนำในการใช้ RAPCON Board ศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก ภาคผนวก ข.

1. Expansion Slot for Serial Card
2. Serial Crossover Cable
3. Matlab R2007b หรือเวอร์ชันสูงกว่าที่มี Simulink
4. RAPCON Hardware และ Software ต้องใช้เวอร์ชัน 1.5 เป็นต้นไป

## 5.2 การ Switch Relay ด้วย H - Bridge Switching ของ RABCON Board

ในการควบคุมการสั่นของเพลานั้นจะใช้แม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ซึ่งควบคุมใช้หลักการ Switching Relay ON/OFF กระแสที่ไหลผ่านขดลวด โดยแยกควบคุมแกน x และ y แสดงดังรูปที่ 5.5 โดยที่ Relay เป็นอุปกรณ์แม่เหล็ก (Magnetics Device) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมาก ภายในโครงสร้างของ Relay จะประกอบไปด้วยขดลวด (Coil) 1 ชุด และหน้าสัมผัส (Contactor) ซึ่งในหน้าสัมผัส 1 ชุด จะประกอบไปด้วย หน้าสัมผัสแบบปกติปิด (Normally Close; NC.) ซึ่งในสภาวะปกติ ขานี้จะต่ออยู่กับขาร่วม (Common) หรือหน้าสัมผัสแบบปกติเปิด (Normally Open; NO.) ขานี้จะต่อเข้ากับขาร่วม (Common) เมื่อขดลวดมีแรงดันตกคร่อม หรือกระแสไหลผ่าน



รูปที่ 5.5 แสดงการ Switch ON/OFF ด้วย Relay

### 5.3 การควบคุมและรับสัญญาณผ่าน RABCON Board

ในการควบคุมซึ่งหลักการข้างต้นจะใช้ H – Bridges Output Block ซึ่งเป็น Block ที่เชื่อมต่อ RABCON Board กับ Real – Time Windows Target ในรูปของสัญญาณ Digital แบบ 16 Bit/Channel โดยมี Channel P0 ถึง P1 แต่ละ Channel จ่าย Voltage ได้ ตั้งแต่ 0 ถึง Supply Voltage, 5 A สัญญาณ Digital ที่จ่ายอยู่ในรูป PWM (Pulse Width Modulated) แต่ละ H – Bridges มีส่วนประกอบ MOSFET Bridge สามารถขับได้ถึง 5 A ถ้าโหลดของ H – Bridges มีการกรองโดยใช้ Lowpass Filter ดังนั้น Output สามารถเลือกประยุกต์ใช้ Amplifiers แบบ Linear โดยเปลี่ยนสัญญาณ Digital เป็น Analog และ Voltage ตกคร่อม H – Bridges ขึ้นกับ โหลดสัมพันธ์กับ Duty – Cycle ของ Input คือ

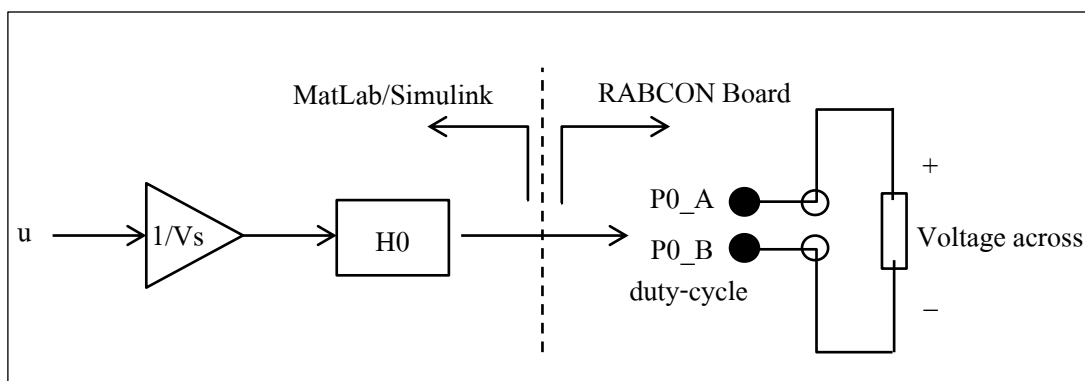
$$V_{con} \approx (2\delta - 1)V_s \quad (5.1)$$

โดยที่  $\omega = \delta/f = \delta\tau$  เมื่อ  $f$  คือ Fundamental Frequency ของ PWM อยู่ระหว่าง 449.8291 Hz ถึง 115156.25 Hz และ  $\tau$  คือ คาบ ซึ่งแบ่ง H – Bridges ออกเป็น 2 โหมด โดยมีเงื่อนไขการส่งสัญญาณดังนี้

$$V_{con} \approx \begin{cases} +V_s, & u \geq V_s, \\ 2u - V_s, & 0 < u < V_s, \\ -V_s, & u \leq 0 \end{cases} \quad \text{Normal} \quad (5.2)$$

$$V_{con} \approx \begin{cases} +V_s, & u \geq +V_s, \\ u, & -V_s < u < +V_s, \\ -V_s, & u \leq -V_s \end{cases} \quad \text{Shifted} \quad (5.3)$$

ที่ Fundamental Frequency = 10,000 Hz, Supply Voltage,  $V_s = \pm 12V$  และ มีค่า Value คือ  $u/V_s$  โดยมีรายละเอียดของค่าต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่า Value ที่ส่งสัญญาณออกในแต่ละโหมด และแสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MatLab/Simulink กับ RABCON Board ในการป้อนค่าสัญญาณให้กับ Power Amplifier (Magnetic Bearing) ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MatLab/Simulink กับ RABCON Board  
ในการป้อนค่าสัญญาณให้กับ Power Amplifier (Magnetic Bearing)

จากตารางที่ 5.2 จะได้ความสัมพันธ์ในการควบคุมแรงดันจากตัวควบคุมกับ RABCON Board เพื่อป้อนให้กับระบบเบริงแม่เหล็กดังนี้

$$V_{con} = 12.23V_{out} - 0.013 \quad (5.4)$$

โดยมีค่า Gain ของ Power Amplifier เท่ากับ 12.23

ส่วนเซนเซอร์ที่ใช้เป็น Analog Voltage และใช้ Voltage Divider เพื่อลดแรงดันก่อนป้อนสัญญาณเข้าบอร์ดควบคุม จึงจำเป็นต้องเทียบวัดเพื่อหาค่า Gain ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการป้อนกลับในการออกแบบระบบควบคุม

ซึ่งใช้ Analog Input Block ซึ่งเป็น Block ที่เชื่อมต่อ RABCON Board กับ Real – Time Windows Target ในรูปของสัญญาณ Analog แบบ 12 Bit/Channel โดยมี Channel A0 – A7 ซึ่งมี 2 โหมด โดยมีเงื่อนไขการรับสัญญาณดังนี้

$$V_{sen} \approx \begin{cases} 5, & u \geq 5, \\ u, & 0 < u < 5, \\ 0, & u \leq 0 \end{cases} \quad \text{Unipolar} \quad (5.5)$$

$$V_{sen} \approx \begin{cases} +5, & u \geq 5, \\ 2u - 5, & 0 < u < 5, \\ -5, & u \leq 0 \end{cases} \quad \text{Bipolar} \quad (5.6)$$

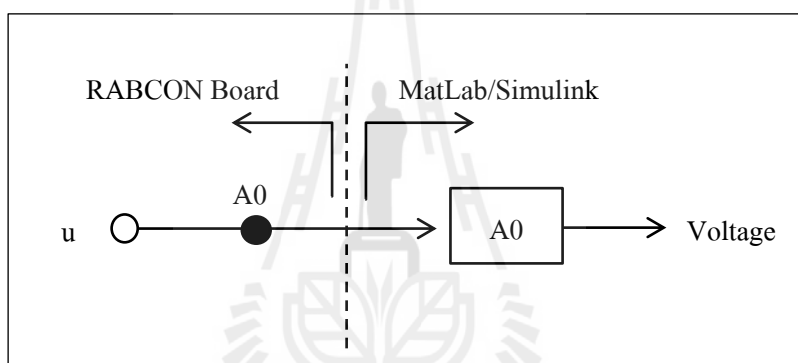
ตารางที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่า Value ที่ส่งสัญญาณออกในแต่ละโหมด

Value	Shifted Mode				Normal Mode			
	Calculate (V)	Unload (V)	Load		Calculate (V)	Unload (V)	Load	
			V (V)	I (A)			V (V)	I (A)
-1.0	-12.000	-12.240	10.460	-3.736	-12.000	-12.240	10.660	-3.807
-0.9	-10.800	-11.050	-9.500	-3.393				
-0.8	-9.600	-9.860	-8.510	-3.039				
-0.7	-8.400	-8.640	-7.490	-2.675				
-0.6	-7.200	-7.420	-6.450	-2.304				
-0.5	-6.000	-6.200	-5.410	-1.932				
-0.4	-4.800	-4.980	-4.380	-1.564				
-0.3	-3.600	-3.782	-3.350	-1.196				
-0.2	-2.400	-2.562	-2.281	-0.815				
-0.1	-1.200	-1.349	-1.212	-0.433				
0.0	0.000	-0.127	-0.127	-0.045				
0.1	1.200	1.088	0.971	0.347				
0.2	2.400	2.307	2.048	0.731	-7.200	-7.420	-6.550	-2.339
0.3	3.600	3.538	3.130	1.118	-4.800	-4.970	-4.410	-1.575
0.4	4.800	4.800	4.240	1.514	-2.400	-2.559	-2.307	-0.824
0.5	6.000	6.030	5.290	1.889	0.000	-0.127	-0.127	-0.045
0.6	7.200	7.250	6.340	2.264	2.400	2.305	2.041	0.729
0.7	8.400	8.480	7.370	2.632	4.800	4.800	4.210	1.504
0.8	9.600	9.720	8.400	3.000	7.200	7.250	6.380	2.279
0.9	10.800	10.970	9.410	3.361	9.600	9.720	8.550	3.054
1.0	12.000	12.240	10.420	3.721	12.000	12.240	10.600	3.786

ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ Voltage เมื่อพิจารณาให้เป็นเชิงเส้น ตลอดช่วง (0 - 3.5 mm หรือ  $\pm 1.75$  mm) ดังนี้

$$V_{sen} = 1.8177x - 3.4976$$

โดยที่ Gain ของ Sensor เท่ากับ 1.8177 V/mm สภาวะสมดุลจะต้องควบคุมให้ x และ y มีค่าเท่ากับ 1.75 mm แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.3 โดยมีไดอะแกรมการเชื่อมต่อของสัญญาณ ระหว่าง MatLab/Simulink กับ RABCON Board ในการรับค่าสัญญาณจากเซนเซอร์ผ่าน Voltage Divider ดังรูปที่ 5.7



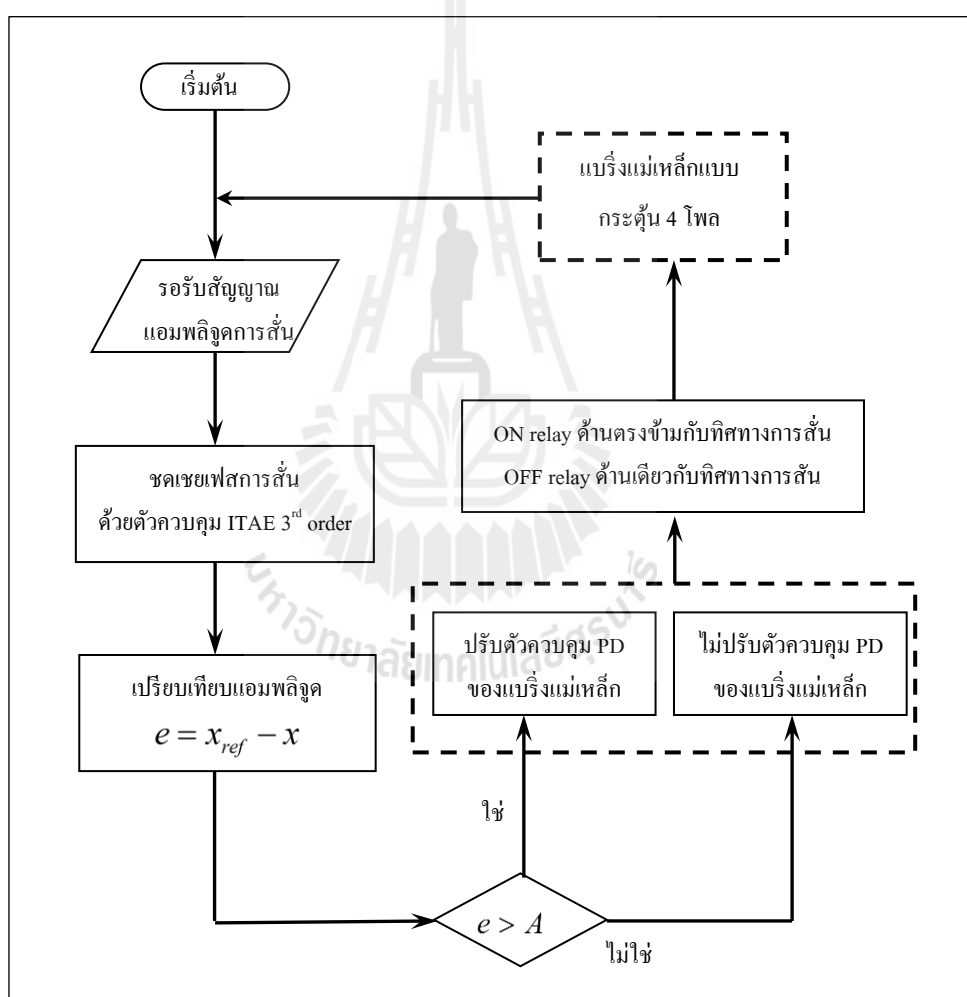
รูปที่ 5.7 แสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MatLab/Simulink กับ RABCON Board ในการรับค่าสัญญาณจากเซนเซอร์ผ่าน Voltage Divider

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซนเซอร์

Position Sensors (Inductive Proximity Switches Analog Output)			
Meaning	Symbol	Magnitude	Unit
Operating Voltage (3-wire)		18 - 30	VDC
Current Consumption		< 25	mA
Sensitivity		1	V/mm
Output voltage (Voltage Divider)	$u_{SP}$	0 - 5	V
Output range (Voltage Divider)	$x_{SP}$	0 - 5	mm
Sensor gain	$k_{sen}$	1.8177	V/mm

## 5.4 การโปรแกรมควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบเบร้งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพล

ในการทดสอบการควบคุมการสั่นของเพลาด้วยระบบเบร้งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพล ที่ใช้การชดเชยเฟสด้วยตัวชดเชย ITAE 3<sup>rd</sup> Order และควบคุมขนาดแอมพลิจูดด้วยตัวควบคุม PD ในการเก็บบันทึกข้อมูลของการสั่นในรูปของการกระจัดทั้งทิศทาง x และ y การควบคุมการทำงานของกระแสะจะใช้โปรแกรม MatLab/Simulink ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ขั้นตอนควบคุมการสั่นของเพลาด้วยระบบเบร้งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพล



เมื่อเริ่มการทำงาน โปรแกรมจะรอรับสัญญาณการกระจัด ที่ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งเดียวกับระบบเบร้งแม่เหล็ก จากนั้น โปรแกรมจะเช็คเฟสด้วย ITAE 3<sup>rd</sup> Order เมื่อสัญญาณมีเฟสตรงกันกับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งสัญญาณอ้างอิงนี้มาจากการลดขนาดของสัญญาณที่ผ่านตัวชดเชยเฟสให้เหลือ 70% ของสัญญาณการสั่ง เนื่องจากเราต้องการควบคุมให้การสั่งลดลง 30% ซึ่งถือเป็นเป้าหมายในงานวิจัยนี้ หลังจากนั้นจะเข้าสู่เงื่อนไขการเปรียบเทียบความแตกต่างขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณทั้งสอง โดยที่  $A$  คือค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้หรือความสามารถลดการสั่งที่เครื่องมือทำได้ ในการตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานตามกรณีดังนี้

1. กรณีที่  $e > A$  แสดงว่ามีความแตกต่างระหว่างแอมพลิจูดที่วัดได้ผ่านตัวชดเชยเฟสมากกว่าสัญญาณอ้างอิง ตัวควบคุมแบบพีดีจะทำการปรับกระแสที่ป้อนให้กับขดลวดแม่เหล็กเบร้งเพิ่มขึ้นด้วยหลักการ Switch Relay เพื่อสร้างแรงดึงคูดเพลลาในทิศทางตรงกันข้ามกับการสั่งนั้น
2. กรณีที่  $e \leq A$  แสดงว่ามีความแตกต่างระหว่างแอมพลิจูดที่วัดได้ผ่านตัวชดเชยเฟสเท่ากับสัญญาณอ้างอิง ตัวควบคุมแบบพีดีจะทำการรักษาจังหวะการ Switch Relay เพื่อป้อนกระแสในการสร้างแรงดึงคูดเพลลาในทิศทางตรงกันข้ามกับการสั่งนั้น

## 5.5 การทดสอบควบคุมการสั่งของเพลลาที่รองรับด้วยระบบเบร้งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพล

ในการทดสอบควบคุมการสั่งของเพลลาที่รองรับด้วยระบบเบร้งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพล ด้วยตัวชดเชยเฟสด้วย ITAE 3<sup>rd</sup> Order และควบคุมขนาดด้วยตัวควบคุม PD ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถควบคุมระบบเบร้งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพลได้พร้อมกันในเวลาเดียวกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  เนื่องจากการรับค่าและประมวลผลของระบบที่เป็น Real Time นั้นมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องใช้อุปกรณ์ที่ระบบประมวลผลที่เร็ว ดังนั้นเราจึงแยกการควบคุมทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$  ออกจากกันด้วยคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 กรณีคือ

1. ควบคุมทิศทาง  $x$  ทิศทางเดียว
2. ควบคุมทิศทาง  $y$  ทิศทางเดียว
3. ควบคุมทิศทาง  $y$  และ  $x$  ตามลำดับ

