

รหัสโครงการ SUT7-707-57-12-10



รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์และควบคุมการสั่นของเพลาโดยใช้แบริ่งแม่เหล็ก
แบบกระตุ้น
(Analysis and Control of Shaft Vibration
using Active Magnetic-Bearing)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-707-57-12-10



รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์และควบคุมการสั่นของเพลาโดยใช้แบริ่งแม่เหล็ก
แบบกระตุ้น
(Analysis and Control of Shaft Vibration
using Active Magnetic-Bearing)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

จิระพล ศรีเจริญผล

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2559

ง
สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 แบร็งแม่เหล็กไฟฟ้า	3
2.2 การสันแบบบังคับ.....	6
2.2.1 ความไม่สมดุลจากการหมุน.....	7
2.3 การควบคุมระบบ	9
2.3.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ.....	9
2.3.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	9
2.4 สัญญาณควบคุม	13
2.4.1 สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	13
2.4.2 สัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	เกณฑ์ตรวจประเมินสมรรถนะในการควบคุม	14
2.6	พิธีศันวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.7	สรุป.....	18
3	อุปกรณ์การทดลอง	19
3.1	การ Switch Relay ด้วย H - Bridge Switching ของ RABCON Board	22
3.2	การควบคุมผ่าน RABCON Board	22
3.3	โปรแกรมการควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบแม่เหล็กกระตุ้นแบบ 4 โพล 26	4
4	ผลการวิจัย	29
4.1	การทดสอบควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบแม่เหล็กกระตุ้นแบบ 4 โพล	30
4.1.1	ผลการทดสอบควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพลที่ความเร็วรอบ 100 RPM.....	30
4.1.2	ผลการทดสอบควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพลที่ความเร็วรอบ 200 และ 300 RPM	37
4.2	สรุปผลการทดสอบ.....	43
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	45
5.1	สรุป.....	45
5.2	ข้อเสนอแนะ	45
	เอกสารอ้างอิง.....	46
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก	48
	ประวัติผู้วิจัย	52

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่มีการหมุน(Rotating Machine) หรือเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนไหวโดยอาศัยหลักการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ต่างๆอย่างเช่น เพลา(Shaft), ล้อช่วยแรง(Flywheels), โรเตอร์-สเตเตอร์(Rotor-Stator) เป็นต้น ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในการออกแบบร่องลื่นหรือตลับลูกปืน(Bearing)ให้สามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูง โดยใช้เทคโนโลยีต่างๆเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมุน ด้วยขีดจำกัดของแบริงที่ต้องใช้สารหล่อลื่น(Lubricants)เป็นส่วนประกอบ ทำให้ไม่สามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูงได้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเปลี่ยนไป และอาจส่งผลต่อพฤติกรรมของเครื่องจักรได้ ระบบแบริงแม่เหล็ก(Magnetic Bearing System) มีข้อดีที่เป็นประโยชน์สำคัญคือ การสัมผัสของเครื่องจักรระหว่างแบริงกับโรเตอร์และการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าน้อย สามารถลดการสึกหรอเครื่องจักรโดยไม่จำเป็นต้องมีสารหล่อลื่น ประสิทธิภาพการทำงานในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และสามารถทำงานที่ความเร็วสูง ทำให้สามารถยืดอายุการทำงานของเครื่องจักรได้

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 poles รองรับเพลาที่มีการหมุน การออกแบบระบบควบคุมเพลาที่มีแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 poles รองรับด้านเดียวสามารถแบ่งได้สองส่วนคือระบบควบคุมการสั่นและการชดเชยเฟส ตัวควบคุมแบบ PD ประยุกต์ใช้ควบคุมขนาดของแรงแม่เหล็ก และตัวชดเชยเฟสออกแบบมาเพื่อกำหนดช่วงเวลาที่ให้แรงแม่เหล็กทำงาน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีนี้สามารถลดการสั่นของเพลาได้ 28% ในแนวแกน x และ แกน y ที่ช่วงความเร็วรอบ 100-300 RPM



Abstract

At present, an electric motors are frequently used to drive the rotating systems such as shaft, flywheel and rotor-stator etc. The high speed rotating machines usually were supported by bearings and its performance depend on lubricants. Temperature and viscosity of lubricants are effects to rotating shaft. A magnetic bearing system (MBS) support moving parts without physical contact. For instance, they are able to levitate a rotating shaft and permit relative motion with very low friction and no mechanical wear. MBS support the highest speeds of all kinds of bearing and have no maximum relative speed. This paper presents the analysis and vibration control of a rotating shaft using 4-poles active magnetic bearing (AMB). The control system design of the shaft with single-side support 4-poles AMB can be divided into two parts, vibration control system and phase compensation. The PD controller is applied to regulate magnetic force of AMB. The phase compensator is designed to define time of the magnetic force acting on the shaft through the on/off switch control relay. The experimental results show that the proposed method can reduce 28% of the shaft oscillation in x and y axis at the speed ranges between 100-300 RPM.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ในปัจจุบันการทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่มีการหมุน(Rotating Machine) หรือเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนไหวโดยอาศัยหลักการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ต่างๆอย่างเช่น เพลา (Shaft), ล้อช่วยแรง(Flywheels), โรเตอร์-สเตเตอร์(Rotor-Stator) เป็นต้น ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในการออกแบบรองลื่นหรือตลับลูกปืน(Bearing)ให้สามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูง โดยใช้เทคโนโลยีต่างๆเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมุน ด้วยขีดจำกัดของแบริงที่ต้องใช้สารหล่อลื่น (Lubricants)เป็นส่วนประกอบ ทำให้ไม่สามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูงได้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง อาจทำให้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเปลี่ยนไป และอาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการทำงานได้

จากตัวอย่างที่ยกมานั้น จะเห็นถึงปัญหาของแบริงที่รองรับเครื่องจักรที่มีการหมุน มีช่วงการทำงานจำกัด ด้วยเหตุผลนี้ในช่วง 30 ปีที่ผ่านมาระบบแบริงแม่เหล็ก(Magnetic Bearing System, MBS) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรม ด้วยคุณสมบัติอันเป็นเอกลักษณ์และยังเป็นทางเลือกใหม่ในการแก้ปัญหาโรเตอร์แบริงของเครื่องจักรที่มีการหมุนด้วยความเร็วรอบสูง ในการออกแบบแบริงแม่เหล็กมีจุดประสงค์เพื่อลดข้อบกพร่องของ Journal-Bearing หรือ Ball Bearing และเพิ่มความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบการทำงานระหว่างระบบแบริงทั่วไปกับระบบแบริงแม่เหล็ก(MBS) จะเห็นได้ว่าระบบแบริงแม่เหล็ก มีข้อได้เปรียบที่เป็นประโยชน์สำคัญ คือ การสัมผัสของเครื่องจักรระหว่างแบริงกับโรเตอร์และการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าน้อย สามารถลดการสึกหรอเครื่องจักรโดยไม่จำเป็นต้องมีสารหล่อลื่น ประสิทธิภาพการทำงานในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และสามารถทำงานที่ความเร็วสูง ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้สามารถยืดอายุการทำงาน ของเครื่องจักรได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้แบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นรองรับเพลลาที่มีการหมุน โดยสมมุติให้ความไม่สมดุลเนื่องจากการหมุนเป็นค่าที่ไม่ทราบ ขับเคลื่อนการหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ทำงานที่ความเร็วรอบตามที่กำหนด และใช้แบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 pole เพื่อรองรับการหมุน และวิเคราะห์พฤติกรรมต่างๆของเพลลาที่รองรับด้วยแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 pole รวมทั้งสามารถออกแบบตัวควบคุมการสั่นของเพลลา

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์การสั่นของเพลลาที่รองรับด้วยแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 pole

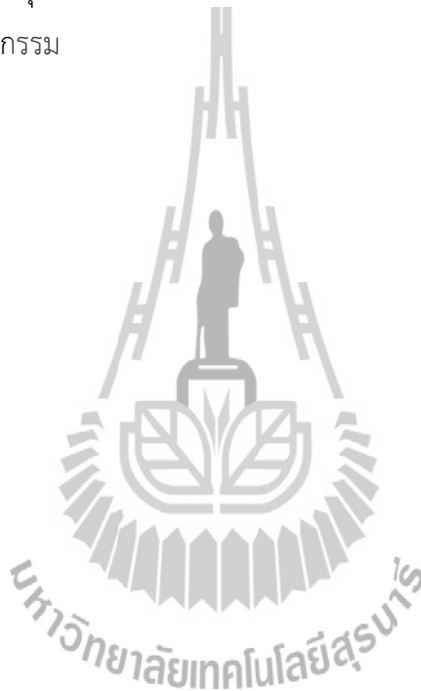
1.2.2 ออกแบบวิธีการควบคุมการสั่นของเพลลาที่รองรับด้วยแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 pole

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 pole และชุดขับเคลื่อนเฟลา
- 1.3.2 วิเคราะห์การสั่นของเฟลาที่เกิดจากความไม่สมดุลด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 pole
- 1.3.3 ออกแบบตัวควบคุม PID แบบปรับตัวได้สำหรับแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 pole เพื่อให้สามารถควบคุมการสั่นของเฟลา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

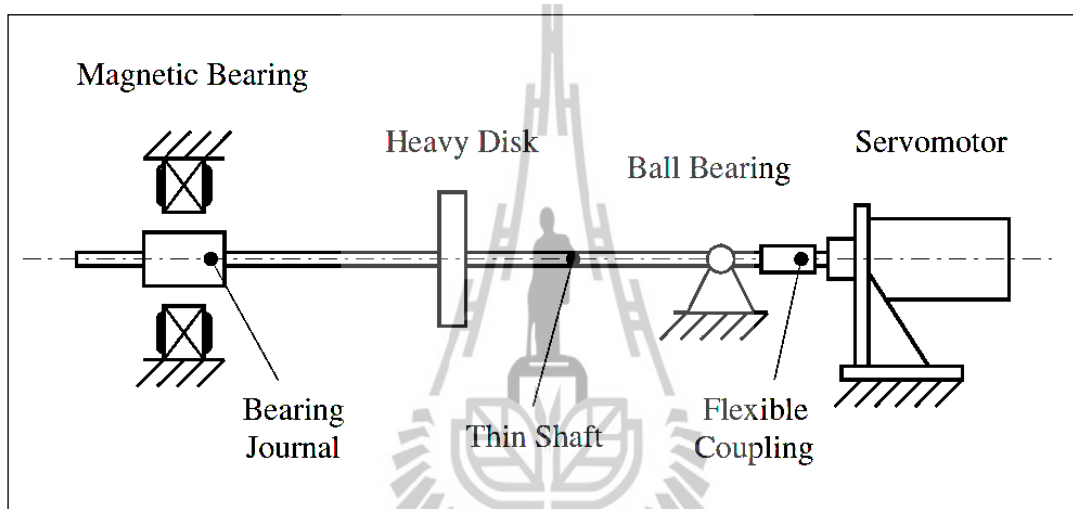
ชุดต้นแบบการควบคุมการสั่นของเฟลาด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้น ซึ่งเป็นการวิจัยพื้นฐานที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมาก ลดการนำเข้าจากต่างประเทศ สร้างองค์ความรู้ในการพัฒนาอุตสาหกรรม



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์และควบคุมการสั่นของเพลาสสามารถทำได้หลายวิธี ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบริ้งแม่เหล็กแบบกระตุ้นมาใช้เพื่อควบคุมและลดการสั่นที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความไม่สมดุลจากการหมุน อุปกรณ์ทดลองที่ใช้ศึกษาและออกแบบระบบควบคุมใช้เพลาลมที่มีแผ่นดิสก์ที่ไม่สมดุลอยู่ตรงกลางที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบบริ้งแบบทั่วไปและปลายอีกข้างหนึ่งรองรับด้วยแบบริ้งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แบบจำลองที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบบริ้งแบบทั่วไปและข้างหนึ่งรองรับด้วยแบบริ้งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล

ในบทนี้ได้ศึกษาการทำงานของแบบริ้งแม่เหล็กไฟฟ้า การสั่นที่กระทำเกิดจากการหมุนที่ไม่สมดุล ระบบควบคุมที่เกี่ยวข้องและปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