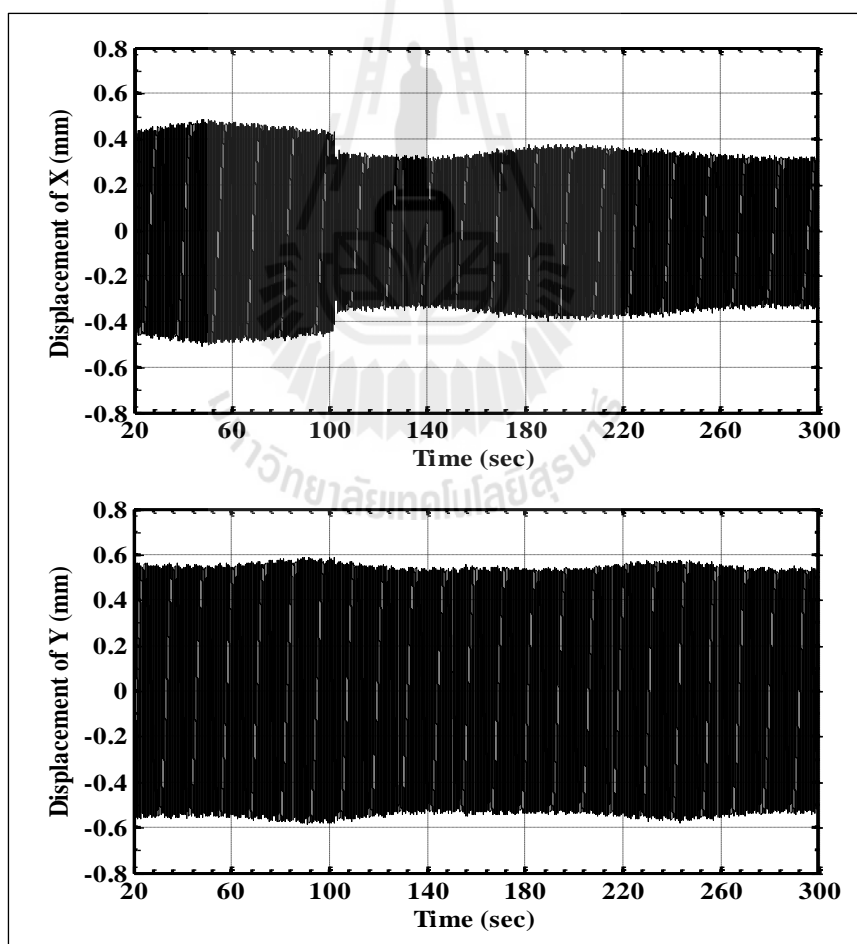
ซึ่งทั้ง 3 ส่วนนี้จะทำการรันหรือทำงานที่ความเร็วรอบการหมุนที่ 100 200 และ 300 RPM ตามลำดับ

### 5.5.1 ผลการทดสอบควบคุมการสั่นของเพลลาที่รองรับด้วยระบบแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพลที่ความเร็วรอบ 100 RPM

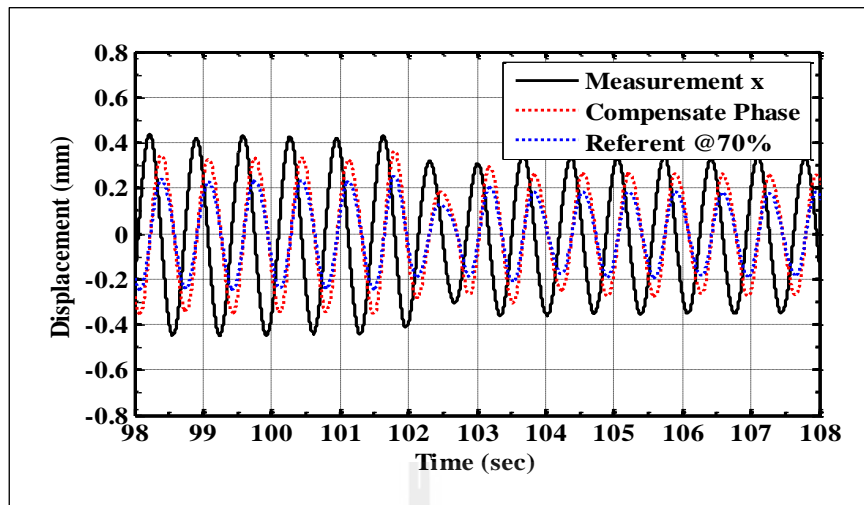
เมื่อทำการรันมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 100 RPM จะทำการบันทึกค่าในช่วงเวลาที่ 20 ถึง 300 นาทีโดยจะให้ระบบจะรันโดยไม่มีการควบคุมไปช่วงเวลานึงเพื่อทำการตรวจจับเฟสของสัญญาณการสั่นที่ผ่าน Analog Filter แบบ Bandpass Order 8 ด้วยวิธี Butterworth Method จนถึงเวลาที่ 100 วินาที จึงทำการเปิด Manual Switch เพื่อทำการควบคุมระบบแบริงแม่เหล็ก ซึ่งผลที่ได้ในแต่ละกรณีมีดังนี้

#### 5.5.1.1 ควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียว

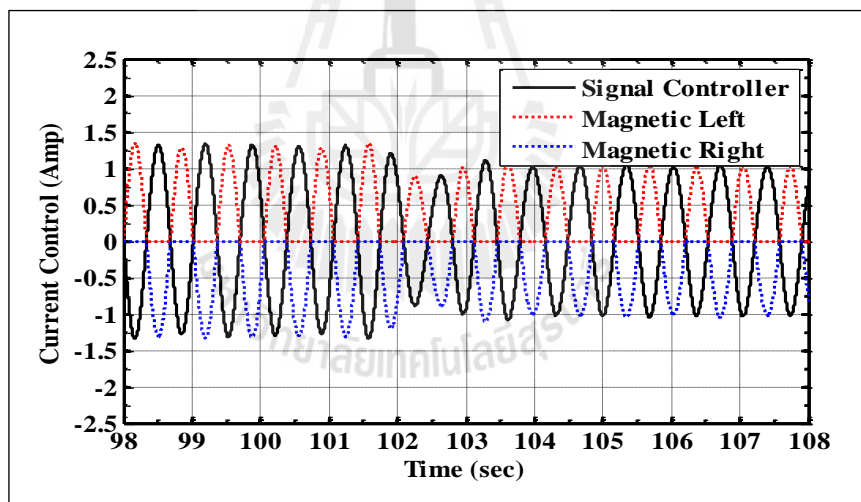
ซึ่งผลที่ได้จากการควบคุมทิศทาง x เพียงทิศทางเดียวแสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแสในทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 100 RPM



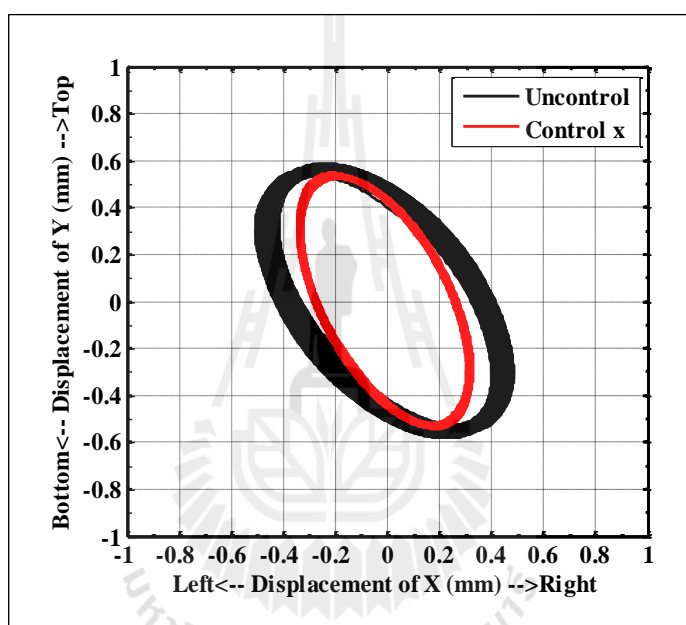
รูปที่ 5.10 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x เปรียบเทียบกับการชดเชยเฟส และสัญญาณอ้างอิงที่ความเร็วรอบ 100 RPM



รูปที่ 5.11 แสดงกระแสควบคุมแบรีงแม่เหล็กในทิศทาง x กับสัญญาณการควบคุม ที่ความเร็วรอบ 100 RPM

จากรูปที่ 5.10 แสดงการกระจัดเปรียบเทียบระหว่างการกระจัดที่ได้จากการวัดของเซนเซอร์ในทิศทาง x กับการกระจัดที่เกิดจากการชดเชยเฟสให้กับระบบด้วย ITAE 3<sup>rd</sup> Order ซึ่งจะเห็นว่า การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทางพลวัต โดยมีการปรับตัวแตกต่างเฟสจากสัญญาณที่ได้จากการวัดและสัญญาณอ้างอิงที่ได้กำหนดขึ้นจากความสามารถ

หรือจุดประสงค์ที่ระบบสามารถทำงานได้คือ สัญญาณอ้างอิงที่มีขนาดลดลง 70% ของสัญญาณการสั่งที่วัดได้ผ่านตัวชดเชยเฟส (ซึ่งหมายความว่าสัญญาณอ้างอิงจะแปรผันตรงกับสัญญาณที่วัดได้ผ่านตัวชดเชยเฟส) จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการควบคุมที่เวลา 102 วินาที การสั่งในทิศทาง x มีขนาดลดลงเมื่อเวลาผ่านไป หรืออาจพิจารณาได้จากรูปที่ 5.9 แต่เมื่อพิจารณาในทิศทาง y ซึ่งไม่มีการควบคุม จะเห็นว่าการสั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง ต่อไปจะพิจารณาการควบคุมกระแส ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมที่ผ่านตัวควบคุมแบบ PD หลังจากนั้นจะเป็นการกำหนดการ Switch ON/OFF ให้กับแม่เหล็กทางด้านซ้ายและขวาดังรูปที่ 5.11

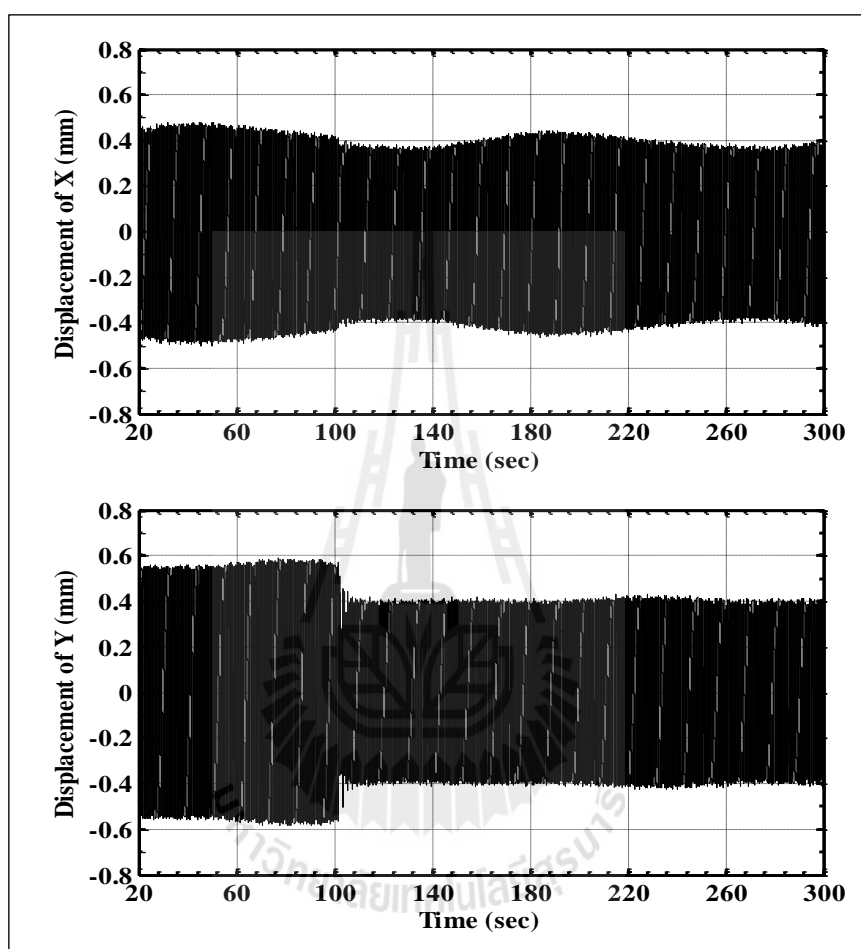


รูปที่ 5.12 แสดงเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนของเพลลาเมื่อควบคุมในทิศทาง x  
ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 100 RPM

ผลที่ได้จากการควบคุมเฉพาะในทิศทาง x ที่ความเร็วรอบ 100 RPM เมื่อเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนที่เกิดขึ้นของเพลลาที่ตำแหน่งเพลลาแสดงดังรูปที่ 5.12 ซึ่งเปรียบเทียบก่อนการควบคุมกับหลังการควบคุมจะเห็นว่า การกระจัดในทิศทาง x ลดลงจาก 0.4978 mm เหลือ 0.3768 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.5879 mm เหลือ 0.5775 mm

### 5.5.1.2 การควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียว

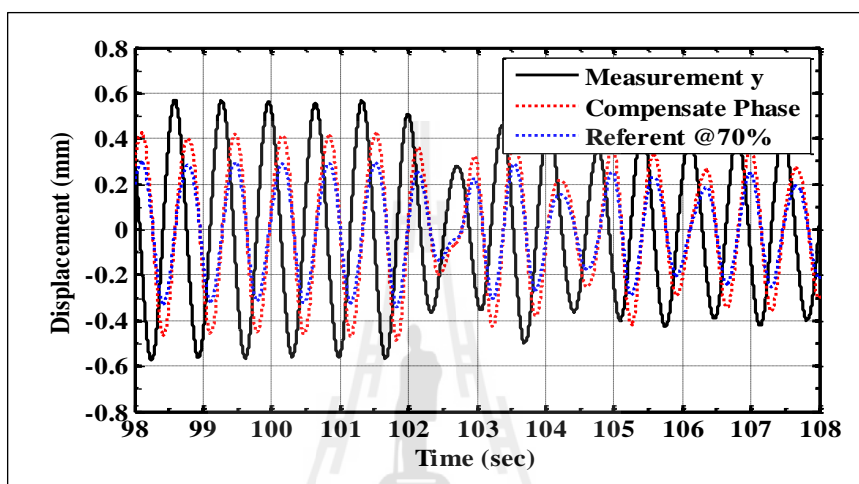
ซึ่งผลที่ได้จากการควบคุมทิศทาง y เพียงอย่างเดียวแสดงการกระจัดในทิศทาง x และ y ดังรูปที่ 5.13



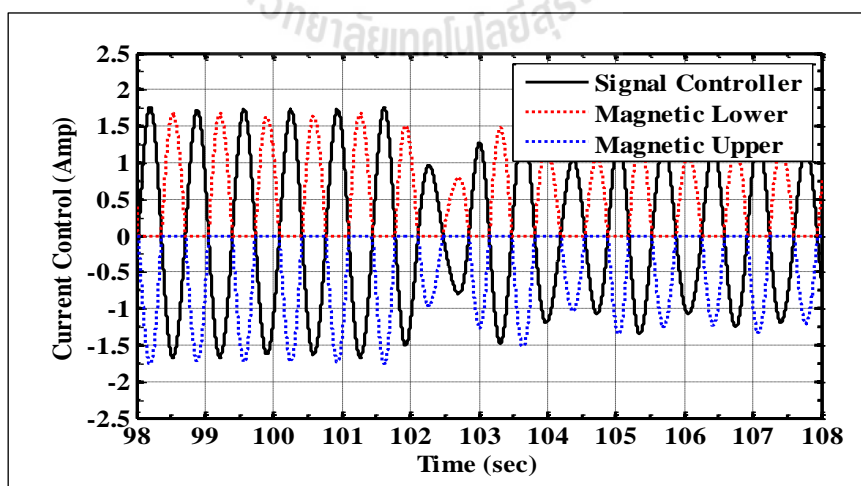
รูปที่ 5.13 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแสในทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 100 RPM

จากรูปที่ 5.14 แสดงการกระจัดเปรียบเทียบระหว่างการกระจัดที่ได้จากการวัดของเซนเซอร์ในทิศทาง x กับการกระจัดที่เกิดจากการชดเชยเฟสให้กับระบบด้วย ITAE 3<sup>rd</sup> Order ซึ่งจะเห็นว่ามีการปรับตัวแตกต่างเฟสจากสัญญาณที่วัดได้และสัญญาณอ้างอิงที่ได้กำหนดขึ้นจากความสามารถหรือจุดประสงค์ที่ระบบสามารถทำงานได้คือ สัญญาณอ้างอิงที่มีขนาดลดลง 70% ของสัญญาณการสั่งที่วัดได้ผ่านตัวชดเชยเฟส จะเห็นได้ว่า

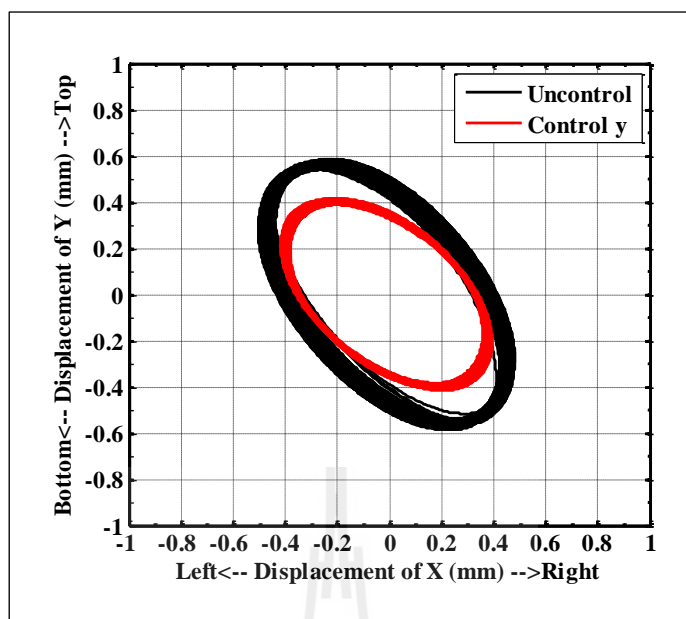
เมื่อทำการตัวควบคุมที่เวลา 102 วินาที การสั่นในทิศทาง  $y$  มีขนาดลดลงเมื่อเวลาผ่านไป หรืออาจพิจารณาได้จากรูปที่ 5.13 แต่เมื่อพิจารณาในทิศทาง  $x$  ซึ่งไม่มีการควบคุม จะเห็นว่ามี การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ต่อไปจะพิจารณาการควบคุมกระแส ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมที่ผ่านตัวควบคุมแบบ PD หลังจากนั้นจะเป็นการกำหนดการ Switch ON/OFF ให้กับเบร็็งแม่เหล็กทางด้านบนและล่างดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.14 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง  $y$  เปรียบเทียบกับการชดเชยเฟส และสัญญาณอ้างอิงที่ความเร็วรอบ 100 RPM



รูปที่ 5.15 แสดงกระแสควบคุมเบร็็งแม่เหล็กในทิศทาง  $y$  กับสัญญาณการควบคุมที่ความเร็วรอบ 100 RPM



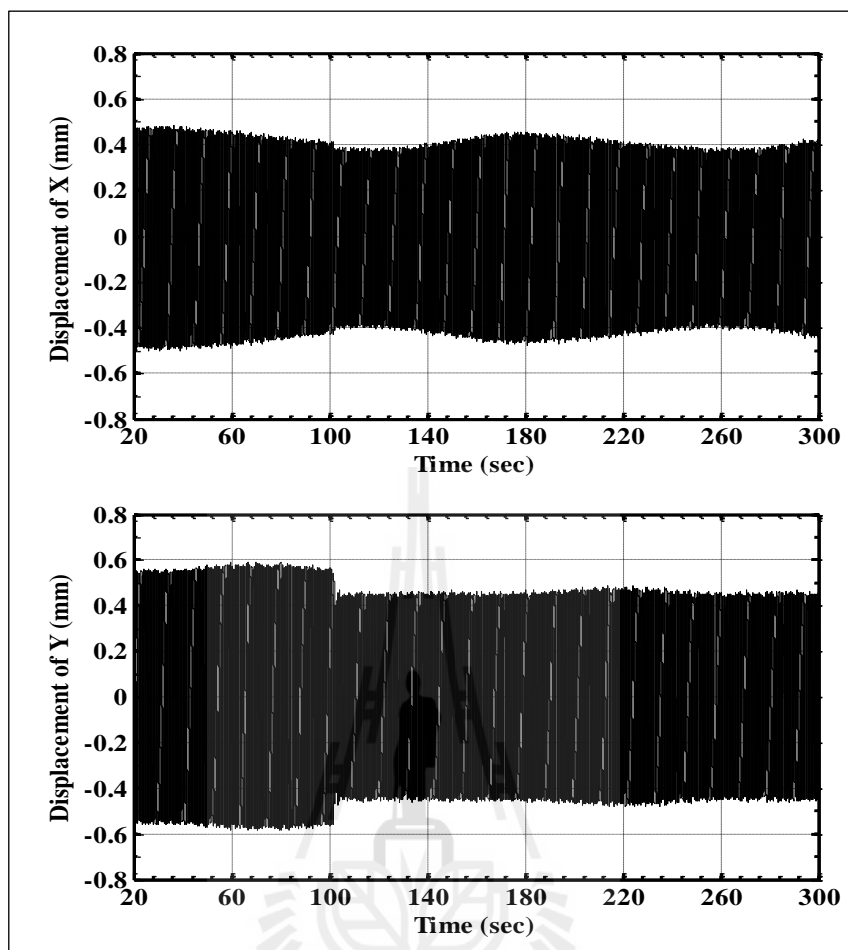
รูปที่ 5.16 แสดงเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนของเพลลาเมื่อควบคุมในทิศทาง  $y$  ทิศทางเดียว ที่ความเร็วรอบ 100 RPM

ผลที่ได้จากการควบคุมเฉพาะในทิศทาง  $y$  ที่ความเร็วรอบ 100 RPM เมื่อเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนที่เกิดขึ้นของเพลลาที่ตำแหน่งเพลลาแสดงดังรูปที่ 5.16 ซึ่งเปรียบเทียบก่อนการควบคุมกับหลังการควบคุมจะเห็นว่า การกระจัดในทิศทาง  $x$  ลดลง จาก 0.4978 mm เหลือ 0.4425 mm และทิศทาง  $y$  ลดลงจาก 0.5879 mm เหลือ 0.4307 mm

### 5.5.1.3 ควบคุมทิศทาง $x$ และ $y$

ซึ่งผลที่ได้จากการควบคุมทิศทาง  $y$  เพียงทิศทางเดียวแสดงการกระจัดในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ดังรูปที่ 5.17

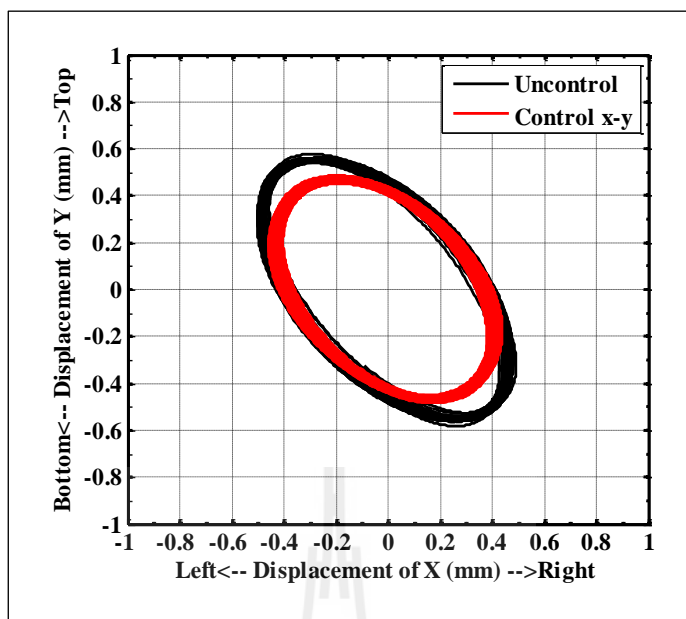
ผลที่ได้จากการควบคุมในทิศทาง  $y$  และ  $x$  ที่ความเร็วรอบ 100 RPM เมื่อเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนที่เกิดขึ้นของเพลลาที่ตำแหน่งเพลลาแสดงดังรูปที่ 5.18 ซึ่งเปรียบเทียบก่อนการควบคุมกับหลังการควบคุมจะเห็นว่า การกระจัดในทิศทาง  $x$  ลดลง จาก 0.4978 mm เหลือ 0.4574 mm และทิศทาง  $y$  ลดลงจาก 0.5879 mm เหลือ 0.4765 mm



รูปที่ 5.17 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแส ทั้งทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 100 RPM

ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลจากการรันมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 100 RPM จากการบันทึกค่าในช่วงเวลาที่ได้นำเสนอไปแล้วในข้างต้น โดยแบ่งการควบคุมออก 3 กรณี คือควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียว ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียวและควบคุมทิศทาง y และ x ตามลำดับ โดยใช้ตัวชดเชยเฟสด้วย ITAE 3<sup>rd</sup> Order เมื่อสัญญาณมีเฟสตรงกันกับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งสัญญาณอ้างอิงนี้ มาจากการลดขนาดของสัญญาณที่ผ่านตัวชดเชยเฟสให้เหลือ 70% ของสัญญาณการสั่ง เนื่องจากเราต้องการควบคุมให้การสั่นลดลง 30% และการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมแบบ PD ซึ่งกำหนดการ Switch ON/OFF ให้กับแบริ่งแม่เหล็กทางด้านซ้าย ขวา บนและล่างตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า สามารถลดการสั่นในทิศทาง x สูงสุดที่ 24.3% และทิศทาง y สูงสุดที่ 26.74%





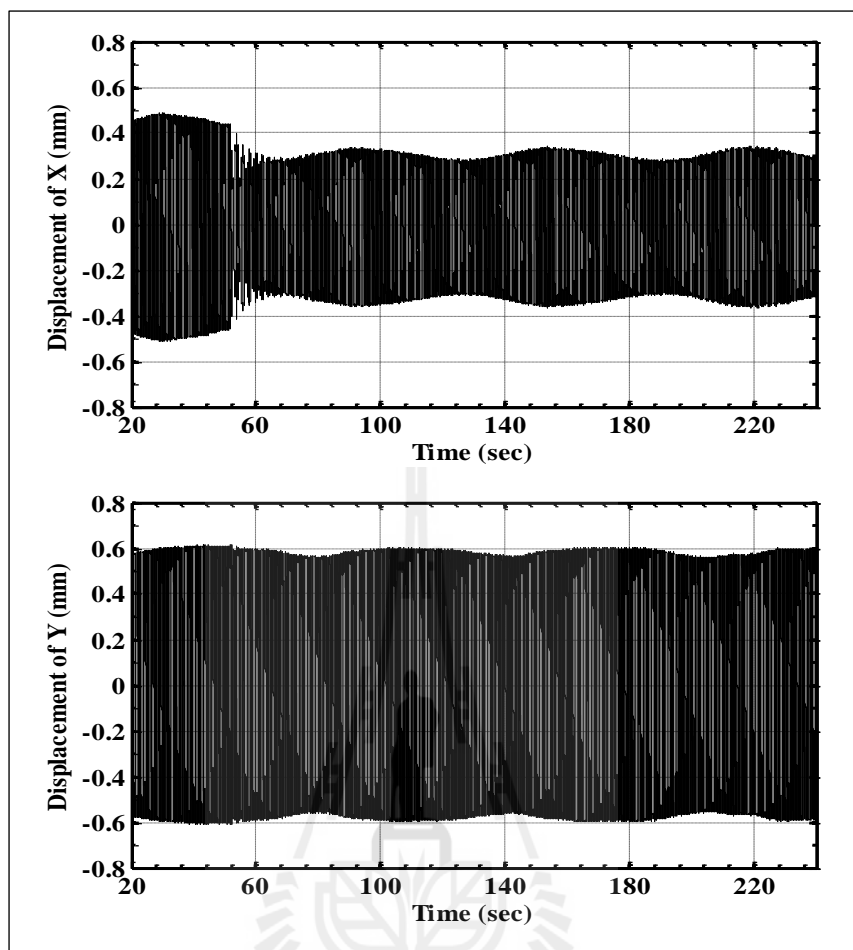
รูปที่ 5.18 แสดงเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนของเพลาเมื่อควบคุมในทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 100 RPM

### 5.5.2 ผลการทดสอบควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพลที่ความเร็วรอบ 200 และ 300 RPM

จากการควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพลที่ความเร็วรอบ 100 RPM ทั้งตัวชดเชยเฟสและตัวควบคุมขนาดสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้คือ ลดการสั่นลง 30% ของการสั่นที่เกิดขึ้น ดังนั้นในการทดลองนี้จะพิจารณาเฉพาะขนาดการสั่นที่เกิดขึ้นทั้งทิศทาง x และ y เมื่อไม่มีการควบคุมเปรียบเทียบกับที่มีการควบคุม ซึ่งผลที่ได้ดังนี้

#### 5.5.2.1 ควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ 200 RPM

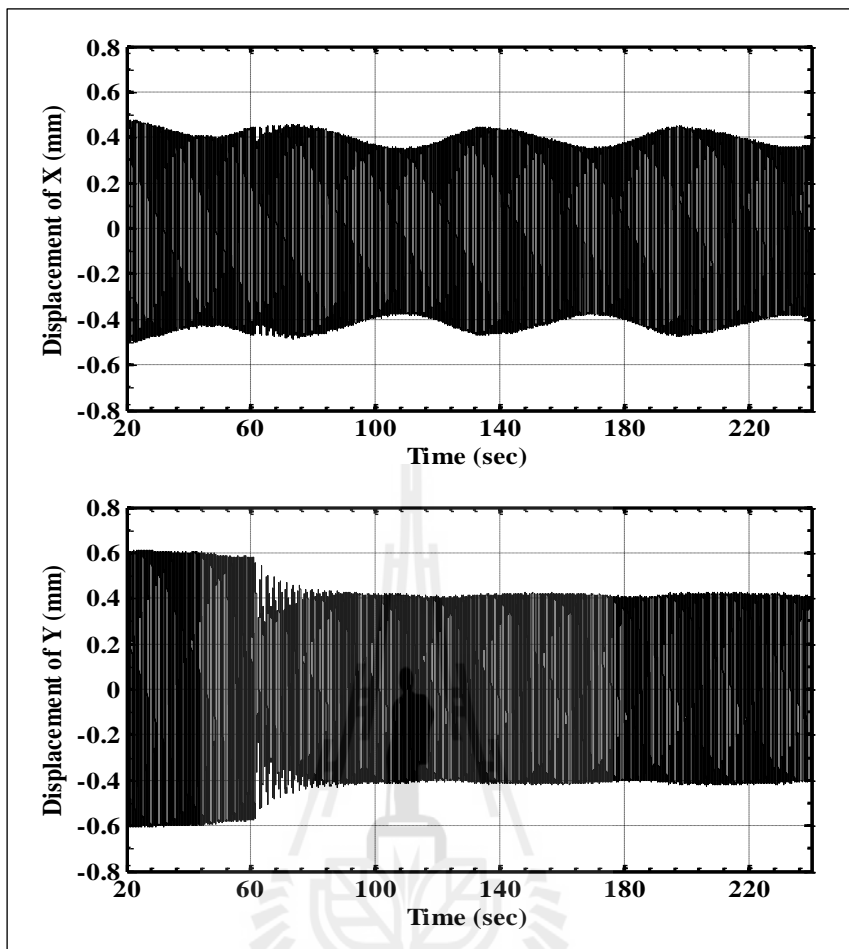
จากรูปที่ 5.19 การกระจัดของเพลาในทิศทาง x เพียงทิศทางเดียวที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 200 RPM ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 50 วินาที แสดงให้เห็นว่าเพลา มีขนาดการสั่นลดลงในทิศทาง x และส่วน y ไม่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถสรุปได้ว่าการกระจัดในทิศทาง x ลดลงจาก 0.4887 mm เหลือ 0.3387 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.614 mm เหลือ 0.6034 mm



รูปที่ 5.19 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแสในทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 200 RPM

#### 5.5.2.2 ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ 200 RPM

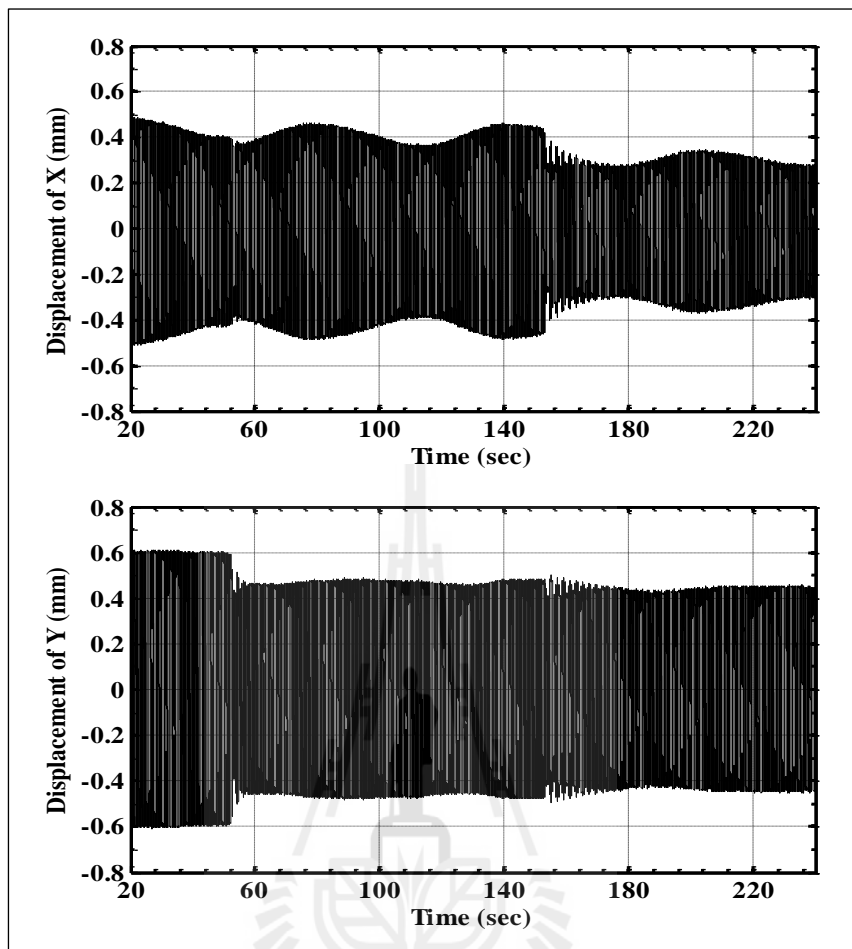
จากรูปที่ 5.20 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง y เพียงทิศทางเดียว ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 200 RPM ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 60 วินาที แสดงให้เห็นว่าเพลานมีขนาดการสั่นลดลงในทิศทาง x และส่วน y ไม่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถสรุปได้ว่าการกระจัดในทิศทาง x ลดลงจาก 0.4887 mm เหลือ 0.4454 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.6146 mm เหลือ 0.4284 mm



รูปที่ 5.20 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแสในทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 200 RPM

### 5.5.2.3 ควบคุมทิศทาง x และ y ที่ 200 RPM

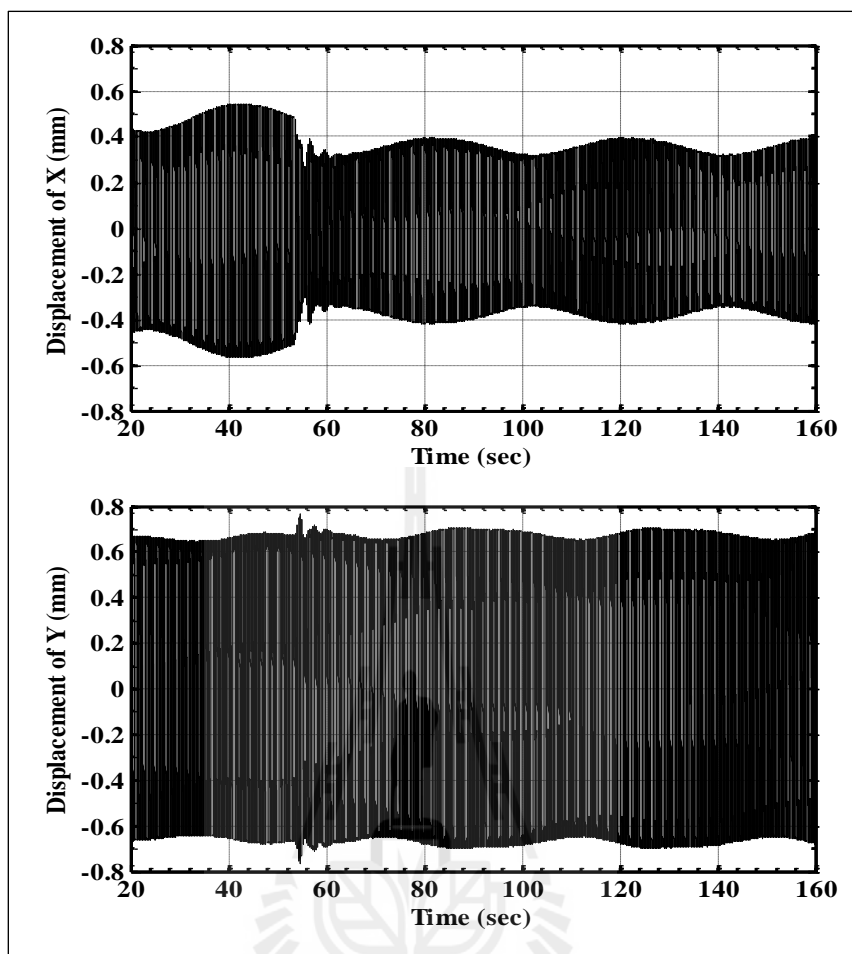
จากรูปที่ 5.21 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 200 RPM โดยทำการควบคุมทิศทาง y ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 50 วินาที และการควบคุมทิศทาง x ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 160 วินาที แสดงให้เห็นว่าเพลานมีขนาดการสั่นลดลงในทั้งในทิศทาง x และ y สามารถสรุปได้ว่า การกระจัดในทิศทาง x ลดลงจาก 0.4887 mm เหลือ 0.3478 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.6146 mm เหลือ 0.4610 mm