2.1 แบบริ้งแม่เหล็กไฟฟ้า

แบบริ้งแม่เหล็ก (Magnetic Bearings) จะสร้างแรงกระทำโรเตอร์ไม่ให้สัมผัสกับแบบริ้งแม่เหล็กด้วยการใช้แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics) กระแสจากการพันรอบแกนเหล็กและจำนวนรอบในการพัน ให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force; mmf) ดังนั้นความสามารถในการเป็นแม่เหล็ก (Permeability) สูงในวัสดุสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) เป็นสารแม่เหล็กสูง นำมาทำแม่เหล็กถาวร (ได้แก่ แมกเนไตต์ เหล็ก นิกเกิล) ซึ่งแสดงโดยเส้นฟลักซ์ข้ามผ่านช่องว่างมายังโรเตอร์ ซึ่งก็ยังมี การรบกวน (Distributed) ในช่องว่างโดยขึ้นกับความหนาแน่นฟลักซ์ เป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กที่สูง อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่น

ฟลักซ์อยู่ในช่วง 1.7 – 2 Tesla ใน Silicon Steel ทั่วไป ดังนั้นจึงนิยมใช้วัสดุสารเฟอร์โรแมกเนติก ใช้ทำโรเตอร์ (Rotor) หรือเพลลา (Shaft) ขนาดของแรงนั้นสามารถควบคุมผ่านกระแสในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า และเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบหาระยะช่องว่างที่เป็นไปได้ซึ่งจะช่วยลดการป้อนกระแสและการสูญเสีย

ข้อกำหนดหรือสมมติฐานเบื้องต้น ความหมายและคำจำกัดความต่าง ๆ ผลกระทบของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) คือสนามแม่เหล็กในช่องว่างใด ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยแรงทางกล (Mechanical Force) และการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Electrical Induction) ผลกระทบทั้งสองสามารถวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ ในส่วนของสนามแม่เหล็ก คือ Lorentz Force จะตั้งฉากกับความเร็วกการเปลี่ยนแปลงประจุ Q กับเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก \vec{B} (ความเหนี่ยวนำแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์) 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 Φ ที่ผ่านพื้นที่ผิว A คือการ Integral ของความหนาแน่นฟลักซ์ตลอดพื้นที่ผิว

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

สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field), H สร้างโดยการเปลี่ยนแปลงกระแส เกิดการสลับไปมาของสนามไฟฟ้า การเกิดสนามแม่เหล็กสมมาตรโดยรอบของตัวนำเมื่อป้อนกระแส i ดังนั้นความเข้มของสนามแม่เหล็กหาจากความหนาแน่นกระแสเทียบกับกึ่งกลางการพันรอบตัวนำ

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

เมื่อ N คือจำนวนรอบของการพันขดลวด i คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดและ \vec{s} คือความยาวเส้นฟลักซ์ โดย $Ni = mmf$ คือแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force) เป็นพลังงานรูปหนึ่งที่ใช้ในการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กให้วิ่งรอบวงจรมแม่เหล็กหนึ่งรอบ หรืออาจพิจารณาว่าเป็นความสามารถในการทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดใดขดลวดหนึ่ง ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ

ค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวด กับจำนวนรอบของขดลวดนั้น และความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นฟลักซ์ คือ

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

$\mu = \mu_0 \mu_r$ คือ Permeability หรือ ค่าบ่งบอกคุณสมบัติของสารแม่เหล็กแต่ละชนิดที่ยอมให้เกิดสนามแม่เหล็กได้มากหรือน้อย $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ (V.s/A.m) คือ Permeability ของอากาศ μ_r คือ Relative Permeability หรือค่าความซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ของสารตัวกลาง (μ_r ของเหล็กอยู่ในช่วง 1,000 – 10,000 และ μ_r ของอากาศมีค่าประมาณ 1)

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

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

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

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

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

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

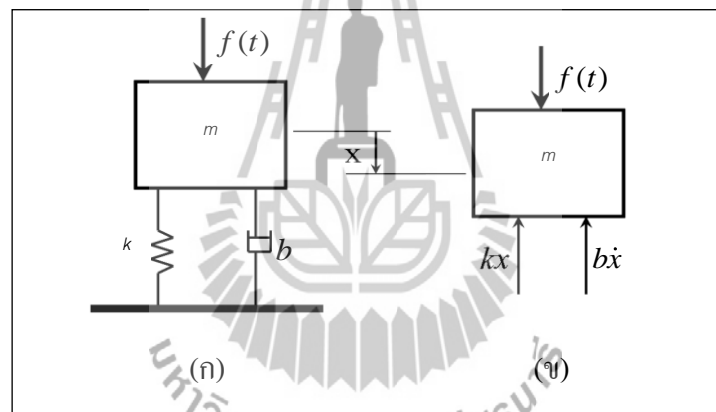
แสดงให้เห็นว่าค่า L จะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับค่ากระแส แต่ค่า L จะมีค่าแปรผันตรงกับค่า N^2 และแปรผกผันกับค่า l ดังนั้นสามารถออกแบบค่า L ได้ตามต้องการ เช่น ถ้าต้องการค่า L เปลี่ยนแปลงมากก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด แต่ถ้าต้องการค่า L เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ก็เปลี่ยนระยะช่องว่างอากาศให้มากขึ้น

2.2 การสั่นแบบบังคับ

ระบบที่มีการสั่นแบบบังคับโดยทั่วไปจะอยู่ภายใต้แรงกระทำ โดยที่แรงเหล่านี้จะเป็นฟังก์ชันกับเวลา ซึ่งมีอยู่ในระบบต่าง ๆ เช่น แรงกระแทก (Impact) แรงแบบสุ่ม (Random) หรือแรงแบบฮาร์มอนิก (Harmonics) เป็นต้น สำหรับแรงแบบฮาร์มอนิกนี้ถือว่าเป็นแรงพลวัตที่พบเห็นได้มากในระบบที่มีการสั่นในทางวิศวกรรม ซึ่งจะพบแรงลักษณะนี้ในเครื่องจักรแบบหมุน

โดยปกติแล้วการตอบสนองของระบบจากแรงที่กระทำจะประกอบไปด้วยสองส่วน คือ การตอบสนองชั่วคราว (Transient Response) และการตอบสนองในสถานะคงตัว (Steady – State Response) เนื่องจากการตอบสนองชั่วคราวจะหมดไปเมื่อเวลาผ่านไป การตอบสนองจะคงอยู่เพียงการตอบสนองในสถานะคงตัวของระบบ จากแผนภาพวัตถุอิสระในรูปที่ 2.2(ข) เราจะได้สมการการเคลื่อนที่ คือ

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



รูปที่ 2.2 ระบบมวลสปริงตัวหน่วงภายใต้แรงกระทำ (ก) แบบจำลองของระบบ
(ข) แผนภาพวัตถุอิสระของระบบ

แรงที่กระทำต่อระบบเป็นแรงฮาร์มอนิก (Harmonics Force) โดยเรากำหนดให้เป็น

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

โดยที่ F_0 เป็นขนาดของแรง และ ω เป็นความถี่ของแรงจากสมการที่ (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

เราจะได้ผลการตอบสนองของระบบภายใต้แรงฮาร์โมนิกส์ คือ

$$x(t) = F_0 \frac{K}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \sin\left(\omega t + \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1-r^2}\right) \quad (2.11)$$

เมื่อ $r = \frac{\omega}{\omega_n}$

ดังนั้น ระบบจะมีแอมพลิจูดการสั่นเท่ากับ

$$X = F_0 \frac{K}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.12)$$

2.2.1 ความไม่สมดุลจากการหมุน (Rotating unbalance)

ปัญหาการสั่นทางกลส่วนมากที่เกิดขึ้นนั้น เพราะเครื่องจักรต้นกำลังที่มีใช้งานในภาคอุตสาหกรรมจำนวนมาก เป็นเครื่องจักรหมุน (Rotating machine) เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าต่าง ๆ เครื่องจักรเทอร์โบ เครื่องยนต์ เป็นต้น

ความไม่สมดุลของการหมุนของเครื่องจักรทำให้เกิดแรงสั่นแบบบังคับกระทำต่อระบบขึ้น ความไม่สมดุลอาจเกิดขึ้นจากการประกอบส่วนของเครื่องจักรไม่ได้ตามที่กำหนด หรือขนาด (Dimension) ของชิ้นส่วนที่ใช้ประกอบเครื่องจักรไม่เป็นไปตามที่กำหนด ซึ่งนำไปสู่การสั่นทางกลจากแผนภาพแบบจำลองความไม่สมดุลของการหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 มวลไม่สมดุล m ระยะจากศูนย์กลางการหมุนถึงมวลไม่สมดุลเท่ากับ e เมตรและ ω_r ความถี่ของเครื่องจักรหมุน ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละแกนคือ

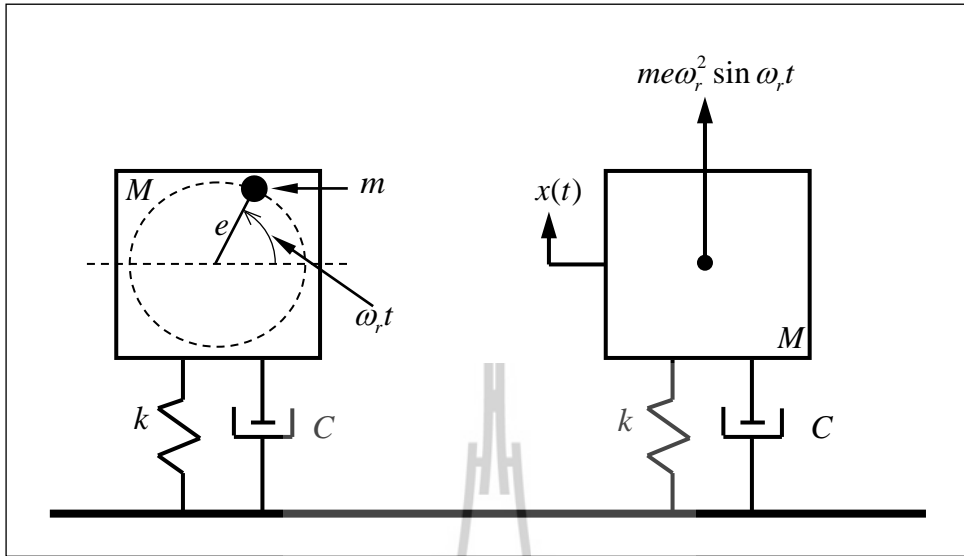
$$m a_x = -m e \omega_r^2 \sin \omega_r t \quad (2.13)$$

และ

$$m a_y = -m e \omega_r^2 \cos \omega_r t \quad (2.14)$$

ถ้าเราพิจารณาผลรวมของแรงในแนวแกนตั้ง (x) ดังรูปที่ 2.3 จะได้สมการการเคลื่อนที่ คือ

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = me\omega_r^2 \sin \omega_r t \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของระบบที่มีการสั่นจากความไม่สมดุล

ในการหมุนและแผนภาพวัตถุอิสระของระบบ

ขนาดของแรงที่กระทำเนื่องจากความไม่สมดุลในการหมุนของเครื่องจักร จะเท่ากับ $me\omega_r^2$ และจะเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงที่กระทำตามความเร็วรอบการหมุนของเครื่องจักร ดังนั้นผลเฉลยของสมการที่ (2.15) ที่สถานะคงตัว จะมีผลเฉลยเฉพาะคือ

$$x(t) = X \sin(\omega_r t - \alpha) \quad (2.16)$$

โดยที่ $r = \frac{\omega_r}{\omega_n}$ 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

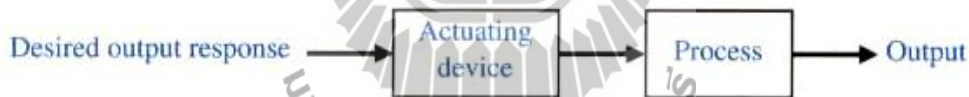
$$\frac{MX}{me} = \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.17)$$