รูปที่ 5.21 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแส ทั้งทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 200 RPM

#### 5.5.2.4 ควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ 300 RPM

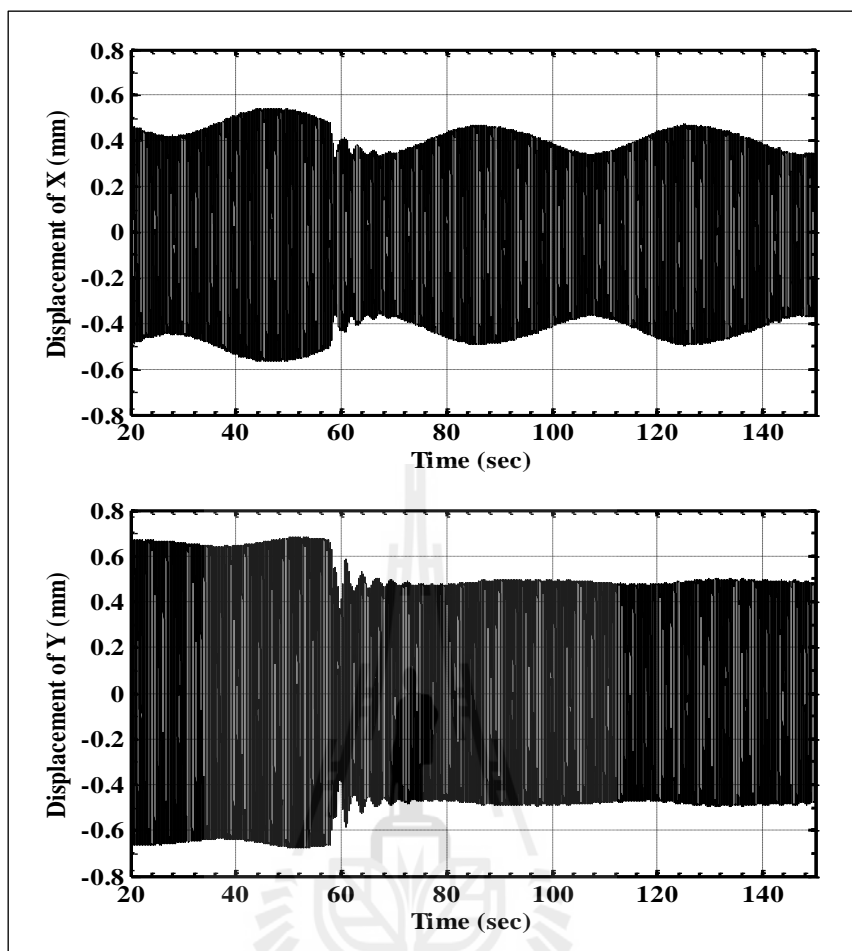
จากรูปที่ 5.22 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x เพียงทิศทางเดียว ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 300 RPM ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 60 วินาที แสดงให้เห็นว่าเพลาน มีขนาดการสั่นลดลงในทิศทาง x และส่วน y ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสามารถสรุปได้ว่าการกระจัด ในทิศทาง x ลดลงจาก 0.5437 mm เหลือ 0.3968 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.6846 mm เหลือ 0.6711 mm



รูปที่ 5.22 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแสในทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 300 RPM

#### 5.5.2.5 ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ 300 RPM

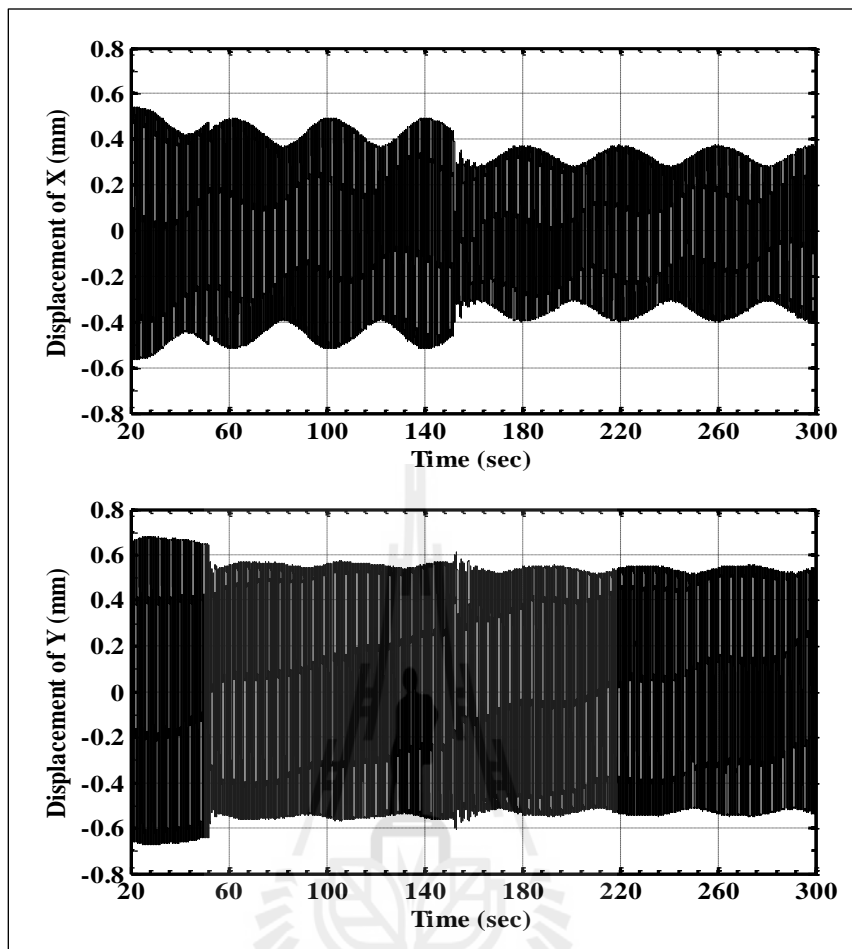
จากรูปที่ 5.23 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง y เพียงทิศทางเดียว ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 300 RPM ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 75 วินาที แสดงให้เห็นว่าเพลามีขนาดการสั่นลดลงในทิศทาง x และส่วน y ไม่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถสรุปได้ว่า การกระจัดในทิศทาง x ลดลงจาก 0.5437 mm เหลือ 0.4704 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.6846 mm เหลือ 0.5006 mm



รูปที่ 5.23 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแสในทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 300 RPM

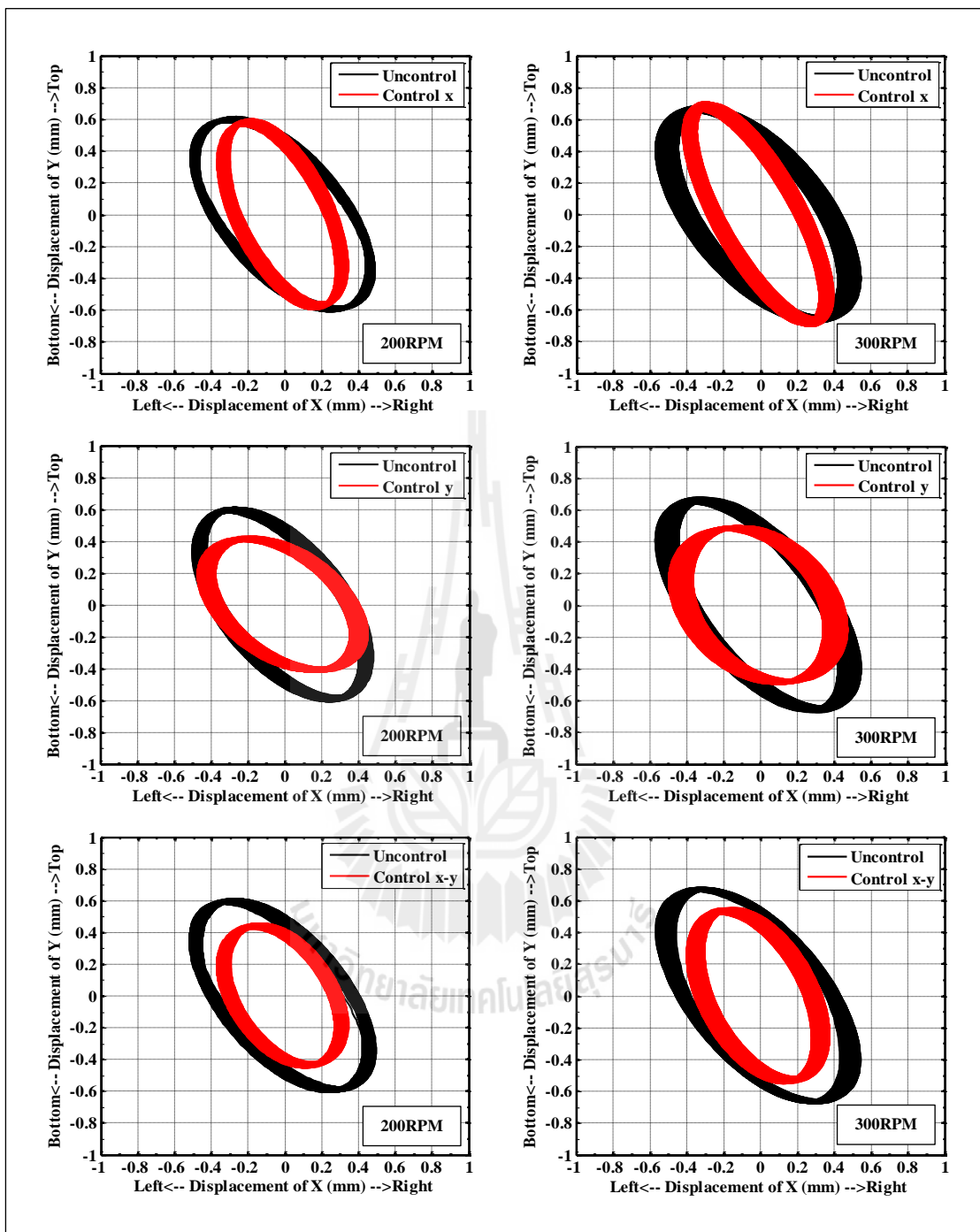
#### 5.5.2.6 ควบคุมทิศทาง y และ x ที่ 300 RPM

จากรูปที่ 5.24 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 300 RPM โดยทำการควบคุมทิศทาง y ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 50 วินาที และการควบคุมทิศทาง x ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 150 วินาที แสดงให้เห็นว่า เพลามีขนาดการสั่นลดลงในทั้งในทิศทาง x และ y สามารถสรุปได้ว่าการกระจัดในทิศทาง x ลดลงจาก 0.5437 mm เหลือ 0.3751 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.6846 mm เหลือ 0.5524 mm



รูปที่ 5.24 แสดงการกระจัดของเพลาในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแส ทั้งทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 300 RPM

ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลจากการรันมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 200 RPM จากการบันทึกค่าในช่วงเวลาที่ได้นำเสนอไปแล้วในข้างต้น โดยแบ่งการควบคุมออก 3 กรณี คือควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียว ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียวและควบคุมทิศทาง y และ x ตามลำดับ สรุปได้ว่าสามารถลดการสั่นในทิศทาง x สูงสุดที่ 30.69% และทิศทาง y สูงสุดที่ 30.29% และที่ความเร็วรอบ 300 RPM จากการบันทึกค่าในช่วงเวลาที่ได้นำเสนอไปแล้วในข้างต้น สรุปได้ว่าสามารถลดการสั่นในทิศทาง x สูงสุดที่ 31.03% และทิศทาง y สูงสุดที่ 26.88% และมีวงโคจรการหมุนที่ความเร็วรอบ 200 และ 300 RPM แสดงดังรูปที่ 5.25

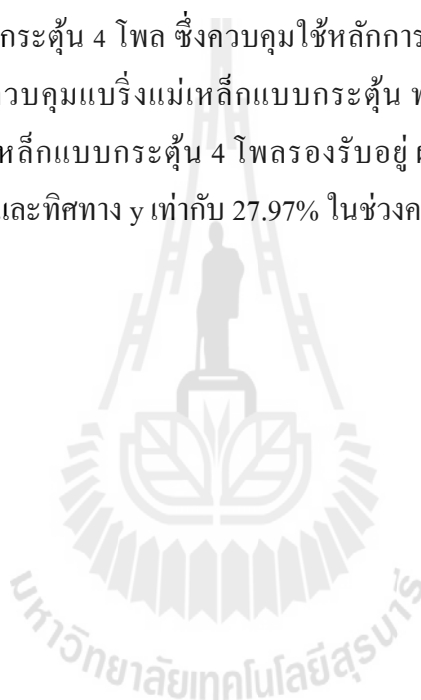


รูปที่ 5.25 แสดงเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนของเฟลามาเมื่อควบคุมในทิศทางต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบ 200 และ 300 RPM



## 5.5 สรุป

จากการทดสอบการลดการสั่นของเพลาดำวยระบบเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลรองรับด้านเดียว เมื่อพิจารณาผลจากการรันมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM โดยแบ่งการควบคุมออก 3 กรณีคือควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียว ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียว และควบคุมทิศทาง y และ x ตามลำดับ โดยใช้ตัวชดเชยเฟสด้วย ITAE 3<sup>rd</sup> Order จะเห็นได้ว่าสามารถตอบสนองต่อพฤติกรรมทางพลวัตและชดเชย Delay ที่เกิดขึ้นต่าง ๆ ไม่ว่าจะมาจากอุปกรณ์ หรือ ระบบควบคุมเองได้อย่างเหมาะสม เพื่อใช้ในการควบคุมขนาดแอมพลิจูดต่อไป ส่วนการควบคุมขนาดแอมพลิจูดนั้นได้ใช้ตัวควบคุมแบบ PD ในการควบคุมการป้อนกระแสให้กับเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ซึ่งควบคุมใช้หลักการ Switching Relay ON/OFF กระแสที่ไหลผ่านขดลวด เพื่อควบคุมเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น ทั้ง 4 ด้าน โดยพิจารณาที่ตำแหน่งปลายเพลาดำวยที่มีเบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลรองรับอยู่ ผลการทดลองสามารถลดการสั่นทิศทาง x เท่ากับ 28.67% และทิศทาง y เท่ากับ 27.97% ในช่วงความเร็วรอบ 100 RPM



## บทที่ 6

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล รับการสั่นด้านเดียว ซึ่งสามารถสรุปผลงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษาได้ดังนี้

1. ได้ประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเพลลาที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ด้วยการระบุเอกลักษณ์จากพฤติกรรมสั่นของเพลลาในแนวแกน x และ y โดยใช้วิธีการ Nonlinear Least Squares เพื่อการหาค่าสัมประสิทธิ์เทียบเท่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบซึ่งสามารถอธิบายการตอบสนองทางพลวัตของเพลลาเพื่อลดการสั่นได้

2. ได้ออกแบบระบบควบคุมแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ซึ่งระบบควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือควบคุมในแนวแกน x และแนวแกน y โดยใช้โปรแกรม MatLab/Simulink ผ่าน RAPCON Board เพื่อสั่งการ Switching Relay ON/OFF ในการจ่ายกระแสไฟฟ้า (แรงดัน) ให้แก่ขดลวด เพื่อสร้างแรงดึงดูดเพลลาในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของเพลลานั้น

3. ระบบควบคุมแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ที่ใช้การ Switching ผ่าน Relay ในแต่ละแนวแกนนั้น สามารถแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ

- ชดเชยเฟส เป็นการกำหนดจังหวะการให้แรงดึงดูดเพลลาให้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของเพลลา ซึ่งใช้วิธีปรับตามรูปแบบวงโคจรซึ่งเป็นการปรับตามมุมเฟสและปรับตาม Delay Time โดยปรับตามคาบเวลา เป็นการปรับแบบ Manual คือ หามุมเฟส และ Delay Time ที่เหมาะสม อยู่ที่  $3\pi/4$  และมี Delay Time เท่ากับ 0.2 วินาที เพื่อนำไปออกแบบตัวชดเชยเฟสด้วย ITAE 3<sup>rd</sup> Order บนแผนภาพโพล
- ควบคุมขนาดของแรงดึงดูดเพลลาซึ่งเป็นระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบ PD

4. ผลการทดสอบสามารถลดการสั่นของเพลลาในแนวแกน x ได้ 28.67% และลดการสั่นของเพลลาในแนวแกน y ได้ 27.97% ในช่วงความเร็วรอบ 100 – 300 RPM

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. วิธีการควบคุมแบบรีจัมแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลโดยใช้หลักการ Switching Relay ON/OFF มีข้อดีก็คือ มีราคาถูก ความทนทาน แต่ก็ยังมีข้อเสียคือ ขาดความต่อเนื่องในการควบคุม และอาจเกิดปัญหาเมื่อใช้ไปนาน ๆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความไม่เสถียรในควบคุมการทำงาน เนื่องจาก Relay มีอายุการใช้งานตามจำนวนการตัดต่อวงจร ซึ่งจำเป็นต้องออกแบบอุปกรณ์สั่งการทำงานของ รีจัมแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

2. ในทางปฏิบัติระบบเบร้งเป็นได้ทั้งตัวขับเคลื่อน (Drive) หรือตัวรองรับ ดังนั้นเพื่อให้สามารถครอบคลุมการทำงานมากขึ้นจำเป็นต้องใช้ ระบบเบร้งแม่เหล็กในแนวรัศมีทั้งสองด้าน และอาจมีความจำเป็นต้องใช้ ระบบเบร้งแม่เหล็กในแนวแกนร่วมด้วย และเนื่องจากระบบเบร้งแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีเพียง 4 โพล ซึ่งถือว่าไม่เพียงพอที่จะควบคุมเพื่อลดการสั่นที่เกิดขึ้นได้ จึงจำเป็นต้องออกแบบให้มีจำนวน โพลมากขึ้นอาจเป็น 6 หรือ 8 โพล แต่สิ่งที่ตามคือแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้น โครงสร้างทางกายภาพที่ต้องมีคลวดพันอยู่ภายในก็จะเป็นเงื่อนไขหรือข้อกำหนดในการออกแบบ

3. ความสามารถของตัวควบคุมแบบ PD นั้นเพียงพอที่จะควบคุมการสั่นได้ในช่วงที่กำหนดแต่สำหรับระบบที่ต้องการความแม่นยำหรือมีความละเอียดต่อการควบคุมสูงอาจไม่เพียงพอ จำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมที่ปรับตัวได้ (Adaptive Control) หรือตัวควบคุมที่มีความคงทน (Robust Control) เพื่อให้การตอบสนองทันต่อการเปลี่ยนแปลงและคงทนต่อการตอบสนองเพื่อ ยืนยันความมีเสถียรของระบบ และแก้ปัญหาการปรับเฟสของระบบได้

## รายการอ้างอิง

- จิระพล ศรีเสริฐผล (2554). **Mechanical Vibrations**, เอกสารประกอบการเรียนรายวิชา 425304 และ 525307, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 450 หน้า.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). **การควบคุมระบบพลศาสตร์**. (พิมพ์ครั้งที่ 2). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 848 หน้า.
- ศราวุฒิ สุจิตจร (2546). **การควบคุมอัตโนมัติ**. (พิมพ์ครั้งที่ 1). เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า. 456 หน้า.
- Adams, M.L., Jr. (2005). **Rotating Machinery Vibration: from Analysis to Trouble Shooting**, <http://www.dekker.com>
- Beale, S., Shafai, B., LaRocca, P., and Cusson, E. (1993). Adaptive Forced Balancing for Multivariable System. **Publication of American Control Conference 1993**, pp.2005-2206. June 2-4, 1993. San Francisco, CA, U.S.A.
- Boyd, S., Baratt, C., and Norman, S. (1990). Linear Controller Design: Limits of Performance Via Convex Optimization. **Proceedings of the IEEE**, Vol.78, No.3, March 1990. pp.529-574.
- 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, September 1996. pp.580-586.
- Inman, D.J. (2007). **Engineering Vibration 3rd**. Prentice Hall PTR. 688 pp.
- 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, March 1, 2001. pp.599-612.
- Johnson, J.M., and Bahmat-Samii, Y. (1994). Genetic Algorithm Optimization and its Application to Antenna Design. **Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**, Vol.1, pp.326-329. June 20-24, 1994. Seattle, WA, U.S.A.

- Lo, C.H., Chow, K.M., Wong, Y.K., and Rad, A.B. (2001). Qualitative System Identification with the Use of on-line Genetic Algorithm. **Journal of the Simulation Practice and Theory**, Vol.8, No 6-7, March 15, 2001. pp.415-431.
- 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, September 1996. pp.587-597.
- Matsumura, F., and Yoshimoto, T. (1986). System Modeling and Control Design of a Horizontal-Shaft Magnetic-Bearing System. **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol.22, No.3, May 1986. pp.196-203.
- Mitra, S.K. (2011). **Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach**. (4<sup>th</sup> edition). Copyright 2011, McGraw-Hill Higher Education. 927 pp.
- Nash, G.S., and Sofer, A. (1996). **Linear and Nonlinear Programming**. New York, McGraw-Hill Series in Industrial Engineering and Management Science. 692 pp.
- Ogata, K. (2002). **Modern Control Engineering**. (4<sup>th</sup> Edition), USA, Prentice Hall PTR. 964 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 Electrotechnique et Energetique**, pp.157-181. Bucarest 2007.
- Schweitzer, G., and Maslen, E.H. (2009). **Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery**. eBook: Springer Berlin Heidelberg, 535 pp.
- Sivrioglu, S. (2007). Adaptive Control of Nonlinear Zero-Bias Current Magnetic Bearing System. **Journal of Nonlinear Dynamics**, Vol.48, No.1-2, April 2007. pp.175-184.
- Zhang, K., and Zhang, X.Z. (2010). Rotor Dynamic Balance Making Use of Adaptive Unbalance Control of Active Magnetic Bearings. **International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA)**, Vol.2, pp.347-350. October 13-14, 2010.



ภาคผนวก ก

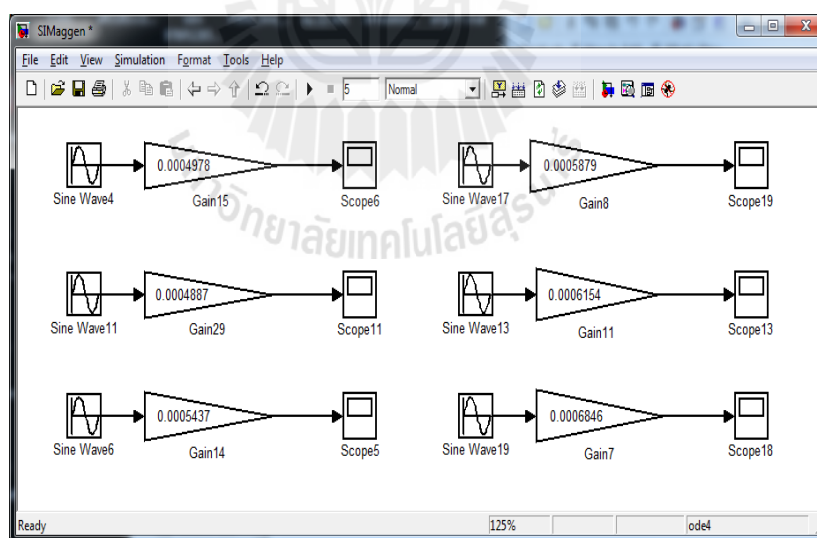
**การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation**

### ก. การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation

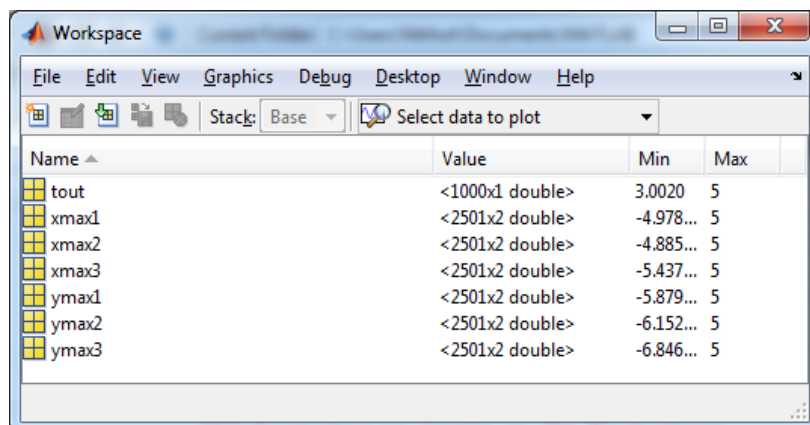
1. Import Data จากการทดลองไว้ใน Work Space ของ โปรแกรม MATLAB แต่ในการแสดงตัวอย่างการใช้งานจะสร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ Simulink โดยกำหนดตัวแปรและค่าของตัวแปรของระบบลงไปโดยข้อมูลที่ได้จากการรันโปรแกรมเปรียบว่าเป็นข้อมูลจากการทดลอง ดังรูปที่ ก.1 โดยกำหนดให้สัญญาณมีลักษณะเป็น Sine Wave และ Cosine Wave ซึ่งมีขนาดเท่ากับแอมพลิจูดที่ได้จากการทดลองมีค่าดังตารางที่ ก.1 กำหนดค่า Sampling เท่ากับ 0.002 sec เมื่อรัน โปรแกรม ข้อมูลการตอบสนองถูกแสดงผลที่ Scope และจะได้ข้อมูลใน Work Space ดังรูปที่ ก.2

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าแอมพลิจูดการสั่นสูงสุดที่ได้จากการทดลอง

ความเร็วรอบ (RPM)	ทิศทาง x (m)	ทิศทาง y (m)
100	0.0004978	0.0005879
200	0.0004887	0.0006154
300	0.0005437	0.0006846



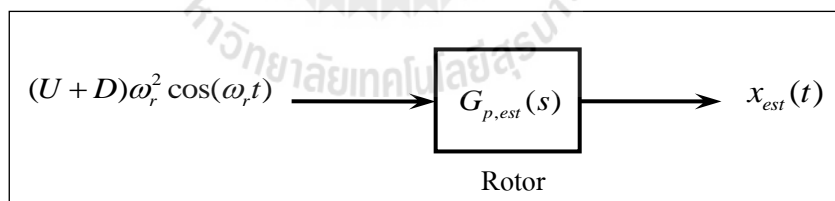
รูปที่ ก.1 แผนภาพการจำลองแอมพลิจูดการสั่นใน Simulink



รูปที่ ก.2 แผนภาพข้อมูลการตอบสนองใน Work Space

2. สร้างแบบจำลองของระบบโดยกำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้นของตัวแปรของที่ต้องการให้โปรแกรมประมาณค่าตัวแปร ดังรูปที่ ก.3 ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้

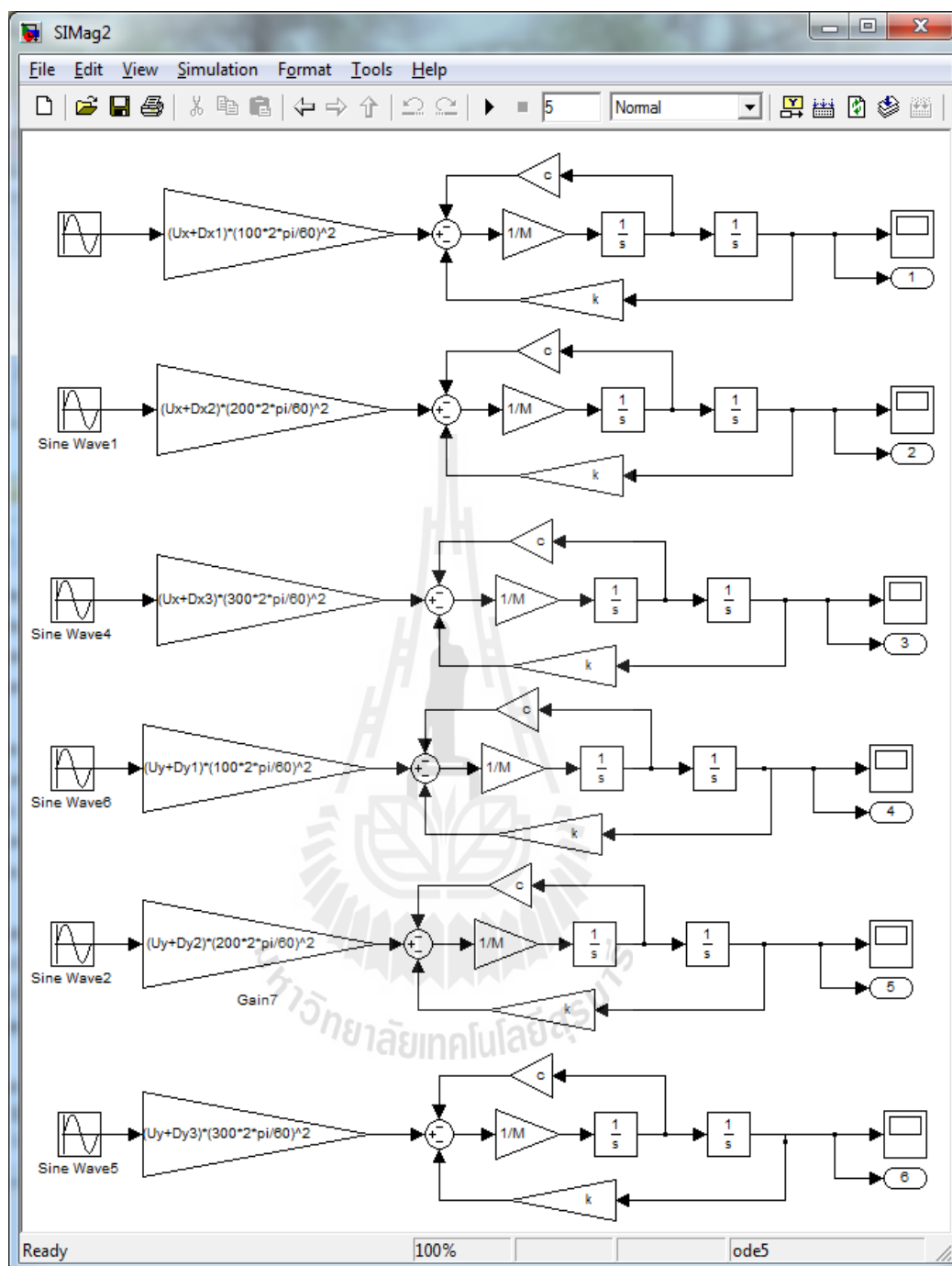
$$\text{Transfer function} = G_{p,est}(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \text{ เมื่อ } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ และ } \zeta = \frac{c}{2m_{est}\omega_n}$$



รูปที่ ก.3 แผนภาพระบบเปิดของระบบเทียบเท่าโรเตอร์

ซึ่งต้องการประมาณค่าคือ  $k_{est}$ ,  $c$ ,  $m_{est}$ ,  $U_x$  และ  $U_y$  ส่วนค่าพารามิเตอร์ของแรงรบกวนจะพิจารณาตามความเร็วรอบคือ ที่ 100 RPM จะมี  $D_{100x}$  กับ  $D_{100y}$  และในทำนองเดียวกันที่ 200 กับ 300 PRM ก็จะมี  $D_{200x}$  กับ  $D_{200y}$  และ  $D_{300x}$  กับ  $D_{300y}$  ตามลำดับ





รูปที่ ก.4 แผนภาพการจำลองระบบเทียบเท่าใน Simulink

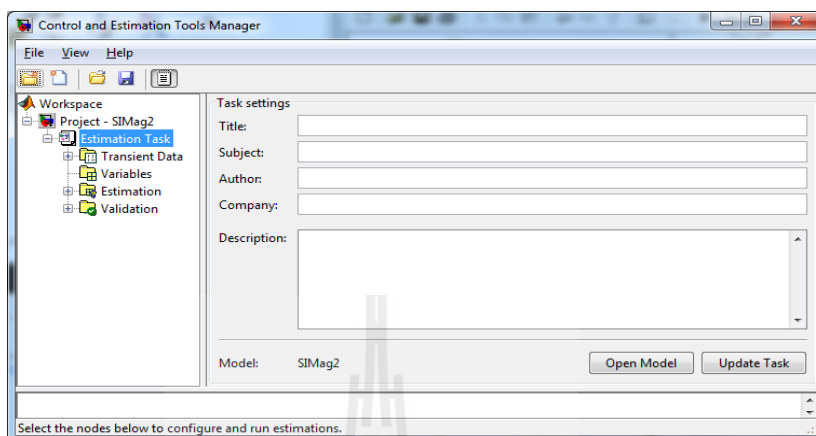
กำหนด Initial ให้กับพารามิเตอร์ที่จะประมาณค่า ใน Command Window ดังนี้

>>  $U_x=0.02$ ;  $U_y=0.02$ ;  $c=10$ ;  $M=1$ ;  $k=20000$ ;

>>  $D_{x1}=0.02$ ;  $D_{y1}=0.02$ ;  $D_{x2}=0.02$ ;  $D_{y2}=0.02$ ;  $D_{x3}=0.02$ ;  $D_{y3}=0.02$

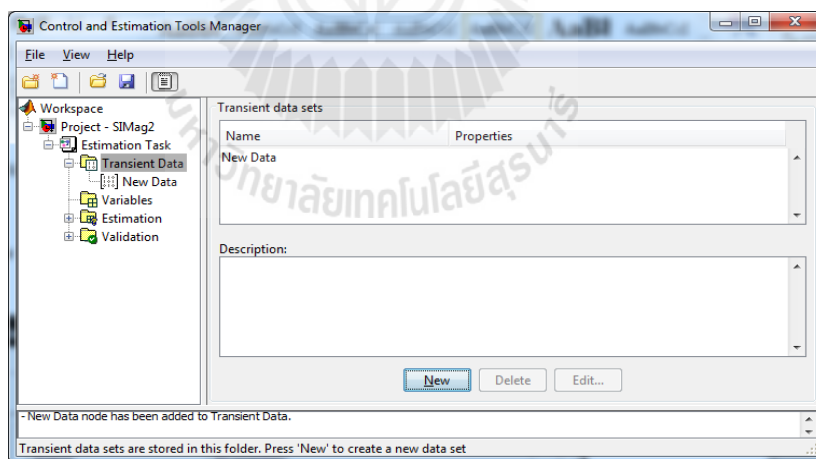
3. เปิด Parameter Estimation เลือก **tools** => **Parameter estimation** จะปรากฏหน้าต่างดังนี้