2.3 การควบคุมระบบ

ในปัจจุบันนี้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีมากมายนัก ในอุตสาหกรรมได้มีการนำระบบควบคุมอัตโนมัติไปใช้ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ควบคุมการทำงานของเครื่องจักร และอื่น ๆ อีกมากมาย เทคโนโลยีทางด้านอวกาศและการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์ก็ได้มีการนำระบบควบคุมไปใช้ในระบบนำวิถี ระบบควบคุมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เป็นต้น

2.3.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop Control System)

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



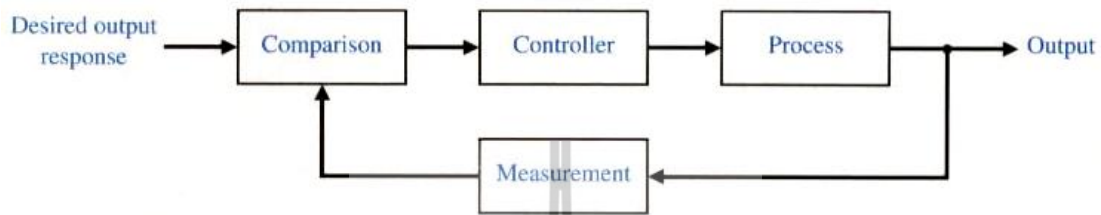
รูปที่ 2.4 แผนภาพระบบควบคุมแบบวงเปิด

รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพของระบบควบคุมแบบวงเปิด โดยสัญญาณอินพุตหรือการตอบสนองของเอาต์พุตที่ต้องการ(Desired output response) ส่งผ่านอุปกรณ์กระตุ้น(Actuating device) ออกมาเป็นสัญญาณควบคุมเพื่อสั่งให้ Process ตอบสนองเอาต์พุตที่ต้องการออกมา

2.3.2 ระบบควบคุมแบบวงปิด(Closed – loop Control Systems)

จากหัวข้อที่แล้วจะเห็นว่าเมื่อปัจจัยภายนอกมาจะมีอิทธิพลต่อระบบจะทำให้ผู้ควบคุมไม่สามารถควบคุมเอาต์พุตให้เป็นไปตามต้องการได้ ในหัวข้อนี้ได้แก้ไขโดยการส่งสัญญาณเอาต์พุตป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตจะทำให้ได้ค่าความผิดพลาด(Error) ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอ้างอิงทางด้านอินพุตเพื่อนำไปสร้างสัญญาณกระตุ้นและส่งต่อไปแก้ไข

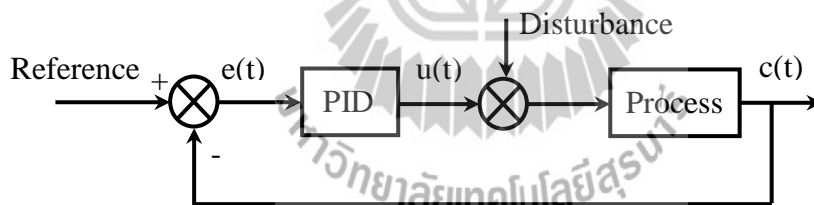
ค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตให้น้อยลง ระบบที่กล่าวมานี้เรียกว่าระบบควบคุมแบบวงปิด ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบวงปิด ประกอบด้วยวงรอบของสัญญาณป้อนกลับซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตผ่านการวัด(Measurement) แล้วนำสัญญาณป้อนกลับนี้มาเปรียบเทียบ (Comparison) กับสัญญาณอินพุตจะได้ผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองเป็นค่าความผิดพลาด ตัวควบคุม(Controller) จะนำค่าความผิดพลาดไปสร้างสัญญาณให้ Process เพื่อนำไปควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าตามที่กำหนดโดยสัญญาณอินพุต ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพระบบควบคุมแบบวงปิด

2.4 คุณสมบัติของตัวควบคุม

ในระบบควบคุมมีตัวควบคุมหลายชนิด ตัวควบคุมส่วนใหญ่ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการเป็นแบบ PID โดยต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สามารถบรรยายได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมแบบวงปิด ที่มีตัวควบคุมแบบ PID

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.18)$$

โดยที่ $u(t)$ คือสัญญาณควบคุม, $e(t)$ คือค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต สัญญาณของตัวควบคุม PID ประกอบไปเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ แบบสัดส่วน (Proportional; P) แบบอินทิกรัล (Integral; I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative; D) แต่ละแบบสามารถนำมาประกอบกันเพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน (K_p)

ค่า Integral Time (T_i) และ Derivative Time (T_d) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละแบบมีดังนี้

2.4.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

การควบคุมแบบสัดส่วนเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการคือสัญญาณควบคุม $u(t)$ จากตัวควบคุมที่ส่งไปปรับกระบวนการมีค่าเป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.19)$$

โดยที่ K_p คือค่าอัตราขยายและ $e(t)$ □ ความผิดพลาด = ค่าของสัญญาณอินพุต - ค่าที่วัดได้

2.4.2 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบอินทิกรัล

ผลตอบของการควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับการควบคุมแบบอินทิกรัล สามารถอธิบายได้ในสมการ

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (2.20)$$

เมื่อ T_i คือ Integral time (วินาที)

สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบอินทิกรัล แบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกตัวควบคุมแบบสัดส่วนทำหน้าที่ขยายค่าความผิดพลาดแบบค่าคงที่ ส่วนการควบคุมแบบอินทิกรัลมีการสะสมความผิดพลาดในช่วงเวลา T_i การทำงานในลักษณะเช่นนี้มีลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันรีเซตด้วยมือ (Manual – Reset function) ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกวินทิกรัลว่าฟังก์ชันรีเซต (Reset function)

คุณสมบัติของตัวอินทิกรัลในการกำจัดความผิดพลาดหรือ Offset เป็นข้อดีอย่างมาก จึงเป็นที่นิยมใช้กับระบบควบคุมป้อนกลับ อย่างไรก็ตามตัวอินทิกรัลก็มีข้อเสีย นั่นคือทำให้เกิดการล่าช้า (Capacity – Like Lag) และทำให้ช่วงเวลาของการแกว่งยาวนานขึ้นโดยทั่วไปตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบอินทิกรัล จะมีช่วงเวลาของการแกว่งนานกว่าระบบเชิงสัดส่วน อย่างไรก็ตาม 50% หรือ $K_{PI} = 1.5K_p$ สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (Time constant) น้อย (เช่น ระบบควบคุมอัตราการไหล) ปัญหานี้จะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก (เช่น ระบบควบคุมระดับ) ปัญหานี้จะมีผลมาก จนทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมสัดส่วนตรงผลกระทบของการเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม หากอัตราขยายมีค่ามากเกินไปจะทำให้ผลตอบของระบบมีการแกว่ง โดยทั่วไป Integral Time ($T_i = 1/K_i$ sec โดยที่ $K_i = \text{repeats/sec}$) เป็นตัวแสดงว่า

อัตราการตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณการควบคุมค่า T_i ที่น้อยกว่า จะทำให้ตัวควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วกว่าในระยะเริ่มต้น โดยที่ความคลาดเคลื่อนยังเป็นค่าบวกอยู่ ดังนั้นกว่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์ (ซึ่งทำให้เทอม $\int_0^t e(t)dt$ หดทำงาน) เทอมไบแอสก็จะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ ดังนั้นผลตอบสนองจึงเกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) สูงกว่าค่ากำหนด เป็นผลให้ตัวอินทิกรัลทำหน้าที่ปรับให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง การใช้ตัวอินทิกรัลในการควบคุมควรระวังในเรื่องของความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ (เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำหนดขนาดใหญ่) เพราะจะทำให้เกิดปัญหา Integral Windup ถึงแม้ว่า T_i มีค่าถูกต้องในสภาวะการทำงานธรรมดา แต่สัญญาณควบคุมอาจถึงจุดอิ่มตัวขณะผลตอบสนองเกิดส่วนพุ่งเกิน

ข้อสรุปของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบอินทิกรัล

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

2.4.3 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัล ต่างก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการ แต่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้ สามารถรู้ได้ล่วงหน้าโดยพิจารณาจากแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง ตัวอนุพันธ์มีหลักการการทำงาน คือ ตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด ถึงแม้ว่าความผิดพลาดจะมีขนาดเล็ก สัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด ถ้าความผิดพลาดมีค่าคงที่ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์ คุณลักษณะข้อนี้มีผลดีคือ ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบอนุพันธ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.21)$$

โดยที่ Derivative Time (T_d) เป็นเวลาที่แสดงถึงผลตอบสนองเนื่องจากตัวอนุพันธ์ การเพิ่ม T_d จะทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับค่าที่วัดได้เท่านั้น แต่ไม่ใช้กับค่ากำหนด เพราะการเปลี่ยนค่ากำหนดมักจะเป็นแบบขั้น (Step) ทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์เป็นพัลส์และทำให้เกิดการกระแทกของอุปกรณ์ในกระบวนการ สำหรับค่ากำหนดใช้เฉพาะกับตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลตัวอนุพันธ์คือตัวควบคุมที่ก่อให้เกิดผลตรงข้ามกับตัวอินทิกรัล ดังนั้นจึงใช้ใน การปรับปรุงกระบวนการที่มีการล่า

หลังทางเวลา (Time Lag) มาก ๆ ทำให้ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้น และช่วงเวลากการแกว่งที่สั้นลง
ข้อเสียของตัวอนุพันธ์คือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนเป็นอย่างมาก

ข้อสรุปของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบอนุพันธ์

- เหมาะสำหรับกระบวนการที่ล่าช้าหลังทางเวลามาก ทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้น
- ถ้า T_d มากเกินไป ผลของตัวอนุพันธ์จะทำให้ผลตอบสนองไวขึ้นจนกระทั่งระบบอาจขาดเสถียรภาพได้
- ไม่ควรใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนมาก

2.5 สัญญาณควบคุม

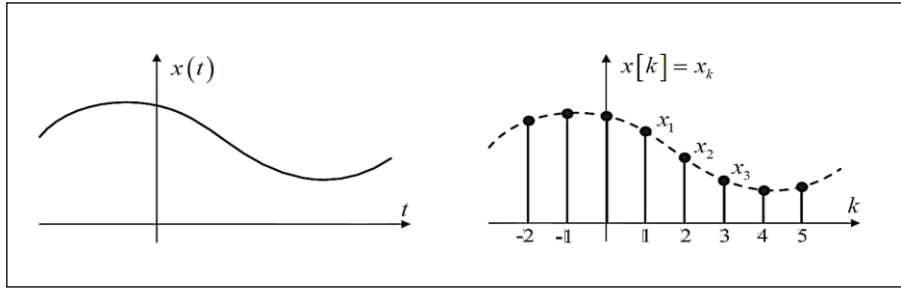
ในทางปฏิบัติสัญญาณที่ใช้งานทั่วไปสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทตามคุณลักษณะของสัญญาณดังต่อไปนี้

2.5.1 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 ตลาดหุ้นไทย จำนวนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ผลิตได้ และจำนวนประชากรของประเทศ เป็นต้น รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ในทางปฏิบัติสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา x_k มักจะได้อาจมาจากการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา $x(t)$ ที่ทุกช่วงเวลา $t = kT_s$ เมื่อ k เป็นเลขจำนวนเต็ม และ T_s คือคาบการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Period) โดย $f_s = 1/T_s$ คือความถี่การสุ่มตัวอย่าง (Sampling Frequency) ดังนั้นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาที่ได้จากการซัดตัวอย่างสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้คือ

$$x[k] = x_k = x(t) \Big|_{t=kT_s} = x(kT_s) \quad (2.22)$$



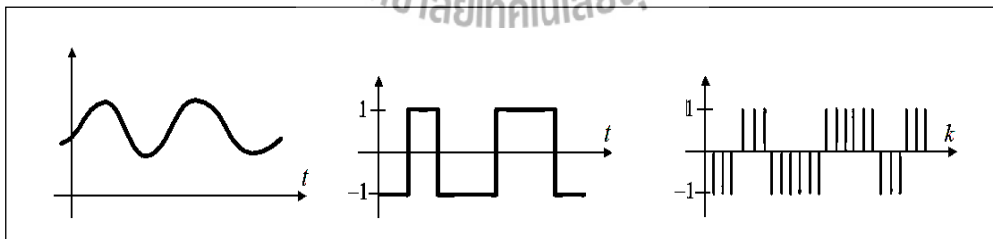
รูปที่ 2.7 สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา

ซึ่งหมายความว่าข้อมูล x_k แต่ละตัวจะอยู่ห่างกัน T_s หน่วย ข้อมูลแต่ละตัวของ x_k จะถูกเรียกว่า “แซมเปิล (Sample)” และแซมเปิลหลาย ๆ แซมเปิลที่เรียงต่อกันเป็นชุดจะเรียกว่า “ลำดับข้อมูล (Data Sequence)” ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\{x_k\}$ สมการ (2.22) แสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา $x[k]$ สามารถใช้เป็นตัวแทนของสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา $x(t)$ ได้อย่างสมบูรณ์

2.5.2 สัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล

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

ในขณะที่สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) คือสัญญาณที่มีแอมพลิจูดหรือขนาดของสัญญาณภายในเซตจำกัด ดังนั้นสัญญาณดิจิทัลอาจหมายถึงสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาหรือสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สัญญาณแอนะล็อก สัญญาณดิจิทัลแบบที่ต่อเนื่องทางเวลา และสัญญาณดิจิทัลแบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา

2.6 เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะในการควบคุม (Performance Index Criteria)

จุดมุ่งหมายของการออกแบบระบบควบคุมต่าง ๆ นั้น คือการคำนวณหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเหล่านั้น เราอาจจะตั้งเงื่อนไขอะไรขึ้นมาอย่างหนึ่งและตั้งเป้าหมายของการออกแบบ

ระบบควบคุมเพื่อให้ระบบควบคุมทำงานได้ดีที่สุดตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้นั้น เงื่อนไขดังกล่าวที่นิยมให้ในการออกแบบตัวควบคุมที่ดีที่สุด (Optimal Control) เรียกว่า ดรรชนีสมรรถนะ (Performance Index) ซึ่งจะเป็นดรรชนีที่ชี้ว่าระบบที่ต้องการจะควบคุมทำงานเป็นอย่างไรบ้างตามเป้าหมายที่ตั้งไว้หรือไม่ การออกแบบหรือคำนวณหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุมด้วยวิธีการนี้จะต้องออกแบบเพื่อให้ได้คำสั่งควบคุมของระบบนั้นเป็นสัญญาณคำสั่งที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขหรือดรรชนีสมรรถนะที่กำหนด ซึ่งอาจจะเป็นการหาค่าสั่งควบคุมที่ทำให้ค่าดรรชนีสมรรถนะมีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดก็ได้แล้วแต่กรณี ซึ่งในที่นี่จะใช้ อินทิกรัลของค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ คูณด้วยเวลา (Integral Time Multiplied Absolute Error; ITAE) ซึ่งมีสมการดรรชนีสมรรถนะดังนี้

$$J = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (2.23)$$

โดยที่ $e(t)$ เป็นสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณคำสั่งกับสัญญาณเอาต์พุตที่วัดจากระบบที่กำลังควบคุม อย่างไรก็ตามถ้าสัญญาณค่าความผิดพลาด $e(t)$ นี้ไม่เป็นศูนย์เมื่อ $t \rightarrow \infty$ แล้วค่าดรรชนีนี้จะมีค่าสูงสุดหรืออาจจะเป็นค่าอนันต์ ทำให้เป้าหมายที่ตั้งไว้ไม่เป็นจริง เป้าหมายของการออกแบบคือต้องการให้ดรรชนีนี้มีค่าน้อยที่สุด หรือค่า $e(t)$ จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป บางครั้งอาจจะกำหนดค่าขอบเขตของเวลาเพื่อให้เป้าหมายหรือค่าดรรชนีมีความเป็นจริง ดังนั้นขอบเขตของเวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตจะต้องเปลี่ยนจาก ∞ ไปเป็นค่าเวลาสุดท้าย และมีค่ามาตรฐานเทียบสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางมาตรฐานเทียบสัมประสิทธิ์ ITAE

อันดับเทียบสัมประสิทธิ์ ITAE
$s + \omega_n$
$s^2 + 1.4\omega_n s + \omega_n^2$
$s^3 + 1.75\omega_n s^2 + 2.15\omega_n^2 s + \omega_n^3$

2.7 ปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่มีการหมุนหรือเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนไหวโดยอาศัยหลักการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ต่าง ๆ ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในการออกแบบรองลื่นหรือตลับลูกปืน (Bearing) ให้สามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูง โดยใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมุน ด้วยขีดจำกัดของแบร์ริงที่ต้องใช้สารหล่อลื่น (Lubricants) เป็นส่วนประกอบ ทำให้ไม่สามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูงได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเปลี่ยนไป และอาจส่งผลต่อพฤติกรรมการณ์การหมุนได้

(Fumio Matsumura., et al.)[3] นำเสนอวิธีการสำหรับการกำหนดระบบสมการและปัญหาการออกแบบการควบคุมสำหรับเพลาประเภทแวนอนรองรับระบบแม่เหล็กแบริ่ง โดยจะกล่าวถึงสมการพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์โดยการปรับพหุคูณทาง Dynamic แก้ปัญหาการลอยตัวและที่มาของระบบสมการการกระจัดและกระแสควบคุม เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแปรสแตต (State Variables) โดยการสร้างรูปแบบปริพันธ์ (Integral-type) ระบบควบคุม ที่สามารถจะรักษาให้โรเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางในสภาวะคงตัว

(Chip Rinaldi Sabirin., et al.)[4] 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

(Selim Sivrioglu., et al.)[5] นำเสนอว่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากแบริ่งแม่เหล็กมีความไม่แน่นอนเชิงเส้นสูงและความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ในการคำนวณแรงของแม่เหล็กทำให้การควบคุมแบริ่งแม่เหล็กมีความซับซ้อน โดยให้กระแสแบริ่งแม่เหล็ก Zero-Bias มีความเป็นไปได้ที่จะลดการสูญเสียไฟฟ้าเนื่องจากมีแม่เหล็กเพียงหนึ่งคู่เท่านั้นที่ทำงานในเวลาที่กำหนด การควบคุมกระแสของแบริ่งแม่เหล็ก Zero-Bias โดยการให้โรเตอร์และพารามิเตอร์ของแบริ่งเป็นค่าที่ไม่ทราบโดยสังเกตความไม่แน่นอนเชิงเส้นจะถูกใช้เพื่อประมาณสถานะที่ไม่สามารถวัดได้ซึ่งความผิดพลาดจะลดลงสู่ค่าเป็น Exponentially ตั้งแต่ Full State ของระบบควบคุมที่ไม่สามารถใช้อุปกรณ์ป้อนกลับได้ ใช้การควบคุมการปรับตัวประเภทเอาต์พุตแบบคัสเตป (Output-Type Adaptive Backstepping) ปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมเนื่องจาก Dynamic สถานะที่ไม่สามารถวัดค่าได้ของระบบแบริ่งเป็นการประมาณค่าโดยการสังเกตความไม่แน่นอนเชิงเส้นและการปรับตัวของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า โดยคำนึงถึงกฎปรับปรุง (Update laws) ที่ได้ในการอนุพันธ์ของกฎการควบคุม (Control laws) ในการตรวจสอบ

(Kai-Yew., et al.)[7] งานวิจัยนี้จะกล่าวถึง การปรับตัวสู่ศูนย์กลางอัตโนมัติ (Adaptive Autocentering) ที่ชดเชยแรงส่งจากความไม่สมดุลของระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น ตามกฎการควบคุม (Control laws) และหลักการพื้นฐานของวิธีการเป็นการดำเนินการระบุเอกลักษณ์ on-line ของระบบที่มีความเฉพาะทางกายภาพของความไม่สมดุลของโรเตอร์และใช้ผลที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ปรับแต่งตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ วิธีการนี้แตกต่างจากกระบวนการปกติของการชดเชยการปรับตัวป้อนไปข้างหน้า (Adaptive Feed-Forward Compensation) ซึ่งแบบจำลองเป็นผลกระทบของความไม่สมดุลที่กระจายภายนอกหรือผลกระทบจากสัญญาณรบกวนและไม่สนใจ

ผลกระทบทั่วไปกับสัญญาณอ้างอิงชั่วขณะ แตกต่างจากการชดเชยการปรับตัวป้อนไปข้างหน้า การควบคุมการปรับตัวสู่ศูนย์กลางอัตโนมัติมีความถี่มีความเป็นอิสระและทำงานภายใต้ความเร็วโรเตอร์ที่เปลี่ยนไป ประสิทธิภาพของการควบคุมอัลกอริทึมใช้กับความไม่สมดุลสถิต(Static Unbalance)และความไม่สมดุลพลวัต(Dynamic Unbalance)ของโรเตอร์แบบแข็งเกร็ง

(J. C. Ji., et al.)[8] ศึกษาการตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของโรเตอร์ที่รองรับด้วยแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นเป็นการตรวจสอบทั้งเบี่ยงต้นและเงื่อนไขเรโซแนนซ์(Resonance)ในการพิจารณา คุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบแบริงแม่เหล็กสามารถนำไปสู่ปรากฏการณ์ที่ไม่ได้อธิบายในแบบจำลองเชิงเส้น ด้วยวิธีการ Multiple scales ที่ใช้การกำหนดสี่อันดับแรกสมการอนุพันธ์สามัญที่อธิบายการปรับของแอมพลิจูดและเฟสของการสั่นโดยตรงในแนวนอนและแนวตั้ง การตอบสนองที่สภาวะคงตัวและเสถียรภาพของผลเฉลยกำหนดโดยวิธีการเชิงตัวเลข(Numerically)จากการลดรูประบบ แสดงให้เห็นผลในสภาวะคงตัว ผลกระทบของระยะความไม่สมดุลตลอดจนผลกระทบของอัตราขยายสัดส่วน(Proportional gain)และอัตราขยายอนุพันธ์(Derivative gain)ของตัวควบคุมบนการตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ

(Shiyu Zhou., et al.)[9] งานวิจัยนี้ศึกษาการกระตุ้นความไม่สมดุลแบบ Real-time ของโรเตอร์แบบแข็งเกร็ง เปรียบเทียบระหว่างเวลาช่วง Transient กับความเร่ง โดยเริ่มต้นจากสมการควบคุมของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์แบบแข็งเกร็ง ลักษณะพิเศษการควบคุมปรับตัวด้วยการออกแบบบนพื้นฐานแบบจำลองทาง Dynamic ด้วยวิธี Least Squares Estimation ซึ่งเป็นการใช้การประมาณค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมการปรับตัว การดูแลการควบคุมเป็นเป้าหมายที่ได้นำเสนอในพิกัดการประมาณพารามิเตอร์และการควบคุมความสมดุล ผลที่ได้จากการ Simulation คือสามารถลดความไม่สมดุลที่เพิ่มขึ้นจากการสั่นในระบบได้โรเตอร์แบริงแบบแข็งเกร็ง

(Zhang Kai., et al.)[10] แนะนำว่าในโรเตอร์ความเร็วสูงรองรับด้วยแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น การหมุนของโรเตอร์มีอิทธิพลอย่างมากจากความไม่สมดุลในโรเตอร์และบางโหมดการสั่นที่มีความถี่ต่ำจากโครงสร้างของระบบโรเตอร์ ความไม่สมดุลทั่วไปทาง Dynamic เป็นพฤติกรรมที่ไม่ต้องการของโรเตอร์ ซึ่งใช้วิธีการควบคุมการปรับตัวความไม่สมดุลของแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น พุดถึง Generalized Notch Filter ซึ่งเป็นการช่วยให้โรเตอร์ทำงานได้ตามต้องการและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความสมดุลทาง Dynamic มีสองวิธีที่แตกต่างกันคือ วิธีแรก Generalized Notch Filter จะใช้ยับยั้งการสั่นพร้อมกับโรเตอร์แล้วระบุนการกระจายความไม่สมดุลของโรเตอร์ วิธีการที่สองถูกนำมาใช้เพื่อลดแอมพลิจูดการสั่นมีอิทธิพลจากวิธีการทางสัมประสิทธิ์สามารถนำมาใช้เพื่อความสมดุลของโรเตอร์