ขึ้นมา



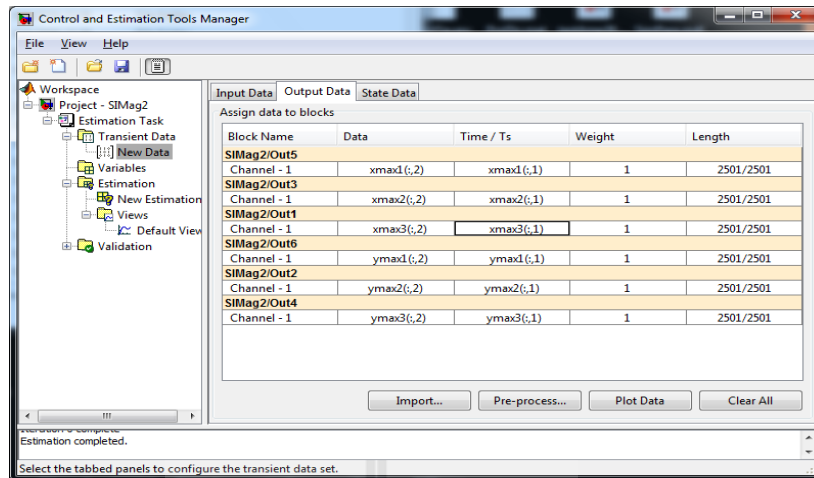
รูปที่ ก.5 แผนภาพแสดงหน้าต่างของ Control and Estimation Tools Manager

4. Click เลือก **Transient Data** => **New**



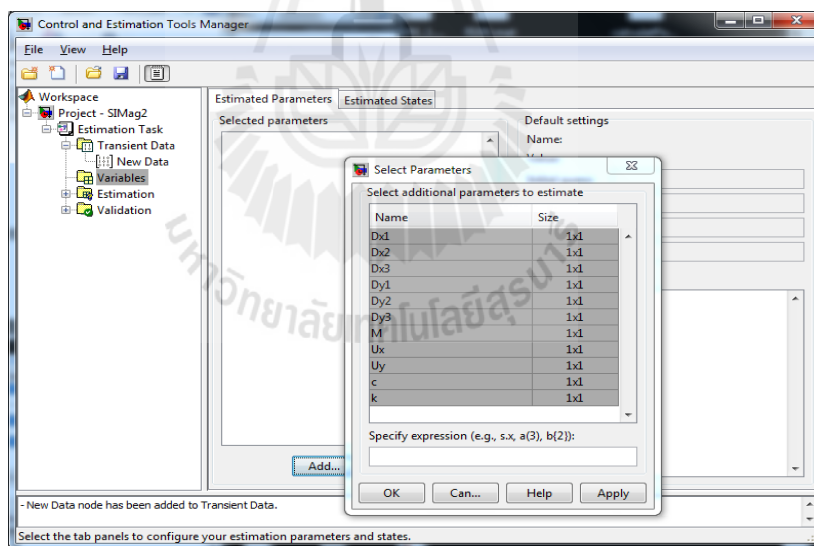
รูปที่ ก.6 แผนภาพแสดงหน้าต่างของการเลือก New Data

5. Click . **New Data** => **Output Data** => **Import** เพื่อเลือก  $x_{max1}$  ถึง  $x_{max3}$  และ  $y_{max1}$  ถึง  $y_{max3}$  และ Time ซึ่งเป็น Array ในแถวแรกของทุกค่า



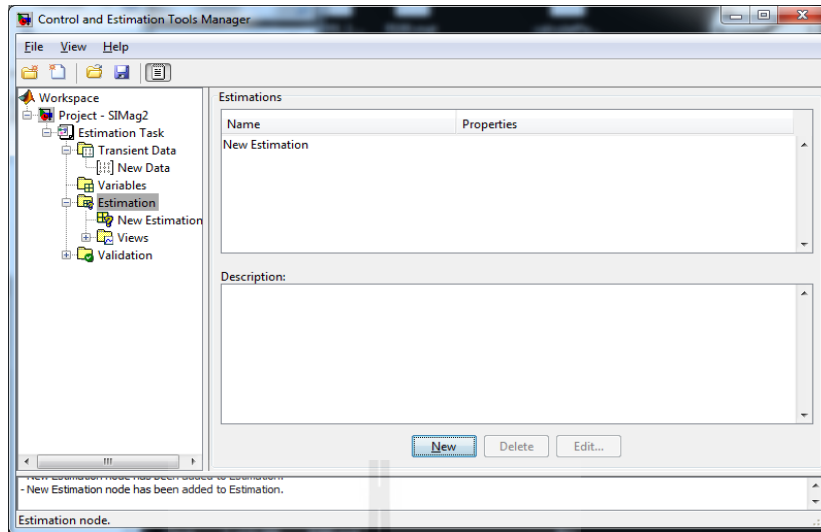
รูปที่ ก.7 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลเข้า

6. Click **Variables** => **Add** => เลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า => **OK**



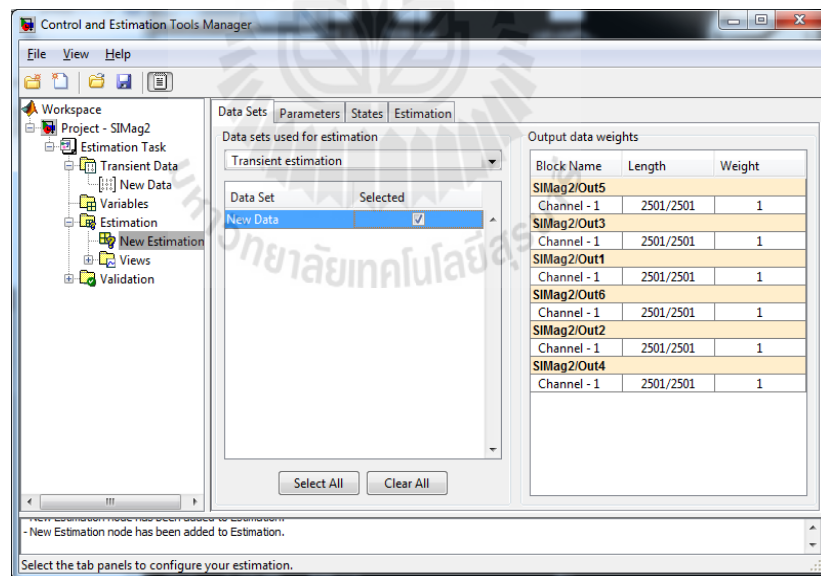
รูปที่ ก.8 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณ

7. Click **Estimation** => **New** (จะปรากฏ New Estimation) แสดงดังรูปที่ ก.9



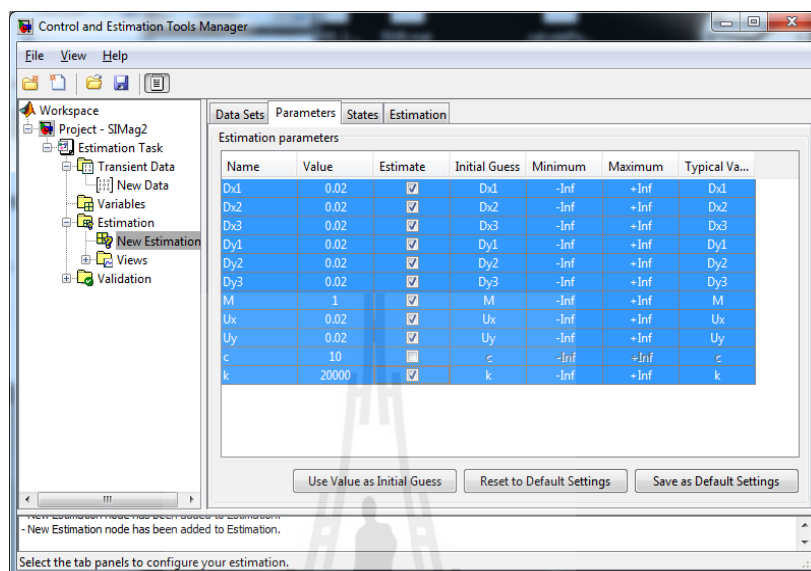
รูปที่ ก.9 แผนภาพแสดงหน้าต่างการสร้าง New Estimation

8. Click **New estimation** => **select all**

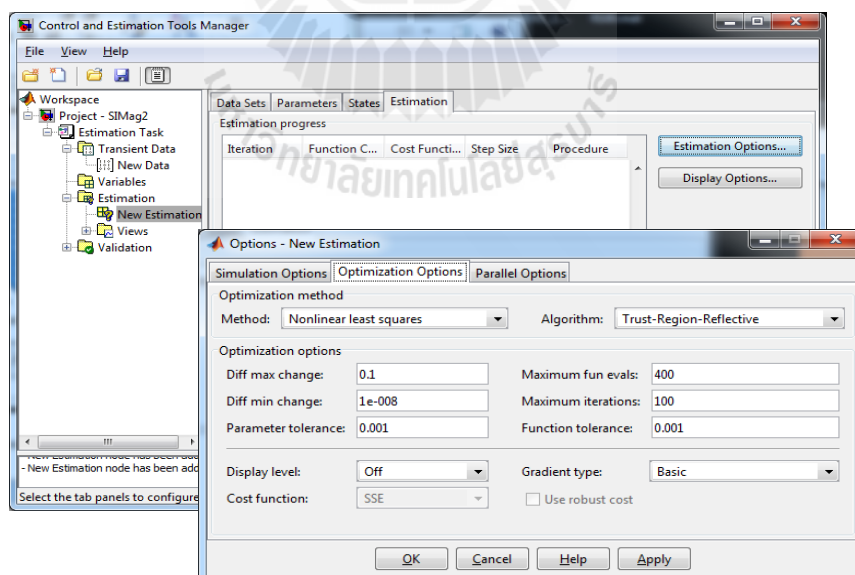


รูปที่ ก.10 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลในการ Estimate

9. Click **Parameters** => Click เลือก Estimate ทุกตัวแปร ดังรูปที่ ก.11 และ Click **Estimation** => **Estimation Option** เพื่อกำหนด อัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร ดังรูปที่ ก.12

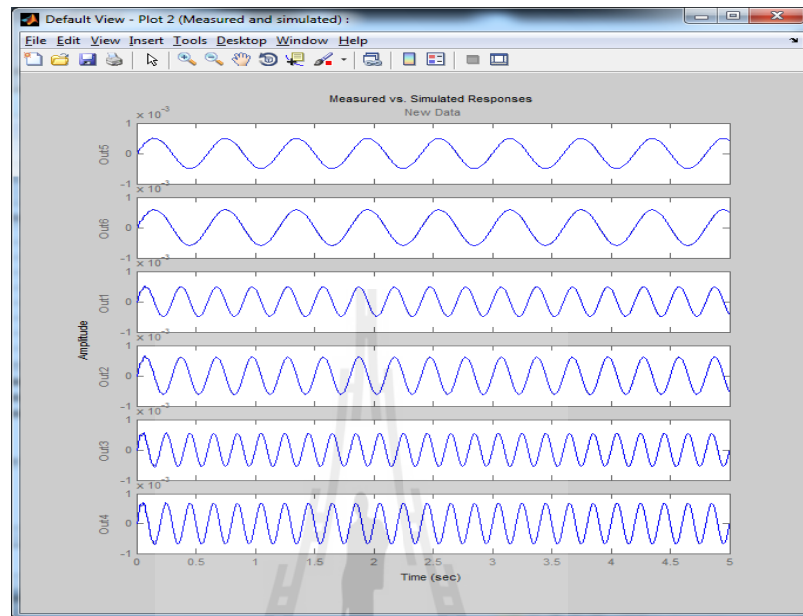


รูปที่ ก.11 แผนภาพแสดงหน้าต่างการกำหนดตัวแปรที่ต้องการประมาณ



รูปที่ ก.12 แผนภาพแสดงการกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร

10. Click **Estimation** => **Show progress views** (เพื่อแสดงกราฟการประมาณค่าตัวแปร และกราฟการตอบสนองที่ได้จากการประมาณ) => **Start** ดังรูปที่ ก.13



รูปที่ ก.13 แผนภาพแสดงการเริ่มการประมาณค่าตัวแปร

11. Click **Parameters** เพื่อดูค่าตัวแปรที่โปรแกรมประมาณได้

Name	Value	Estimate	Initial Guess	Minimum	Maximum	Typical Va...
Dx1	0.06971	<input checked="" type="checkbox"/>	Dx1	-Inf	+Inf	Dx1
Dx2	0.0012043	<input checked="" type="checkbox"/>	Dx2	-Inf	+Inf	Dx2
Dx3	-0.010091	<input checked="" type="checkbox"/>	Dx3	-Inf	+Inf	Dx3
Dy1	0.079877	<input checked="" type="checkbox"/>	Dy1	-Inf	+Inf	Dy1
Dy2	0.00069555	<input checked="" type="checkbox"/>	Dy2	-Inf	+Inf	Dy2
Dy3	-0.013529	<input checked="" type="checkbox"/>	Dy3	-Inf	+Inf	Dy3
M	0.51731	<input checked="" type="checkbox"/>	M	-Inf	+Inf	M
Ux	0.020824	<input checked="" type="checkbox"/>	Ux	-Inf	+Inf	Ux
Uy	0.027044	<input checked="" type="checkbox"/>	Uy	-Inf	+Inf	Uy
c	10.001	<input checked="" type="checkbox"/>	c	-Inf	+Inf	c
k	20000	<input checked="" type="checkbox"/>	k	-Inf	+Inf	k

รูปที่ ก.14 แผนภาพแสดงค่าตัวแปรที่โปรแกรมประมาณได้



ภาคผนวก ข

ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board และการติดตั้ง Hardware

## ข.1 ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board

### 1. INTRODUCTION

The RAPCON platform offers a seamless interface between physical plants and Matlab/Simulink for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems. It is fully integrated into Matlab/Simulink and has a broad range of inputs and outputs. The platform is a complete and low-cost real-time control system development package for both educational and industrial applications.

The RAPCON platform consists of the real-time control board (hardware) and the associated Matlab interface (software). The hardware of the RAPCON platform has  $8 \times 12$  bit analog inputs,  $2 \times 16$  bit capture inputs,  $2 \times 16$  bit encoder inputs,  $1 \times 8$  bit digital input,  $2 \times 12$  bit analog outputs,  $2 \times 16$  bit frequency outputs,  $2 \times 16$  bit pulse outputs and  $1 \times 8$  bit digital output. The board also contains 2 H-bridges with 5 A capability to drive external heavy loads. Some inputs and outputs are multiplexed to simplify the hardware. The board is interfaced to the host computer that runs Matlab through a serial port. The software of the RAPCON platform is fully integrated into Matlab/Simulink/Real-Time Windows Target and comes with Simulink library blocks associated with each hardware input and output. The library contains Analog Input Block, Capture Input Block, Encoder Input Block, Digital Input Block, Analog Output Block, Frequency Output Block, Digital Output Block and Pulse Output Block. The platform achieves real-time operation with sampling rates up to 15.2 kHz.

The RAPCON platform has been developed to extend and optimize the real-time operation of Matlab, Simulink and Real-Time Windows Target. The developed platform is uniquely integrated into Matlab to achieve real-time operation in Matlab under Windows. The salient features of the RAPCON platform make it ideal for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems in both educational and industrial applications.

#### 1.1. Specifications

- Power supply: 6 – 15 V, minimum 0.15 A, regulated
- Interface: 460800 baud, 8 bit data, no parity, 1 stop bit
- Analog inputs: A0–A7, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Capture inputs: C0–C1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Digital inputs: D0\_d0–D0\_d7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Encoder inputs: E0–E1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Frequency outputs: F0–F1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution



- Analog outputs: B0–B1, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Digital outputs: G0\_g0–G0\_g7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Pulse outputs: H0–H1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Filtered pulse outputs: L0–L1, 0 – 5 V analog
- H-bridge outputs: P0–P1, 0–(supply voltage) V digital, 5 A
- Voltage regulator output: VDD, 5 V, 0.25 A, regulated power supply
- Ground: GND, 0 V
- Sampling rate: up to 15.2 kHz

### 1.2. Requirements

- PC with Windows XP or later and an expansion slot for a serial card
- Serial crossover (null modem) cable
- Matlab R2007b or later with Simulink, Real-Time Workshop and Real-Time Windows Target
- RAPCON hardware (real-time control board) 1.5 or later
- RAPCON software 1.5 or later
- Power supply (regulated, 6 – 15 V and at least 0.15 A without any load)

### 1.3. Absolute Maximum Ratings

- Power supply voltage: minimum 3 V, maximum 16 V
- Each analog, digital, capture and encoder input: minimum –0.3 V, maximum +5.3 V
- Each analog, digital, frequency and pulse output: minimum –25 mA, maximum +25 mA
- Each filtered pulse output: minimum –25 mA, maximum +25 mA
- Each H-bridge output: minimum –5 A, maximum +5 A
- Total current from/into all inputs and outputs (except power supply, voltage regulator and H-bridges): minimum –200 mA, maximum +200 mA
- Voltage regulator output: maximum 0.5 A (total)
- Operating ambient temperature: minimum 10 °C, maximum 50 °C

## 2. HARDWARE

The real-time control board is based on a dsPIC30F2012 digital signal controller. It has a total number of  $8 \times 16$  bit inputs and  $8 \times 16$  bit outputs capability. The inputs and outputs can be selected among the inputs and outputs listed above. The board is interfaced to the main computer that runs Matlab through a serial port. Two pulse-width modulation driven H-bridges with 5 A drive capability are included on the board to drive external actuators or loads. The functional block diagram of the board is shown in Figure 1, where A0–A7 are the analog inputs, B0–B1 are the analog outputs, C0–C1 are the capture inputs, D0\_d0–D0\_d7 are the digital inputs, E0–E1 are the encoder inputs, F0–F1 are the frequency outputs, G0\_g0–G0\_g7 are the digital outputs and H0–H1 are the pulse outputs; ADC represents the analog-to-digital converter, DAC represents the digital-to-analog converter, ICM represents the input-capture module, OCM represents the output-compare module, DIP represents the digital-input port, DOP represents the digital-output port, QEM represents the quadrature-encoder module and PWM represents the pulse-width modulator; FLs are the lowpass filters with outputs L0–L1 and HBs are the H-bridges with outputs P0–P1; and  $\mu C$  is the central microcontroller, UART is the universal-asynchronous-receiver-transmitter unit and PC is the host computer.

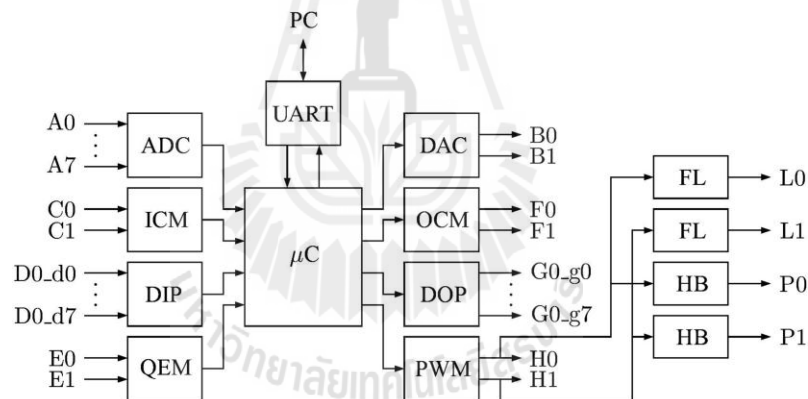


Figure 1. Functional block diagram of the board.

The layout of the board is shown in Figure 2. The inputs and outputs are connected to the board through standard pin header type connectors. The pins of all connectors are clearly indicated on the board for convenience. Access to the on-board 5 V, 0.25 A voltage regulator output is also provided for external light power supply requirements.

## ข.2 การติดตั้ง Hardware กับโปรแกรม

1. ติดตั้งโปรแกรม MATLAB 2007b หรือเวอร์ชันที่สูงกว่ากับ Windows
2. ติดตั้ง Driver ของ PCI Serial Card ด้วยการเชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable
3. ติดตั้ง Real – Time Workshop และ Real – Time Windows Target
4. โหลดไฟล์ติดตั้งจาก Website <http://zeltom.com> ติดตั้งไฟล์ rapcon2009b.exe ซึ่งในที่นี้ใช้ MATLAB เวอร์ชัน 2009b สำหรับ Windows 7 จะมีไฟล์ rtwt\_2009b\_win7\_fix.zip มาด้วย ซึ่งการติดตั้ง ต้องทำทีละขั้นตอน ด้วยวิธีการดังนี้

5. เข้าไปหาไฟล์ที่ชื่อว่า rtwin\_main.c ภายในคอมพิวเตอร์ เช่น

“C:\Program Files\MATLAB\R2009b\toolbox\rtw\targets\rtwin\src” แล้วเปลี่ยนชื่อไฟล์ rtwin\_main.c เป็น rtwin\_main.org และ copy ไฟล์ rtwin\_main.c ในโฟลเดอร์ติดตั้งของ Rapcon มาใส่ไว้ใน Directory นี้

6. เข้าไปที่ Control Panel -> Device Manager เพื่อทำการเปลี่ยน Base Address และตรวจสอบ Comport Number ของ Serial Port หลังจากนั้นดูที่ Base Address ตัวแรกว่ามี I/O Range เท่าไร เช่น I/O Range EC80 - EC87, Base Address คือ EC80 ในเลขฐาน 16 ซึ่งมีค่าเท่ากับเลขฐานสองคือ 60544 แล้วเข้าโปรแกรม MATLAB ไปในโฟลเดอร์ไฟล์ติดตั้งของ Rapcon เปิดไฟล์ชื่อ rtwinpi.tlc และ rtwinpo.tlc แล้วทำการแก้ไขใน m.file ดังนี้

```
if DrvAddress == 5
    assign ::com = 1016
endif
```

7. สำหรับ Windows 7 Real-Time Windows Target จะถูกป้องกันไว้ดังนั้นจะต้อง copy ไฟล์ rtwtkml.sys ใน rtwt\_2009b\_win7\_fix.zip ที่โหลดมา ไปไว้ที่

“C:\Program Files\MATLAB\R2009b\toolbox\rtw\targets\rtwin\kernel\win32”

8. พิมพ์ “rtwintgt -install” ใน Command Window ของโปรแกรม MATLAB เพื่อติดตั้ง RTWT kernel ก็เป็นอันเสร็จสมบูรณ์



ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Srisertpol, J., Numanoy, N., Hemsuwan, W. and Paola-or, P. (2012) Unbalance Control of the shaft with Active Magnetic Bearing by Adaptive PID Controller. **The 26<sup>th</sup> Mechanical Engineering Conference**, CD ME-NEET26, DRC2038, 7pp. October 24-27, 2012. Chiangrai, Thailand.



รหัสบทความ  
DRC 2038

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



การควบคุมความไม่สมดุลของเพลาด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นโดยใช้ตัวควบคุม  
PID ปรับตัวได้  
Unbalance Control of the Shaft with Active Magnetic Bearing by  
Adaptive PID Controller

จิระพล ศรีเสริญผล<sup>1\*</sup>, นิตศักดิ์ หนูมาน้อย<sup>1</sup>, วิฑูรย์ เข็มสุวรรณ<sup>1</sup> และ เผด็จ เฝ้าละออง<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

\*ติดต่อ: E-mail: jiraphon@sut.ac.th, โทรศัพท์: 0-4422-4412, โทรสาร: 0-4422-4413

**บทคัดย่อ**

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการชดเชยการสั่นของเพล่าที่เกิดความไม่สมดุล ด้วยการสร้างแรงจากแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นเข้าลดการสั่นของระบบ โดยใช้ตัวควบคุมปรับตัวได้ PID กับแบบจำลองอ้างอิง  $2^{\text{nd}}$  order ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพของเลียปูนอฟ (Lyapunov's Stability Theory) เพื่อช่วยยืนยันว่า การปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมมีเสถียรภาพ ผลการศึกษาพบว่า การควบคุมและการชดเชยการสั่นด้วยการสร้างแรงจากแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นให้มีขนาดแอมพลิจูดที่เท่ากันและมุมเฟสตรงกันข้ามกับความไม่สมดุล สามารถลดการสั่นได้ถึง 95 – 99%

**คำหลัก:** แบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น, ตัวควบคุม PID ปรับตัวได้, แบบจำลองอ้างอิง  $2^{\text{nd}}$  order

**Abstract**

This paper proposes a research concerning the compensate unbalance of the shaft with active magnetic bearing, to reduce the vibration by adaptive PID controller with  $2^{\text{nd}}$  order model reference system. Under the stability of algorithm by means of Lyapunov's Stability Theory, to confirm parameters of the control is stable. As a result, the control and vibration compensation by force of active magnetic bearing to have the same amplitude and the opposite phase imbalance, the vibration is reduced by 95 – 99%

**Keywords:** Active Magnetic Bearing, Adaptive PID Controller,  $2^{\text{nd}}$  Order Model Reference

**1. บทนำ**

ปัจจุบันในต่างประเทศได้มีการวิจัยและพัฒนาประยุกต์ใช้ระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น (Active Magnetic Bearing System; AMB) ทดแทนการใช้แบริ่งแบบลูกปืน เพื่อลดปัญหาการสั่นที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการทำงานระหว่างระบบแบริ่งทั่วไปกับระบบแม่เหล็กจะพบว่าระบบแบริ่งแม่เหล็ก มีข้อดีที่เป็นประโยชน์คือ การสัมผัสของเครื่องจักรระหว่างแบริ่งกับโรเตอร์และการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าน้อย สามารถลดการสึกหรอเครื่องจักรได้โดยไม่ต้องใช้สารหล่อลื่น และสามารถทำงานที่ความเร็วสูงได้ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักรได้ แบริ่งแม่เหล็กสามารถนำมาใช้ในการลด

การสั่นของเพล่าที่เกิดความไม่สมดุลได้ แต่เนื่องจากการควบคุมการทำงานของแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นมีความซับซ้อนและยุ่งยาก ส่งผลให้ชุดควบคุมระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นมีราคาแพง จึงยังไม่เป็นที่นิยมกันมากนัก โดยเฉพาะในประเทศไทย ซึ่งแนวโน้มในอนาคตมีความเป็นไปได้ที่ระบบแบริ่งแบบกระตุ้นจะเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรม

ได้มีการนำเสนอระบบสมการและออกแบบการควบคุมเพล่าที่รองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็กใน [1] แต่เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นในการควบคุม ทำให้มีการนำเสนอการควบคุมทั้งในส่วนของสัญญาณและตัวควบคุม [2] ได้นำเสนอการชดเชยสัญญาณด้วย PWM บนตัวควบคุมกำลังสองเชิงเส้น (LQR), [3] ใช้การ



## รหัสบทความ

DRC 2038

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

กระตุ้นแบบ real time ด้วยวิธี Least Square Estimation, [4] ได้เสนอตัวควบคุมป้อนกลับปรับตัวได้ด้วยเอาต์พุตย้อนกลับ (Output Adaptive Backstepping), [5] ใช้ตัวชดเชยปรับตัวป้อนไปข้างหน้า (Adaptive Feed Forward Compensation) เพื่อปรับเพลาให้อยู่ตำแหน่งศูนย์กลาง และ [6] ได้เสนอวิธีการเชิงตัวเลขปรับแอมพลิจูดและมุมเฟสของการสั่นบนเงื่อนไขของรีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้น

งานวิจัยที่นำเสนอเป็นการชดเชยการสั่นของเพลาที่เกิดความไม่สมดุล ด้วยการสร้างสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กแบบกระตุ้นเพื่อลดการสั่นของระบบ โดยใช้ตัวควบคุมปรับตัวได้ PID กับแบบจำลองอ้างอิง 2<sup>nd</sup> order และใช้เงื่อนไขของ Lyapunov's Stability Theory

## 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หัวข้อนี้จะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแม่เหล็กแบบกระตุ้นรวมถึงสมการความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุน โดยมีจุดประสงค์หลักคือ ลดการสั่นและสามารถควบคุมแม่เหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะต้องควบคุมแรงที่เกิดขึ้นที่มีลักษณะพฤติกรรมเคลื่อนที่ที่เหมือนกับระบบเชิงกลที่มี Spring-Damped [7] โดยมีแบบจำลองของเพลาที่มีแม่เหล็กแบบกระตุ้นรองรับที่ปลายดังรูปที่ 1 เมื่อเพลาเกิดความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุนจะทำให้เกิดแรงกระทำที่แม่เหล็ก ซึ่งแม่เหล็กจะทำการสร้างแรงในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อหักล้างกับแรงที่เกิดขึ้น

2.1 แบบจำลองของแรงแม่เหล็ก  
จากสมการการเคลื่อนที่ของนิวตันจะได้ว่า

$$m\ddot{x} = F_1 - F_2 + F_d \quad (1)$$

เมื่อ

$$F_1 - F_2 = \frac{\mu_0 AN^2}{4} \left[ \left( \frac{i_0 + i}{x_0 + x} \right)^2 - \left( \frac{i_0 - i}{x_0 - x} \right)^2 \right] \quad (2)$$

ความไม่เป็นเชิงเส้นของแรงดึงดูดกับขดลวดกระแสลดลงหรือเพิ่มขึ้นที่เป็นผลมาจากกระแสที่ป้อนเข้าไปในขดลวด สามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้นได้โดยใช้อนุกรมเทเลอร์อธิบาย ณ จุดทำงาน (Operating Point) ที่  $i = x = 0$

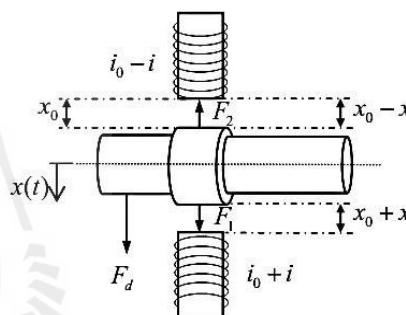
$$F(x_0 + x, i_0 + i) = F(x_0, i_0) + x \frac{\partial F(x_0, i_0)}{\partial x_0} + i \frac{\partial F(x_0, i_0)}{\partial i_0} \quad (3)$$

ทำให้ได้  $F_x$  ดังสมการที่ (4)

$$F_x = -k_s x + k_i i \quad (4)$$

$$\text{โดยที่ } k_s = 4k_m \frac{i_0^2}{x_0^3} \text{ และ } k_i = 4k_m \frac{i_0}{x_0^2}$$

เมื่อ  $k_m = \mu_0 AN^2 / 4$  คือความสามารถในการดึงดูดของแม่เหล็ก ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permeability ของอากาศ พื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็ก และจำนวนการพันขดลวดกำลังสอง



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงแรงแม่เหล็กใน 1 DOF

เมื่อ

- $x_0$  ระยะระหว่างแม่เหล็กถึงผิวของเพลาในสภาวะสมดุล (แกนเพลาอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างแม่เหล็กทั้ง 2 ด้าน) [m]
- $x$  การกระจัดของเพลาในตำแหน่งสมดุล [m]
- $F_1, F_2$  แรงเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า [N]
- $F_d$  แรงกระทำจากภายนอกที่กระทำกับเพลา [N]
- $i$  กระแสในการควบคุมแม่เหล็ก [A]
- $i_0$  กระแสเริ่มต้น [A]
- $m$  มวลของเพลา [kg]
- $\mu_0$  Permeability ของอากาศ [ $4\pi \times 10^{-7} \text{ V.s/Am}$ ]
- $A$  พื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็ก [m<sup>2</sup>]
- $N$  จำนวนการพันขดลวด [turn]
- $k_s$  Displacement Stiffness [N/m]
- $k_i$  Current Stiffness [N/A]

จากสมการที่ (4) จะเห็นได้ว่า ไม่สามารถควบคุมแรงแม่เหล็กได้ เพราะระบบไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) เนื่องจาก เทอมแรกด้านขวาของสมการที่ (4) มีค่า

## รหัสบทความ

DRC 2038

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



เป็นลบ ที่เป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กมีขนาดลดลงเมื่อช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งจะตรงกันข้ามกับระบบทางกลที่ขนาดของแรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อสปริงยืดออกมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบตัวควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพและเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ

### 2.2 สมการความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุน

พิจารณาเพลาลูกเบี้ยวที่มีแบริ่งรองรับทั้งสองด้านโดยมีดิสก์แบบแข็งเกร็งอยู่ตรงกึ่งกลาง [8] เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าทำงานส่งผลให้เพลาลูกเบี้ยวด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ สมการการเคลื่อนที่ของดิสก์หาได้จากกฎข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงและโมเมนต์ดังนี้

$$m_d \ddot{x} + kx = m_d d \Omega^2 \cos(\Omega t + \theta) \quad (5)$$

$$m_d \ddot{y} + ky = m_d d \Omega^2 \sin(\Omega t + \theta) - f_g \quad (6)$$

โดยที่  $k = 48EJ/l^3$  และ  $J = \pi d^4/64$

เมื่อ

$\Omega$  ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า [ $rpm$ ]

$\theta$  มุมที่เปลี่ยนไปจากมุมอ้างอิง [ $rad$ ]

$d$  ระยะจุดศูนย์กลางดิสก์กับจุดศูนย์กลาง [ $m$ ]

$f_g$  แรงเนื่องจากน้ำหนักของดิสก์ [ $N$ ]

$k$  Stiffness ของเพลาลูก [ $N/m$ ]

$E$  Young's Modulus ของเพลาลูก [ $N/m^2$ ]

$J$  Area moment of inertia ของเพลาลูก [ $m^4$ ]

$l$  ความยาวของเพลาลูก [ $m$ ]

### 3. อัลกอริทึมตัวควบคุม PID ปรับตัวได้กับ

#### แบบจำลองอ้างอิง $2^{nd}$ order

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างระบบควบคุมปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลองจากวิธีการของ Lyapunov's Stability Theory เพื่อปรับสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมแบบ PID ของระบบให้มีการตอบสนองเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงโดยใช้เงื่อนไขเสถียรภาพ ในการสร้างอัลกอริทึมจากวิธีการ Lyapunov's Stability Theory โดยกำหนดค่าของ Lyapunov Function และหาค่าอนุพันธ์ของ Lyapunov Function เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขในการปรับตัวดังรูปที่ 2 ที่แสดงการใช้ตัวควบคุม PID ในการปรับค่าพารามิเตอร์โดยอ้างอิงแบบจำลองเมื่อเพลาลูกด้วยความเร็วรอบคงที่ ทำให้เกิดการสั่นเนื่องจากความไม่สมดุลของเพลาลูกหรือภาระกรรมจาก

ภายนอก ซึ่งในการควบคุมจะสร้างแอมพลิจูดที่มีขนาดและมุมเฟสตรงกันข้ามกับการสั่นด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น โดยอ้างอิงจากแบบจำลองที่เป็นระบบ  $2^{nd}$  order ในการเปรียบเทียบการตอบสนองกับระบบ แล้วใช้ค่าความผิดพลาด (error) ในการปรับพารามิเตอร์ PID เพื่อให้การควบคุมเป็นไปตามจุดประสงค์

#### 3.1 ระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น

$$\ddot{x}_p = a_p \dot{x}_p + a_{p0} x_p + b_p i + f(t) \quad (7)$$

โดยความสัมพันธ์ของสมการที่ (7) เป็นไปตามสมการที่ (1) - (4) เมื่อ  $x_p$  คือ เอาท์พุท,  $i$  คือตัวควบคุม (Controller) ในการควบคุมสนามแม่เหล็กในแบริ่ง,  $a_p$ ,  $a_{p0}$  และ  $b_p$  คือค่าคงที่สัมประสิทธิ์ของระบบแม่เหล็ก และ  $f(t)$  คือ สัญญาณรบกวน (Disturbance) ที่ไม่เป็นเชิงเส้น

#### 3.2 แบบจำลองอ้างอิง

ในส่วนของแบบจำลองอ้างอิงนั้นจะออกแบบกับระบบที่เป็น  $2^{nd}$  order

$$\ddot{x}_m = a_m \dot{x}_m + a_{m0} x_m + b_m x_r \quad (8)$$

$$\frac{x_m(s)}{x_r(s)} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

หรือเมื่อเขียนรูปสมการอนุพันธ์แล้วเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์กับสมการที่ (8) จะได้  $a_m$ ,  $a_{m0}$  และ  $b_m$  คือค่าคงที่สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองอ้างอิงซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency:  $\omega_n$ ) และอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio:  $\zeta$ ) ซึ่งมีค่า ดังนี้  $a_m = -2\zeta \omega_n$ ,  $a_{m0} = -\omega_n^2$  และ

$$b_m = K \omega_n^2 \text{ เมื่อ } K = 1$$

#### 3.3 ตัวควบคุมปรับตัวได้ PID

กำหนดให้ Control law ที่ใช้ในการควบคุมแรงภายในแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นเป็นการควบคุมกระแสภายในแม่เหล็ก  $i(t)$  เพื่อให้เกิดแรงตามต้องการดังนี้

$$i(t) = K_p^x x_p + K_D^x \dot{x}_p + K_I^x x_r + K_e + I_e \quad (10)$$

โดยมีสัมประสิทธิ์  $K_p^x$  และ  $K_D^x$  ทำหน้าที่ในการปรับตัวระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น ส่วน  $K_I^x$  ใช้สำหรับปรับตัวของแบบจำลองอ้างอิง และได้มีการเพิ่ม