(Raoul Herzog., et al.)[11] ศึกษาความไม่สมดุลแม่เหล็กของโรเตอร์ที่ลอยอยู่ในอากาศเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์พร้อมกับการสั่นซึ่งอาจนำไปสู่การแยกตัวกระตุ้นของแม่เหล็ก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้จึงได้เสนอการกรองสัญญาณช่วงแคบๆด้วยวิธี Generalized Narrow-band Notch Filter ที่ถูกแทรกกลงในการป้อนกลับหลายตัวแปร(Multivariable Feedback) ซึ่งไม่ทำให้ Closed loop มีความ

ยุ่งยาก โดยที่พารามิเตอร์ของ Generalized Notch Filter ขึ้นอยู่กับเมทริกซ์อินเวอร์สความไว (Inverse sensitivity matrix) ประมาณได้จากความเร็วในการหมุน เมทริกซ์นี้เป็นค่าที่วัดได้โดยง่าย จากวิธีการโดยทั่วไป ซึ่งแสดงถึงการกระจาย Notch ที่เป็นไปได้สำหรับ Gyroscopic ของโรเตอร์ที่ไม่สมบูรณ์ การนำเสนอวิธีการกรอง Notch เป็นประโยชน์ในทอมความซับซ้อนของการทำงานรวมถึง การวิเคราะห์ตรวจสอบเสถียรภาพของ Closed loop

(S. Beale., et al.)[12]กล่าวว่าปัญหาที่พบบ่อยของระบบเครื่องจักรที่มีการหมุนเพลลา รวมถึงระบบที่ใช้แบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น คือการสั่นที่เกิดพร้อมกับความไม่สมดุลมวล การขดเซย ความสมดุลอัตโนมัติที่เป็นสาเหตุมาจากการกระตุ้น AMB การหมุนของโรเตอร์รอบแกนเฉื่อยและเป็น การประมาณค่าแรงสู่ศูนย์กลางเนื่องจากความไม่สมดุลมวล อย่างไรก็ตาม เพราะความไม่สมดุลใน การสร้างแบบจำลองที่เกิดขึ้นจากสัญญาณเซนเซอร์ในรูปแบบไซน์ต่ำกว่าช่วงของความถี่ ไม่สามารถใช้ วิธีการขดเซยเพื่อลดการสั่นเพื่อรักษาการตอบสนองของความถี่ที่ต้องการ การปรับตัวความไม่สมดุลแรง (Adaptive Forced Balancing) ใช้แก้ปัญหานี้ได้และนำไปประยุกต์ใช้กับปลายเดี่ยว (Single-end) ในงานวิจัยนี้จะอธิบายถึงการขดการปรับตัวความไม่สมดุลแรงในกรณีรองรับด้วย AMB ในกรณีอินพุต เดี่ยวเอาท์พุตเดี่ยว (Single-Input Single-Output; SISO) และหลายอินพุตหลายเอาท์พุต (Multiple-Input Multiple-Output; MIMO)

2.8 สรุป

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้นได้เข้ามามีบทบาทสำคัญ อย่างมากในอุตสาหกรรม ด้วยคุณสมบัติอันเป็นเอกลักษณ์และยังเป็นทางเลือกใหม่ในการแก้ปัญหาโร เตอร์แบริ่งของเครื่องจักรที่มีการหมุนด้วยความเร็วรอบสูง และเพิ่มความหลากหลายในการ ประยุกต์ใช้งาน แต่เนื่องจากระบบควบคุมยังมีความซับซ้อนทั้งส่วนของโครงสร้างและความไม่เป็นเชิง เส้นของสนามแม่เหล็ก ทำให้ระบบยังไม่เป็นที่นิยมนักและมีราคาสูง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและ ออกแบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล รองรับด้านเดียว โดยการประมาณแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล เพื่ออธิบายการตอบสนอง ทางพลวัตและลดการสั่นของเพลลา โดยใช้หลักการ Switching Relay ON/OFF เพื่อควบคุมแบริ่ง แม่เหล็กแบบกระตุ้นและออกแบบตัวควบคุมเพื่อขดเซยเฟสรวมถึงตัวควบคุมแบริ่งแม่เหล็กแบบ กระตุ้นแยกควบคุมแกน x และ y

บทที่ 3

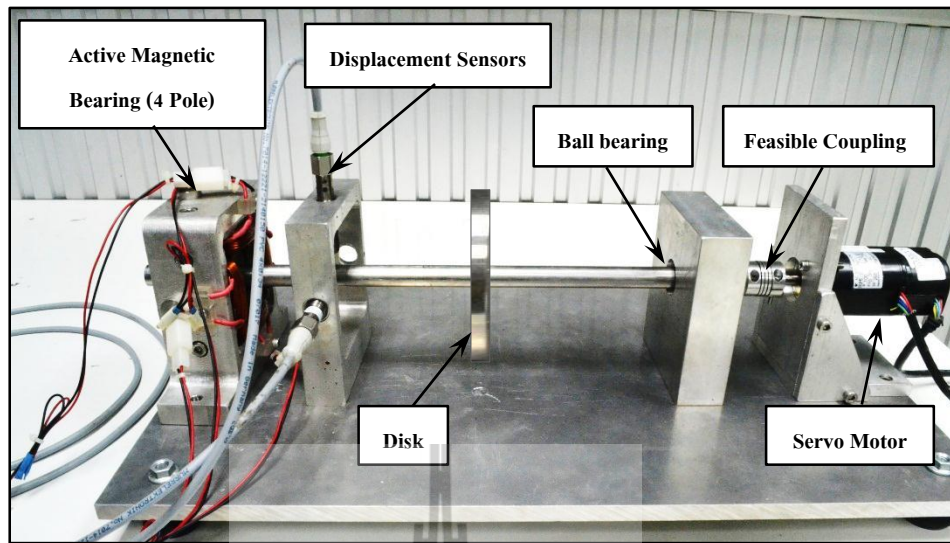
อุปกรณ์การทดลอง

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 และสัญญาณจะถูกขยายขึ้นอีกโดย Power Amplifier เพื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้แบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบจะเกิดการสั่นขึ้นในทิศทาง x และ y โดยมีเซนเซอร์วัดการกระจัดในรูปของค่าสัญญาณความต่างศักย์ (Voltage) ที่เป็น Analog Signal จะถูกส่งต่อไปยังบอร์ด RAPCON เพื่อแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital แล้วส่งกลับไปประมวลผลในโปรแกรมควบคุมการทำงานต่อไป

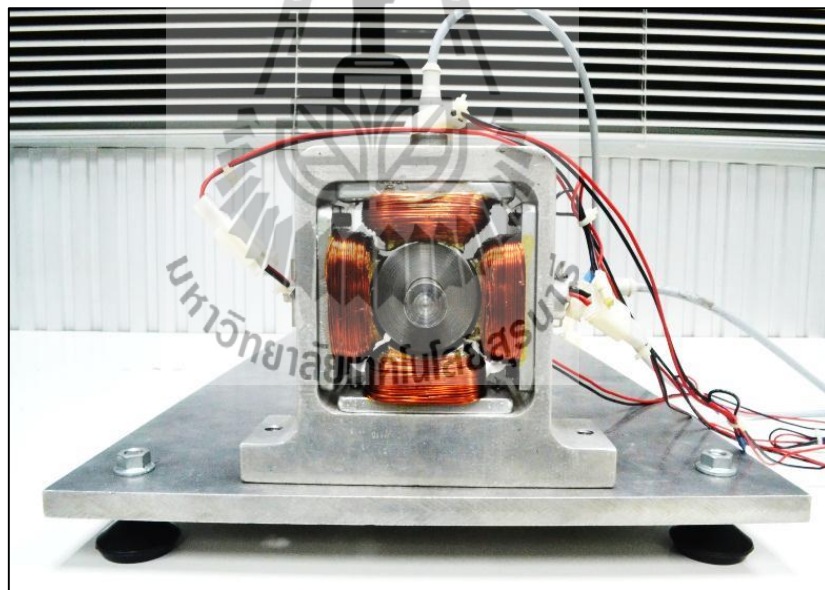
การทดลองนี้ได้ใช้เครื่องต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ คือ ระบบเพลลาที่ปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลรองรับด้านเดียว ประกอบไปด้วย

1. ระบบเพลลาที่ปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแบริ่งแบบธรรมดาและปลายอีกด้านรองรับด้วยแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล แสดงดังรูปที่ 3.1
2. แบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล 1 ชุด แสดงดังรูปที่ 3.2
3. บอร์ด Controller ชุด Power Amplifier และ PCI Aerial Card แสดงดังรูปที่ 3.3
4. เซนเซอร์วัดการกระจัด (Displacement Sensor)
5. คอมพิวเตอร์พร้อมระบบปฏิบัติการวินโดวส์และโปรแกรม MATLAB/Simulink

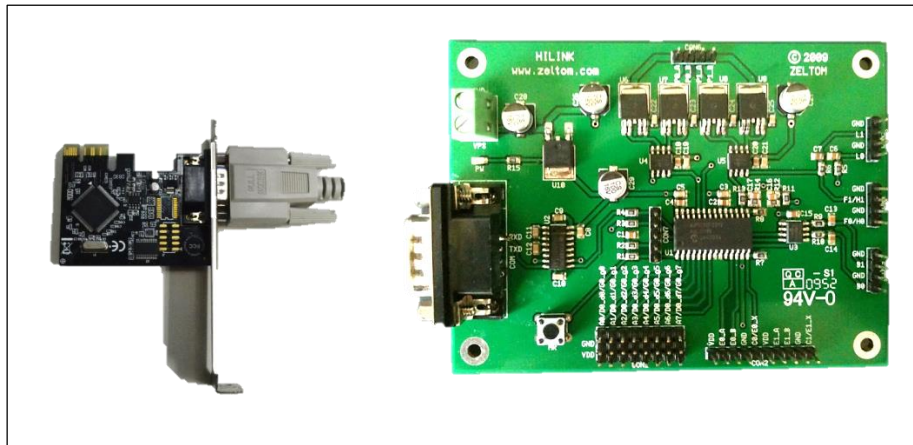
โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการลดการสั่นพลาด้วยระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล



รูปที่ 3.2 ระบบแบริ่งแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล



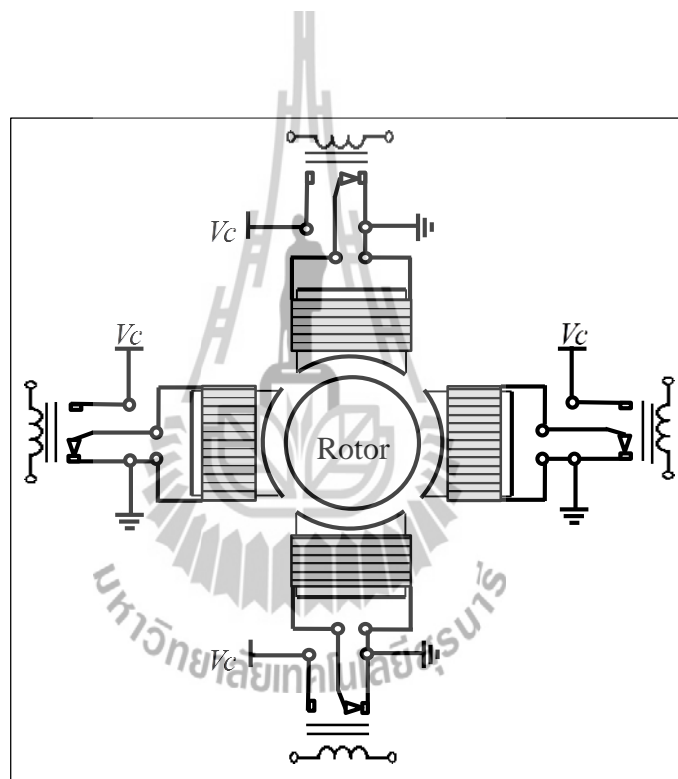
รูปที่ 3.3 PCI Serial Card เชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable
และบอร์ด RAPCON

ตารางที่ 3.1 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	0 – Supply Voltage, 5 A	
Voltage Regulator Output	5 (0.25)	V (A)
Ground GND	0	V
Sampling Range	Up to 15.2	kHz