รหัสบทความ  
DRC 2038

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



สัมประสิทธิ์ของตัวชดเชยค่าความผิดพลาด  $K_e$  และ  $I_e$  ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้ state-space ของระบบ และแบบจำลองอ้างอิงเป็นดังนี้

$$\hat{x}_p = \begin{bmatrix} \hat{x}_{p1} \\ \hat{x}_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p \\ \dot{x}_p \end{bmatrix}, \hat{x}_m = \begin{bmatrix} \hat{x}_{m1} \\ \hat{x}_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix}$$

$$\text{และ } \hat{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \hat{x}_m - \hat{x}_p = \begin{bmatrix} x_m - x_p \\ \dot{x}_m - \dot{x}_p \end{bmatrix}$$

$$\dot{\hat{x}}_p = A_p \hat{x}_p + B_p i + F$$

$$\dot{\hat{x}}_m = A_m \hat{x}_m + B_m x_r$$

โดย  $x_p$ ,  $x_m$  และ  $x_r$  คือการกระจัดของแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น แบบจำลองอ้างอิง และการกระจัดของความไม่สมดุลตามลำดับ ซึ่ง  $\hat{e}$  คือค่าความผิดพลาดของแบบจำลองอ้างอิงกับระบบแบริ่งแม่เหล็ก มีจุดประสงค์ต้องการให้ error  $\hat{e}$  เข้าสู่ศูนย์ ที่สภาวะคงตัว จะได้ว่า

$$\dot{\hat{e}} = A_m \hat{e} + (A_m - A_p) \hat{x}_p + B_m x_r - B_p i - F \quad (11)$$

โดยที่  $A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{m0} & a_{m1} \end{bmatrix}$ ,  $A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{p0} & a_{p1} \end{bmatrix}$ ,

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ b_p \end{bmatrix}, B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ b_m \end{bmatrix} \text{ และ } F = \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \end{bmatrix}$$

เลือก Lyapunov Function:  $V$  ให้เป็น Positive Definite ดังสมการที่ (12)

$$V(\hat{e}) = \hat{e}^T P \hat{e} + \frac{1}{2\gamma} I_e^2 \quad (12)$$

เมื่อ  $P$  เป็น Symmetric Positive Definite Matrix ( $P \in R^{2 \times 2}$ )

มีผลเฉลยของสมการ Lyapunov Equation ดังนี้

$$P A_m + A_m^T P = -Q \quad (13)$$

$Q$  ( $Q \in R^{2 \times 2}$ ) คือ Symmetric Positive Definite Design Matrix และ  $\gamma$  คือ adaptive gain จากสมการที่ (12) เมื่อทำการอนุพันธ์แล้วแทนสมการที่ (11) และ (13) จะได้

$$\dot{V} = -\hat{e}^T Q \hat{e} + 2\hat{e}^T P (A_m - A_p) \hat{x}_p - 2\hat{e}^T P F - 2\hat{e}^T P B_p i + 2\hat{e}^T P B_m x_r + \frac{I_e}{\gamma} \frac{dI_e}{dt} \quad (14)$$

ในการควบคุมจะใช้ค่าความผิดพลาด ในการปรับสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม PID แต่เนื่องจากสมการอยู่ในรูปเมทริกซ์ จึงกำหนดให้

$$\varepsilon = G \cdot \hat{e} \quad (15)$$

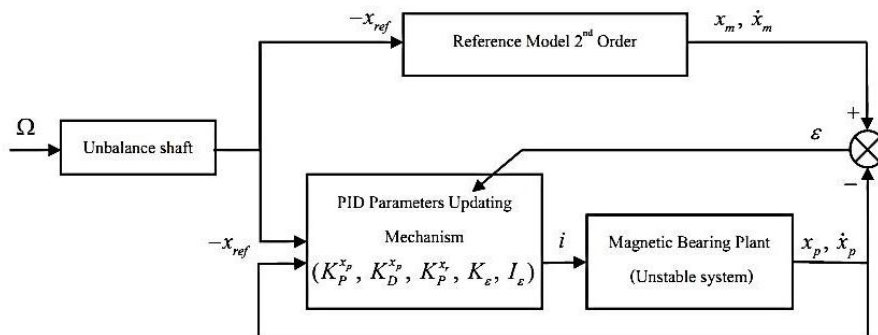
ซึ่ง  $G$  พิจารณาจาก Lyapunov Equation ที่กำหนดให้ดังนี้

$$G = B_p^T P \quad (16)$$

เมื่อ Transpose สมการที่ (16) และจัดรูปสมการใหม่จะได้  $P = G^T B_p^{-1}$  และกำหนดให้เมทริกซ์เทียบผกผัน (pseudo-inverse matrix) ใช้แทน  $B_p$  มีสัญลักษณ์ดังนี้  $B_p^+$

$$B_p^+ = (B_p^T B_p)^{-1} B_p^T \quad (17)$$

$$\text{และ } B_p B_p^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการควบคุม PID แบบปรับตัวได้โดยใช้แบบจำลองอ้างอิง 2<sup>nd</sup> order ในการควบคุมเพลทที่ไม่สมดุล

## รหัสบทความ

DRC 2038

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

แทนสมการที่ (16) และ (18) ในสมการที่ (14) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\hat{e}^T Q \hat{e} + 2\hat{e}^T G^T B_p^+ (A_m - A_p) \hat{x}_p \\ & - 2\hat{e}^T G^T B_p^+ F - 2\hat{e}^T G^T i \\ & + 2\hat{e}^T G^T B_p^+ B_m x_r + \frac{I_\varepsilon}{\gamma} \frac{dI_\varepsilon}{dt} \end{aligned} \quad (19)$$

เมื่อ  $\varepsilon = G \cdot \hat{e} = \hat{e}^T G^T$ ,

$$B_p^+ (A_m - A_p) \hat{x}_p = \frac{1}{b_p} (a_0 x_p + a_1 \dot{x}_p),$$

$$B_p^+ F = \frac{f(t)}{b_p} \text{ และ } B_p^+ B_m = \frac{b_m}{b_p}$$

โดยที่  $a_0 = a_{m0} - a_{p0}$  และ  $a_1 = a_{m1} - a_{p1}$  ทำให้

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\hat{e}^T Q \hat{e} + \frac{2\varepsilon}{b_p} (a_0 x_p + a_1 \dot{x}_p \\ & - f(t) - b_p i + b_m x_r) + \frac{I_\varepsilon}{\gamma} \frac{dI_\varepsilon}{dt} \end{aligned} \quad (20)$$

เมื่อแทนสมการ control law จึงสรุปได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\hat{e}^T Q \hat{e} + \frac{2\varepsilon}{b_p} \{ (a_0 - b_p K_p^x) x_p + (a_1 - b_p K_D^x) \dot{x}_p \\ & + (b_m - b_p K_p^x) x_r - (f(t) + b_p K_e) \} \\ & + \frac{I_\varepsilon}{\gamma} \left( \frac{dI_\varepsilon}{dt} - 2\varepsilon \gamma \right) \end{aligned} \quad (21)$$

เพราะฉะนั้น  $\dot{V}(\hat{e}) \leq -\hat{e}^T Q \hat{e}$  จะเป็น Asymptotic Stability เมื่อเลือกให้พารามิเตอร์ในการควบคุมเป็น

$$K_p^x = \frac{a_0}{b_p} \quad (22.1)$$

$$K_D^x = \frac{a_1}{b_p} \quad (22.2)$$

$$K_p^x = \frac{b_m}{b_p} \quad (22.3)$$

$$K_e = \frac{f(t)}{|b_p|} \text{sign}(\varepsilon) \quad (22.4)$$

$$\text{และ } \frac{dI_\varepsilon}{dt} = 2\varepsilon \gamma \rightarrow I_\varepsilon = K_I \int \varepsilon dt \quad (22.5)$$

เมื่อ  $K_I = 2\gamma$  และกำหนดให้

$$\text{sign}(\varepsilon) = \begin{cases} 1 & \text{if } \varepsilon > 0 \\ 0 & \text{if } \varepsilon = 0 \\ -1 & \text{if } \varepsilon < 0 \end{cases} \quad (23)$$

เลือก adaptive design gain,  $q$  จากสมการ Lyapunov Equation จะได้

$$P_1 = \frac{a_{m0}^2 q + a_{m1}^2 - a_{m0}}{2a_{m0} a_{m1}}, \quad P_2 = \frac{-1}{2a_{m0}}$$

$$\text{และ } P_3 = \frac{1 - a_{m0} q}{2a_{m0} a_{m1}}$$

แล้วแทนค่ากลับสมการที่ (16) เพื่อหา vector gain error,  $G$ 

## 4. ผลลัพธ์และการอภิปราย

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการจำลองการใช้นะริงแม่เหล็กเพื่อชดเชยความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุนโดยใช้ตัวควบคุมปรับตัวได้ PID กับแบบจำลองอ้างอิง 2<sup>nd</sup> order เพื่อลดการสั่นที่เกิดขึ้น สมมุติให้พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลเป็นค่าที่ทราบ โดยกำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์เพลลา ดิสก์ มอเตอร์และแบริงแม่เหล็ก เป็นดังที่แสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เพื่อดูการตอบสนองของแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น เมื่อกำหนดให้  $q = 1$  และ  $\gamma = 1$

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์เพลลา ดิสก์และมอเตอร์

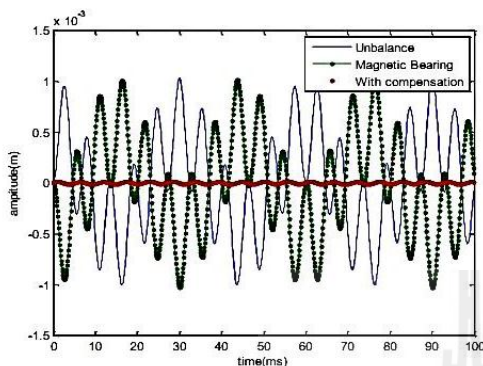
Parameter	Symbol	Value (unit)
Length of shaft	$l$	35 cm
Diameter of shaft	$D$	15 mm
Weight of disk	$m_d$	0.5 kg
Weight of shaft	$m$	0.42 kg
Stiffness of shaft	$k$	$5.5642 \times 10^5$ N/m
Circular Natural frequency	$\omega_n$	10,000 rpm
Damping ratio	$\zeta$	0.1
Young's Modulus (Stainless steel)	$E$	200 GPa
Eccentricity	$d$	15 mm
Motor speed (maximum)	$\Omega_{\max}$	3500 rpm

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์แบริงแม่เหล็ก

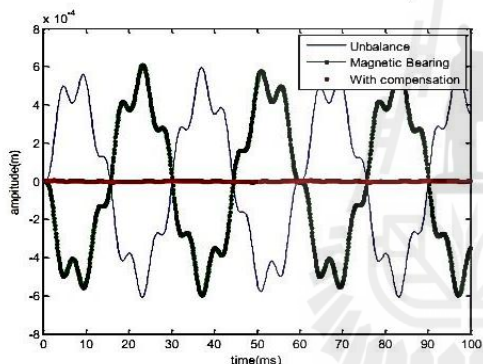
Parameter	Symbol	Value (unit)
Nominal air gap	$x_0$	5 mm
Initial current	$i_0$	5 A
Cross-section area	$A$	$12 \times 22$ mm <sup>2</sup>
Number of Coil	$N$	1,000 rev

รหัสบทความ  
DRC 2038

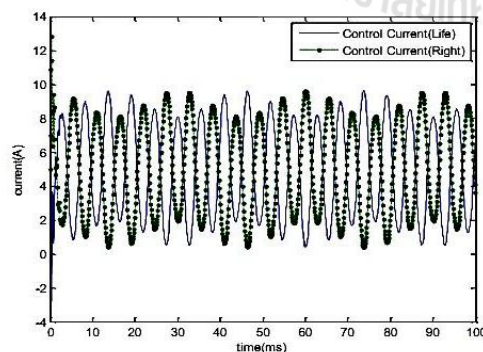
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



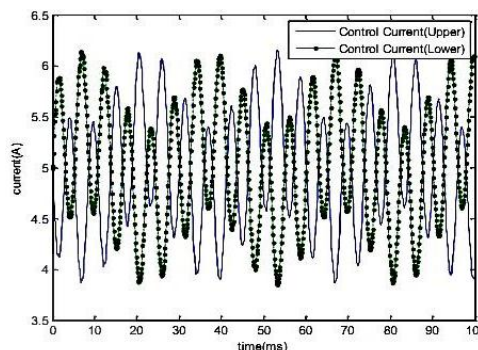
รูปที่ 3 แสดงการชดเชยแอมพลิจูดของ AMB กับ Unbalance ของแกน x ที่ความเร็วรอบ 2000 rpm



รูปที่ 4 แสดงการชดเชยแอมพลิจูดของ AMB กับ Unbalance ของแกน y ที่ความเร็วรอบ 2000 rpm



รูปที่ 5 แสดงการควบคุมกระแสของแบริ่งแม่เหล็ก ด้านซ้ายและขวา (แกน x)



รูปที่ 6 แสดงการควบคุมกระแสของแบริ่งแม่เหล็ก ด้านบนและล่าง (แกน y)

ผลจากการจำลองชดเชยความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุนที่ความเร็วรอบ 2000 rpm โดยพิจารณาการปรับตัวของแบริ่งแม่เหล็กทั้งแกน x และ แกน y ดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ และการควบคุมกระแสภายในแม่เหล็ก เพื่อใช้ในการสร้างแรงภายในแบริ่งแม่เหล็กชดเชยความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่า เมื่อเพลาหมุนจะเกิดการส่งผ่านแรงเนื่องจากความไม่สมดุลของดิสก์ไปยังแบริ่งทั้งสองด้าน ส่งผลให้เกิดการสั่นขึ้น ซึ่งพฤติกรรมการปรับตัวของแบริ่งแม่เหล็กและการควบคุม จะใช้สมดุลของแรงแม่เหล็กที่ได้จากการป้อนกระแสเทียบกับแรงที่กระทำกับแบริ่งแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามกับแรง เพื่อลดแรงที่กระทำกับแบริ่ง ซึ่งส่งผลให้แอมพลิจูดการสั่นมีขนาดลดลงทั้งแนวแกน x และ y เมื่อเทียบกับขนาดของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 3 และ 4 ส่วนการควบคุมกระแสภายในแม่เหล็ก มีกระทบเนื่องจากน้ำหนักของเพลาและดิสก์ ที่ช่วงแรกจะมีการป้อนกระแสที่สูง (เกิด Overshoot) ก่อนจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังที่แสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้เพื่อให้ขณะแรงเฉื่อย (Inertia) ของระบบในช่วงแรก



## รหัสบทความ

DRC 2038

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



### 5. สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลจากการจำลองขดเคี้ยวการสั่นของเพลลาที่เกิดความไม่สมดุลด้วยการสร้างสนามแม่เหล็กจากแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น โดยใช้ตัวควบคุมปรับตัวได้ PID กับแบบจำลองอ้างอิง ผลพบว่าสามารถควบคุมและลดการสั่นที่เกิดขึ้นได้ โดยใช้หลักการสร้างแอมพลิจูดที่มีขนาดเท่ากันและมุมเฟสตรงกันข้ามกับความไม่สมดุลโดยอ้างอิงกับแบบจำลองที่เป็นระบบ  $2^{\text{nd}}$  order ในการเปรียบเทียบการตอบสนองของแบบจำลองอ้างอิงกับระบบ ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพในการสร้างอัลกอริทึมจากวิธีการ Lyapunov's Stability Theory เพื่อยืนยันว่าการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมมีเสถียรภาพ จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า การสั่นมีขนาดลดลง 95% ในแนวแกน x และ 99% ในแนวแกน y เมื่อเทียบกับขนาดของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น ซึ่งในการศึกษาถัดไป จะทำการสร้างชุดทดลองกับระบบจริง หากพบว่ามีวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถใช้งานได้จริง ต่อไปการควบคุมการสั่นจะสามารถกระทำได้โดยไม่ต้องทราบขนาดความไม่สมดุล อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ อยู่ตลอดเวลาได้

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัยรวมถึงเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Fumio Matsumura and Takeshi Yoshimoto (1986). System Modeling and Control Design of A Horizontal-Shaft Magnetic-Bearing System, IEEE Transactions On Magnetics, Vol.Mag-22, No.3, May 1986.
- [2] Chip Rinaldi Sabirin, Andreas Binder, Dumitru Daniel and Aurelian Craciunescu (2007) Modeling And Digital Control Of An Active Magnetic Bearing System, Rev. Roum. Sci. Techn.-Electrotechn. Et Energ., 52, 2, P.157-181, Bucarest, 2007.
- [3] Shiyu Zhou and Jianjun Shi (2000). Supervisory Adaptive Balancing of Rigid Rotors

during Acceleration, Namrc xxvii, July, 2000, Lexington, Kentucky. 2000.

[4] Selim Sivrioglu (2006). Adaptive Control Of Nonlinear Zero-Bias Current Magnetic Bearing System, Vol 48, Numbers 1-2, 175-184, 16 May 2006.

[5] Kai-Yew Lum, Vincent T. Coppola, and Dennis S. Bernstein (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 September 1996.

[6] J. C. Ji and C. H. Hansen, Non-Linear Oscillations Of A Rotor In Active Magnetic bearing, Journal Of Sound And Vibration (2001) 240(4), 599-612

[7] G.Schweitzer and Eric H.Maslen (2009). Magnetic Bearings (Theory, Design, and Application to Rotating Machinery), New York, Springer.

[8] Maurice L. Adams, Jr. (2010). Rotating Machinery Vibration, Taylor & Francis, London New York 2010.

## ประวัติผู้เขียน

นายนิติศักดิ์ หนูมาน้อย เกิดเมื่อวันที่ 22 กันยายน 2530 ที่อำเภอบ้านนาเดิม จังหวัดสุราษฎร์ธานี เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1 ถึงมัธยมศึกษาปีที่ 6 ที่โรงเรียนมัธยมวัดใหม่กรงทอง จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 และในปี พ.ศ. 2553 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3 (2) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 และ (3) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 2 เป็นเวลา 3 ปี ขณะศึกษาระดับปริญญาโทได้นำเสนอผลงานวิชาการจำนวน 1 เรื่องในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ระหว่างวันที่ 24 – 26 ตุลาคม 2556 ณ จังหวัดเชียงราย รายละเอียดมีปรากฏดังภาคผนวก ก.