3.1 การ Switch Relay ด้วย H - Bridge Switching ของ RABCON Board

ในการควบคุมการสั้นของเพลานั้นจะใช้แม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ซึ่งควบคุมใช้หลักการ Switching Relay ON/OFF กระแสที่ไหลผ่านขดลวด โดยแยกควบคุมแกน x และ y แสดงดังรูปที่ 3.4 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 3.4 แสดงการ Switch ON/OFF ด้วย Relay

3.2 การควบคุมผ่าน 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 แต่ละช่องสัญญาณจะจ่าย Voltage ตั้งแต่ 0 ถึง Supply Voltage, 5 A สัญญาณ Digital ที่จ่ายอยู่ใน PWM (Pulse Width Modulated)

แต่ละ H – Bridges มีส่วนประกอบ MOSFET Bridge สามารถขับได้ถึง 5 A ถ้าโหลดของ H – Bridges มีการกรอง โดยใช้ Lowpass Filter ดังนั้น Output สามารถเลือกประยุกต์ใช้ Amplifiers แบบ Linear โดยเปลี่ยนสัญญาณ Digital เป็น Analog และ Voltage ตกคร่อม H – Bridges ขึ้นกับโหลดสัมพันธ์กับ Duty – Cycle ของ Input คือ

$$V_{con} \approx (2\delta - 1)V_s \quad (3.1)$$

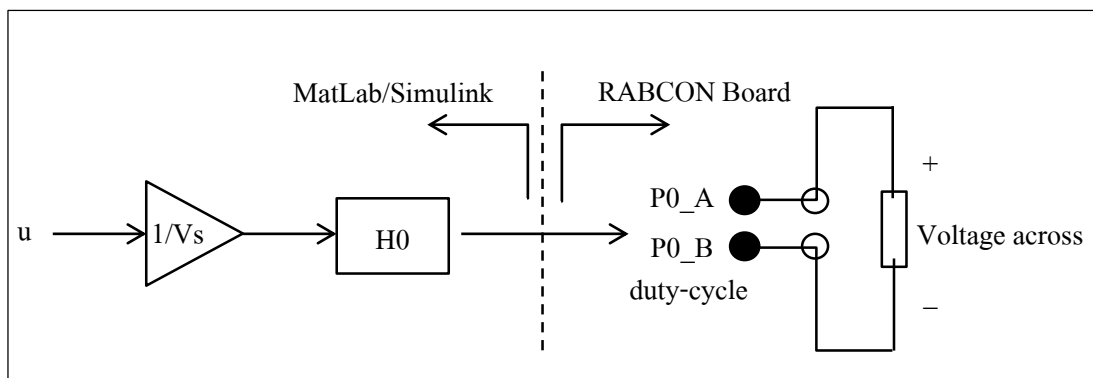
โดยที่ $\omega = \delta/f = \delta\tau$ เมื่อ f คือ Fundamental Frequency ของ PWM อยู่

ระหว่าง 449.8291 Hz ถึง 115156.25 Hz และ τ คือ คาบ ซึ่งแบ่ง H – Bridges ออกเป็น 2 โหมด โดยมีเงื่อนไขการส่งสัญญาณดังนี้

$$V_{con} \approx \begin{cases} +V_s, & u \geq V_s, \\ 2u - V_s, & 0 < u < V_s, \\ -V_s, & u \leq 0 \end{cases} \quad \text{Normal} \quad (3.2)$$

$$V_{con} \approx \begin{cases} +V_s, & u \geq +V_s, \\ u, & -V_s < u < +V_s, \\ -V_s, & u \leq -V_s \end{cases} \quad \text{Shifted} \quad (3.3)$$

ที่ Fundamental Frequency = 10,000 Hz, Supply Voltage, $V_s = \pm 12V$ และมีค่า Value คือ u/V_s โดยมีรายละเอียดของค่าต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่า Value ที่ส่งสัญญาณออกในแต่ละโหมด และแสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อระหว่าง MatLab/Simulink กับ RABCON Board ในการป้อนค่าสัญญาณ ให้กับ Power Amplifier (Magnetic Bearing) ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพการเชื่อมต่อของ MatLab/Simulink กับ RABCON Board

จากตารางที่ 3.2 จะได้ความสัมพันธ์ในการควบคุมแรงดันจากตัวควบคุมกับ RABCON Board เพื่อป้อนให้กับระบบแม่เหล็กดังนี้

$$V_{con} = 12.23V_{out} - 0.013 \quad (3.4)$$

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

$$V_{sen} \approx \begin{cases} 5, & u \geq 5, \\ u, & 0 < u < 5, \\ 0, & u \leq 0 \end{cases} \quad \text{Unipolar} \quad (3.5)$$

$$V_{sen} \approx \begin{cases} +5, & u \geq 5, \\ 2u - 5, & 0 < u < 5, \\ -5, & u \leq 0 \end{cases} \quad \text{Bipolar} \quad (3.6)$$

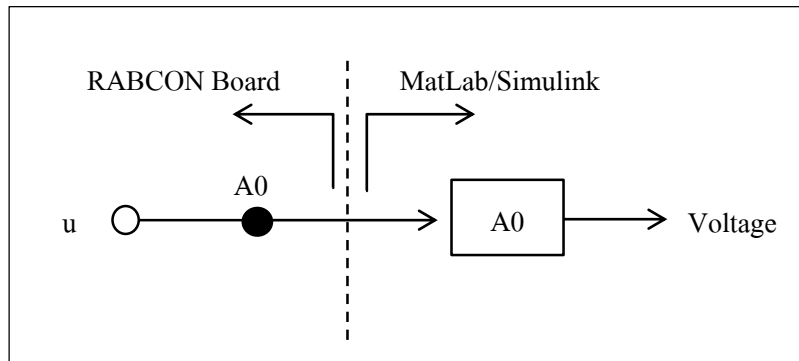
ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ Voltage เมื่อพิจารณาให้เป็นเชิงเส้นตลอดช่วง (0 - 3.5 mm หรือ ± 1.75 mm) ดังนี้

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

โดยที่ Gain ของ Sensor เท่ากับ 1.8177 V/mm สภาวะสมดุลจะต้องควบคุมให้ x และ y มีค่าเท่ากับ 1.75 mm แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.3 โดยมีไดอะแกรมการเชื่อมต่อของสัญญาณระหว่าง MatLab/Simulink กับ RABCON Board ในการรับค่าสัญญาณจากเซนเซอร์ผ่าน Voltage Divider ดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.2 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	-12.00	-12.24	10.46	-3.736	-12.00	-12.24	10.66	-3.807
-0.9	-10.800	-11.05	-9.50	-3.393				
-0.8	-9.60	-9.86	-8.51	-3.039				
-0.7	-8.40	-8.64	-7.49	-2.675				
-0.6	-7.20	-7.42	-6.45	-2.304				
-0.5	-6.00	-6.20	-5.41	-1.932				
-0.4	-4.80	-4.98	-4.38	-1.564				
-0.3	-3.60	-3.782	-3.35	-1.196				
-0.2	-2.40	-2.562	-2.28	-0.815				
-0.1	-1.20	-1.349	-1.21	-0.433				
0.0	0.00	-0.127	-0.13	-0.045				
0.1	1.20	1.088	0.97	0.347	-9.60	-9.85	-8.66	-3.093
0.2	2.40	2.307	2.048	0.731	-7.200	-7.42	-6.55	-2.339
0.3	3.60	3.538	3.13	1.118	-4.800	-4.97	-4.41	-1.575
0.4	4.80	4.800	4.240	1.514	-2.400	-2.559	-2.31	-0.824
0.5	6.00	6.03	5.290	1.889	0.00	-0.127	-0.13	-0.045
0.6	7.20	7.250	6.340	2.264	2.400	2.305	2.04	0.729
0.7	8.40	8.480	7.370	2.632	4.800	4.800	4.21	1.504
0.8	9.60	9.720	8.400	3.000	7.200	7.250	6.38	2.279
0.9	10.80	10.970	9.410	3.361	9.600	9.720	8.55	3.054
1.0	12.00	12.24	10.42	3.72	12.00	12.240	10.60	3.786



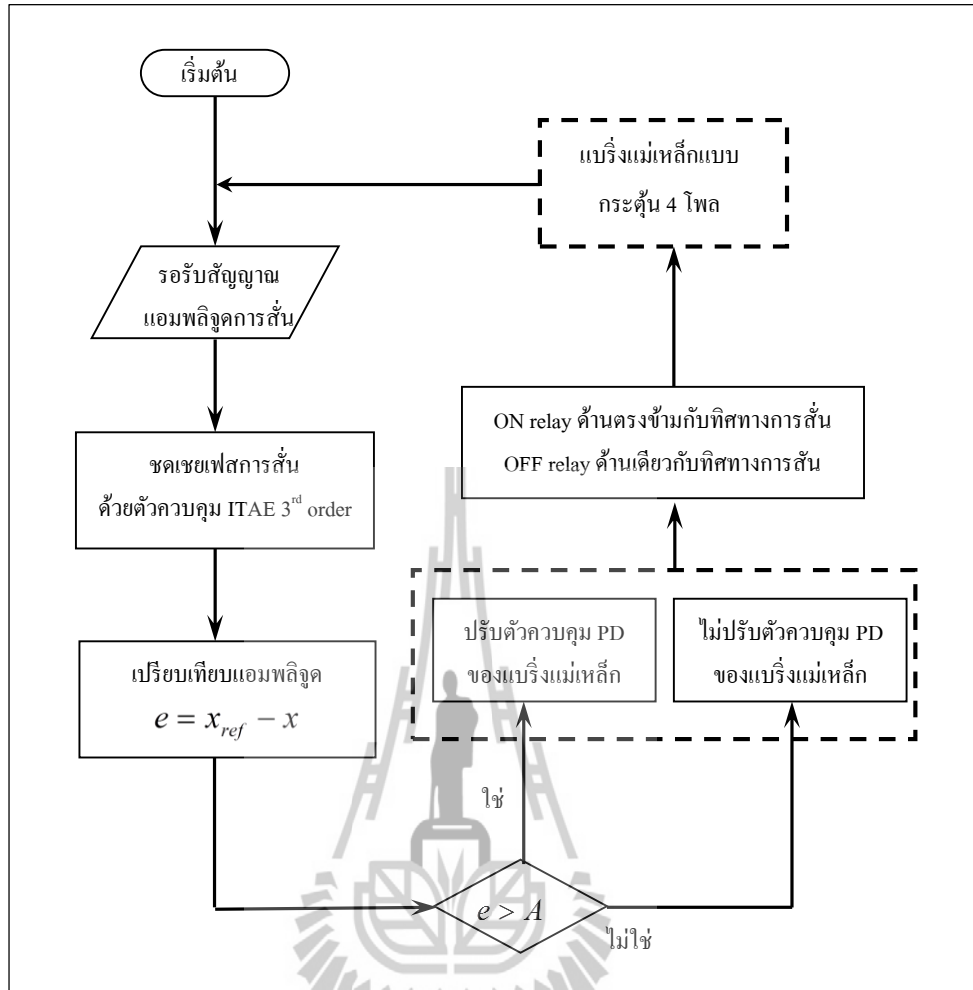
รูปที่ 3.6 แสดงการเชื่อมต่อของ MatLab/Simulink กับ RABCON Board
ในการรับค่าสัญญาณจากเซนเซอร์ผ่าน Voltage Divider

ตารางที่ 3.3 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

3.3 โปรแกรมการควบคุมการสั่นของเพลลาที่รองรับด้วยระบบแบริงแม่เหล็ก แบบกระตุ้นแบบ 4 โพล

ในการทดสอบการควบคุมการสั่นของเพลลาด้วยระบบแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพล ที่ใช้การชดเชยเฟสด้วยตัวชดเชย ITAE 3rd Order และควบคุมขนาดแอมพลิจูดด้วยตัวควบคุม PD ในการเก็บบันทึกข้อมูลของการสั่นในรูปของการกระจัดทั้งทิศทาง x และ y การควบคุมการทำงานของกระแสจะใช้โปรแกรม MatLab/Simulink ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนควบคุมการสั่งของเพลาดำด้วยระบบเบร็ลงแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพล

เมื่อเริ่มการทำงาน โปรแกรมจะรอรับสัญญาณการกระตุ้น ที่ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งเดียวกับระบบเบร็ลงแม่เหล็ก จากนั้นโปรแกรมชดเชยเฟสด้วย ITAE 3rd Order เมื่อสัญญาณมีเฟสตรงกันกับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งสัญญาณอ้างอิงนี้มาจากการลดขนาดของสัญญาณที่ผ่านตัวชดเชยเฟสให้เหลือ 70% ของสัญญาณการสั่ง เนื่องจากเราต้องการควบคุมให้การสั่งลดลง 30% ซึ่งถือเป็นเป้าหมายในงานวิจัยนี้ หลังจากนั้นจะเข้าสู่เงื่อนไขการเปรียบเทียบความแตกต่างขนาดแอมพลิจูดที่ของสัญญาณทั้งสอง โดยที่ A คือค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้หรือความสามารถลดการสั่งที่เครื่องมือทำได้ ในการตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานตามกรณีดังนี้

1. กรณีที่ $e > A$ แสดงว่ามีความแตกต่างระหว่างแอมพลิจูดที่วัดได้ผ่านตัวชดเชยเฟสมากกว่าสัญญาณอ้างอิง ตัวควบคุมแบบพีดีจะทำการปรับกระแสที่ป้อนให้กับขดลวด

แม่เหล็กแบริ่งเพิ่มขึ้นด้วยหลักการ Switch Relay เพื่อสร้างแรงดึงดูดเพลลาในทิศทางตรงกันข้ามกับการสั่นนั้น

2. กรณีที่ $e \leq A$ แสดงว่ามีความแตกต่างระหว่างแอมพลิจูดที่วัดได้ผ่านตัวชดเชยเฟสเท่ากับสัญญาณอ้างอิง ตัวควบคุมแบบพีดีจะทำการรักษาจังหวะการ Switch Relay เพื่อป้องกันกระแสในการสร้างแรงดึงดูดเพลลาในทิศทางตรงกันข้ามกับการสั่น

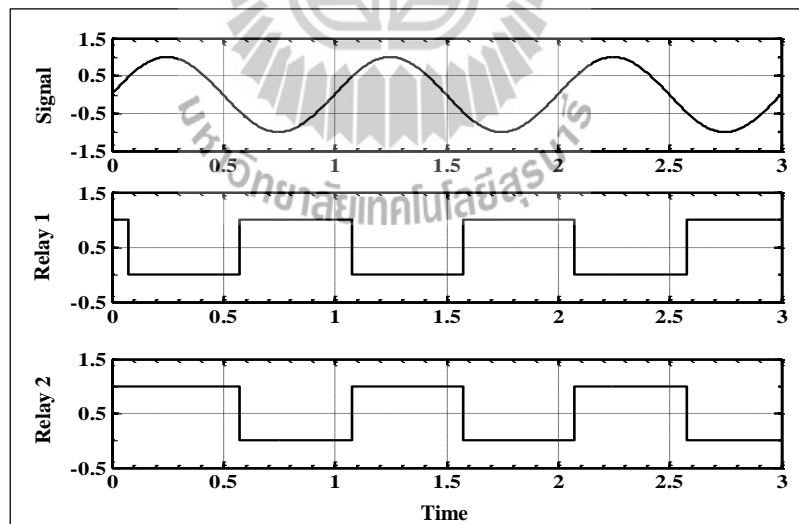


บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในการควบคุมสัญญาณที่ผ่านออกจากตัวควบคุมของระบบซึ่งเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่องทางเวลา ตัวควบคุมจะทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา เพื่อที่จะสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลง เมื่อสัญญาณตัดข้ามผ่านที่จุดศูนย์ ในจุดนี้จะบ่งบอกว่าระบบที่มี Sampling Time ที่สูงจะทำให้ระบบไม่มี Delay เกิดขึ้นหรืออาจเกิดขึ้นน้อยซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงาน แต่ถ่าระบบมี Sampling Time ที่ต่ำจะทำให้เกิด Delay ขึ้นในการควบคุม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอวิธีการควบคุมสัญญาณให้อยู่ในรูป ON/OFF Control ซึ่งเป็นพื้นฐานของการควบคุมระบบต่าง ๆ ในการควบคุมแบบรีแม็เหล็กนั้น จะใช้หลักการสร้างสัญญาณในทิศทางตรงกันข้ามกับการสั่นนั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นการแยกสัญญาณการควบคุม ON/OFF ออกเป็น 2 ชุดเพื่อใช้ควบคุม Relay โดยมีเงื่อนไขของสัญญาณแต่ละชุดดังนี้

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



รูปที่ 4.1 แสดงการควบคุม Relay ON/OFF

4.1 การทดสอบควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบแม่เหล็ก

แบบกระตุ้นแบบ 4 โพล

ในการทดสอบควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพล ด้วยตัวชดเชยเฟสด้วย ITAE 3rd Order และควบคุมขนาดด้วยตัวควบคุม PD ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถควบคุมระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพลได้พร้อมกันในเวลาเดียวกันในทิศทาง x และ y เนื่องจากการรับค่าและประมวลผลของระบบที่เป็น Real Time นั้นมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่ระบบประมวลผลที่เร็ว 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 ส่วนนี้จะทำการทำงานที่ความเร็วรอบการหมุนที่ 100 200 และ 300 RPM

ตามลำดับ

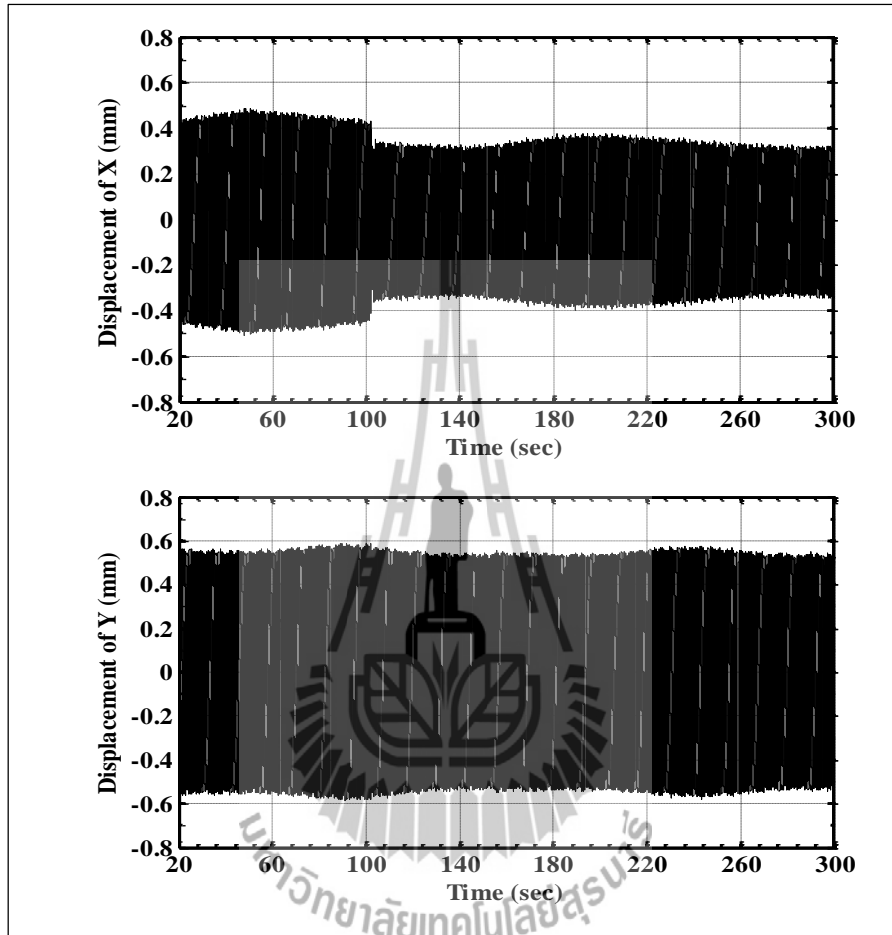
4.1.1 ผลการทดสอบควบคุมการสั่นของเพลาที่รองรับด้วยระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้นแบบ 4 โพลที่ความเร็วรอบ 100 RPM

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

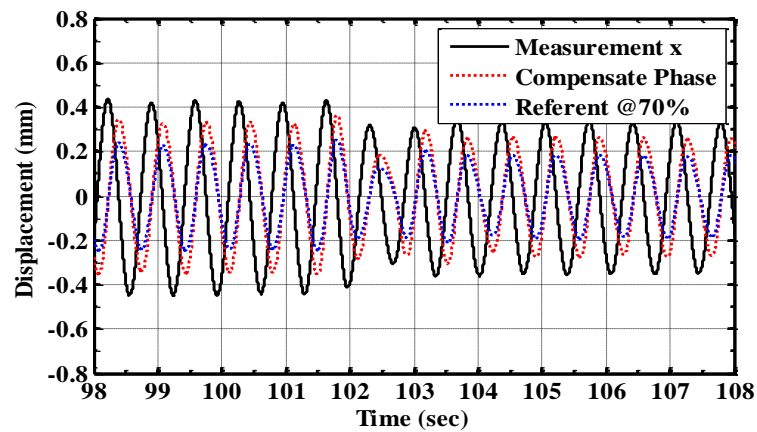
- การควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียว

จากรูปที่ 4.2 แสดงการกระจัดเปรียบเทียบระหว่างการกระจัดที่ได้จากการวัดของเซนเซอร์ในทิศทาง x กับการกระจัดที่เกิดจากการชดเชยเฟสให้กับระบบด้วย ITAE 3rd Order ซึ่งจะเห็นว่าการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทางพลวัต โดยมีการปรับตัวแตกต่างเฟสจากสัญญาณที่ได้จากการวัดและสัญญาณอ้างอิงที่ได้กำหนดขึ้นจากความสามารถหรือจุดประสงค์ที่ระบบสามารถทำงานได้คือ สัญญาณอ้างอิงที่มีขนาดลดลง 70% ของสัญญาณการสั่นที่วัดได้ผ่านตัวชดเชยเฟส (ซึ่งหมายความว่าสัญญาณอ้างอิงจะแปรผันตรงกับสัญญาณที่วัดได้ผ่านตัวชดเชยเฟส) จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการตัวควบคุมที่เวลา 102 วินาที การสั่นในทิศทาง x มีขนาดลดลง

เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 4.3 แต่เมื่อพิจารณาในทิศทาง y ซึ่งไม่มีการควบคุม จะเห็นว่าการสั่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง ต่อไปจะพิจารณาการควบคุมกระแส ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมที่ผ่านตัวควบคุมแบบ PD หลังจากนั้นจะเป็นการกำหนดการ Switch ON/OFF ให้กับแบร์ริงแม่เหล็กทางด้านซ้ายและขวา ผลแสดงดังรูปที่ 4.4

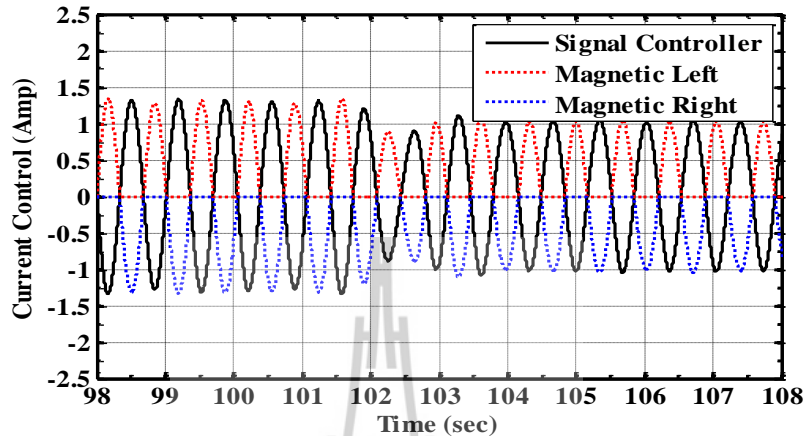


รูปที่ 4.2 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 100 RPM

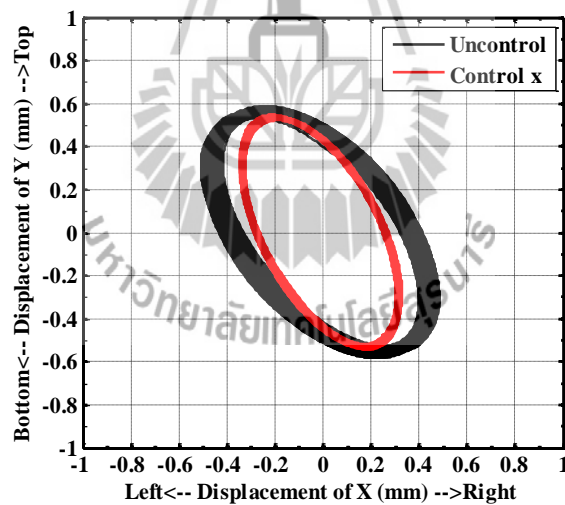


รูปที่ 4.3 แสดงการชดเชยมุมเฟสกับสัญญาณอ้างอิงที่ความเร็วรอบ 100 RPM

ผลที่ได้จากการควบคุมเฉพาะในทิศทาง x ที่ความเร็วรอบ 100 RPM เมื่อเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนที่เกิดขึ้นของเพลลาที่ตำแหน่งเพลลา ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งเปรียบเทียบก่อนการควบคุมกับหลังการควบคุมจะเห็นว่า การกระจัดในทิศทาง x ลดลงจาก 0.4978 mm เหลือ 0.3768 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.5879 mm เหลือ 0.5775 mm



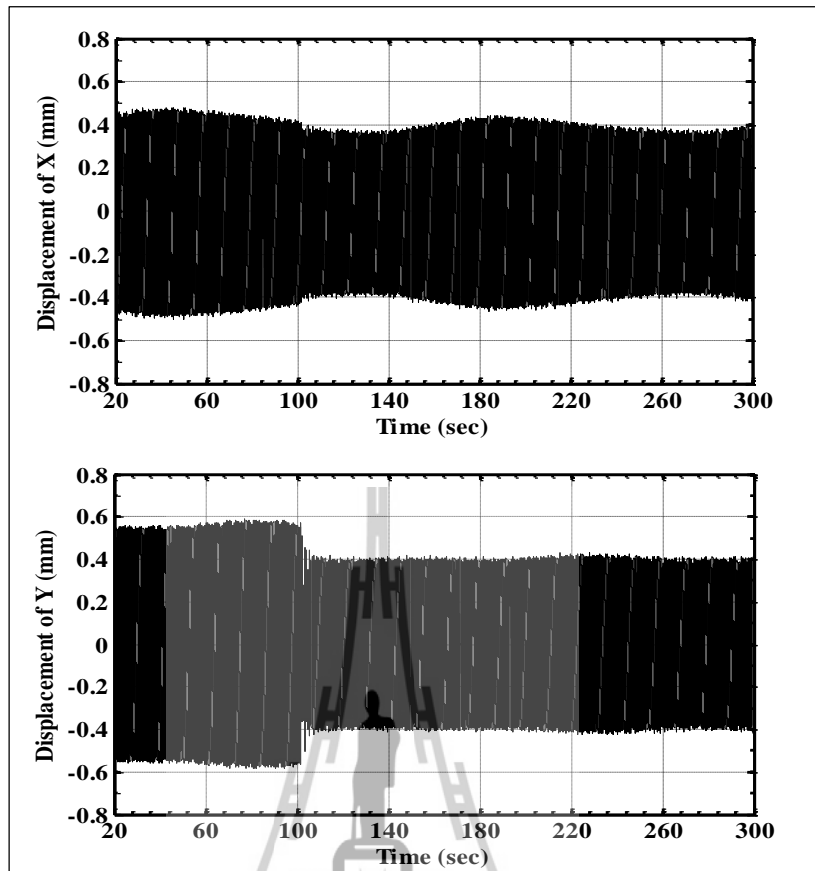
รูปที่ 4.4 แสดงกระแสควบคุมแบรีงแม่เหล็กในทิศทาง x ที่ความเร็วรอบ 100 RPM



รูปที่ 4.5 แสดงเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนของเพลลาเมื่อควบคุมในทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 100 RPM

- การควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียว

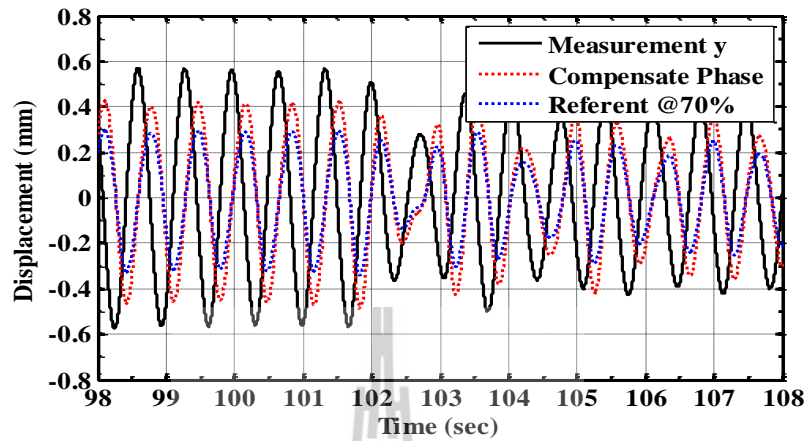
ผลที่ได้จากการควบคุมทิศทาง y เพียงอย่างเดียวแสดงการกระจัดในทิศทาง x และ y ดังแสดงในรูปที่ 4.6



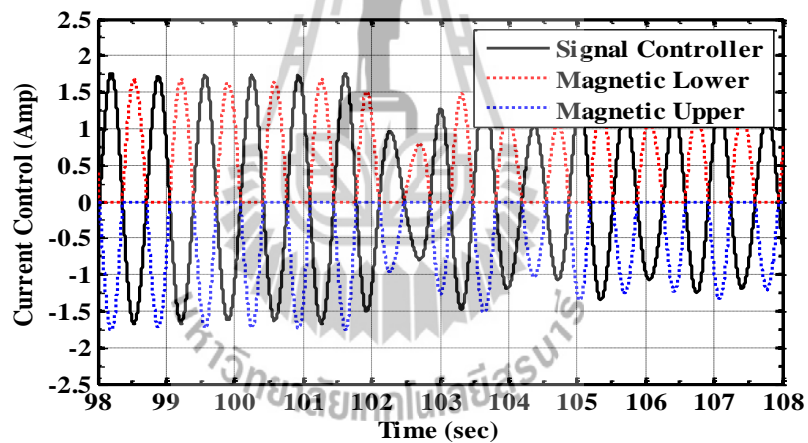
รูปที่ 4.6 แสดงการกระจัดของเพลาในทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 100 RPM

จากรูปที่ 4.7 แสดงการกระจัดเปรียบเทียบระหว่างการกระจัดที่ได้จากการวัดของเซนเซอร์ในทิศทาง x กับการกระจัดที่เกิดจากการชดเชยเฟสให้กับระบบด้วย ITAE 3rd Order ซึ่งจะเห็นว่าการปรับตัวแตกต่างเฟสจากสัญญาณที่วัดได้และสัญญาณอ้างอิงที่ได้กำหนดขึ้นจากความสามารถหรือจุดประสงค์ที่ระบบสามารถทำงานได้คือ สัญญาณอ้างอิงที่มีขนาดลดลง 70% ของสัญญาณการสั่งที่วัดได้ผ่านตัวชดเชยเฟส จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการควบคุมที่เวลา 102 วินาที การสั่งในทิศทาง y มีขนาดลดลงเมื่อเวลาผ่านไป หรืออาจพิจารณาได้จากรูปที่ 4.8 แต่เมื่อพิจารณาในทิศทาง x ซึ่งไม่มีการควบคุม จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ต่อไปจะพิจารณาการควบคุมกระแส ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมที่ผ่านตัวควบคุมแบบ PD หลังจากนั้นจะเป็นการกำหนด Switch ON/OFF ให้กับแบริ่งแม่เหล็กทางด้านบนและล่าง ผลที่ได้จากการควบคุมเฉพาะในทิศทาง y ที่ความเร็วรอบ 100 RPM เมื่อเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนที่เกิดขึ้นของเพลาที่ตำแหน่งเพลาแสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเปรียบเทียบก่อนการควบคุมกับหลังการควบคุมจะเห็นว่า การกระจัดใน

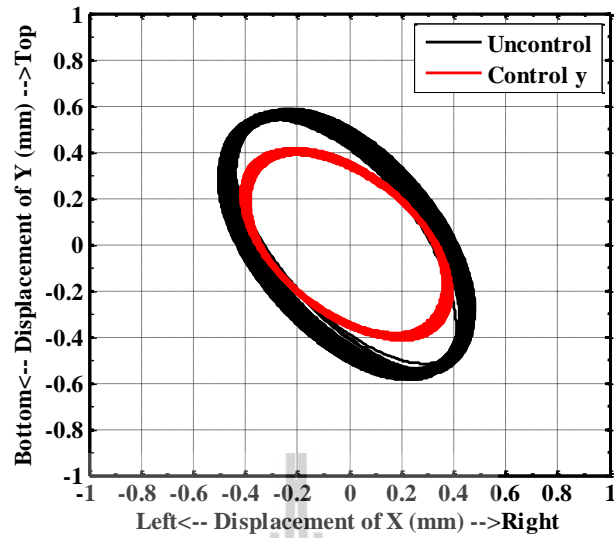
ทิศทาง x ลดลง จาก 0.4978 mm เหลือ 0.4425 mm และทิศทาง y ลดลง จาก 0.5879 mm เหลือ 0.4307 mm



รูปที่ 4.7 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง y เปรียบเทียบกับการชดเชยเฟส และสัญญาณอ้างอิงที่ความเร็วรอบ 100 RPM



รูปที่ 4.8 แสดงกระแสควบคุมแม่เหล็กในทิศทาง y กับสัญญาณการควบคุม ที่ความเร็วรอบ 100 RPM



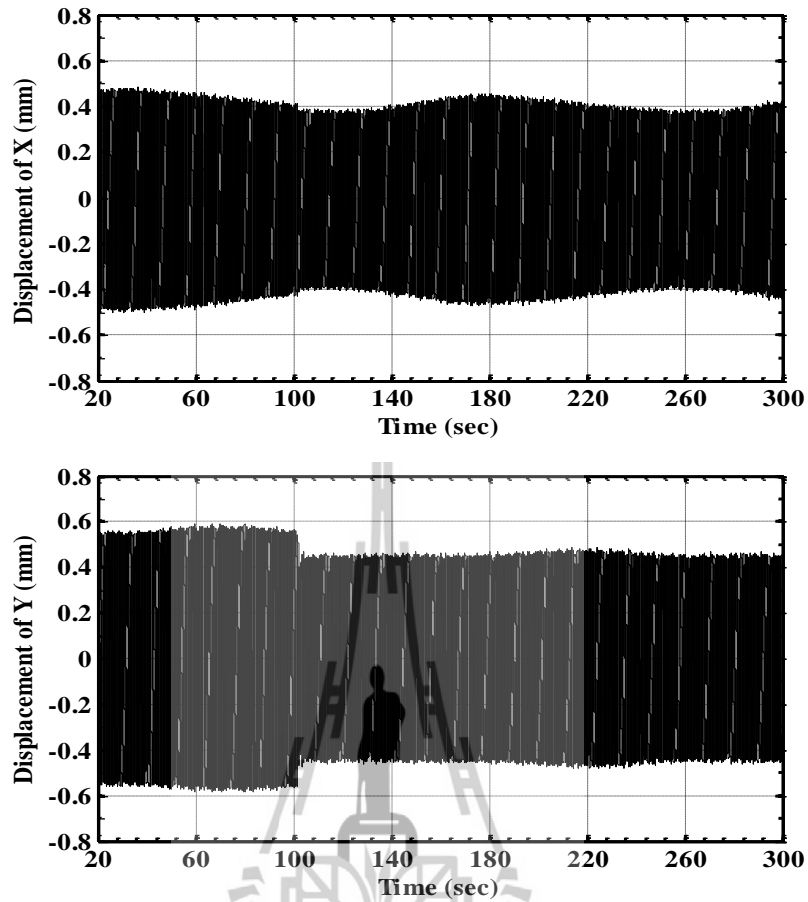
รูปที่ 4.9 แสดงเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนของเพลลาเมื่อควบคุมในทิศทาง y ทิศทางเดียว ที่ความเร็วรอบ 100 RPM

- การควบคุมทิศทาง x และ y

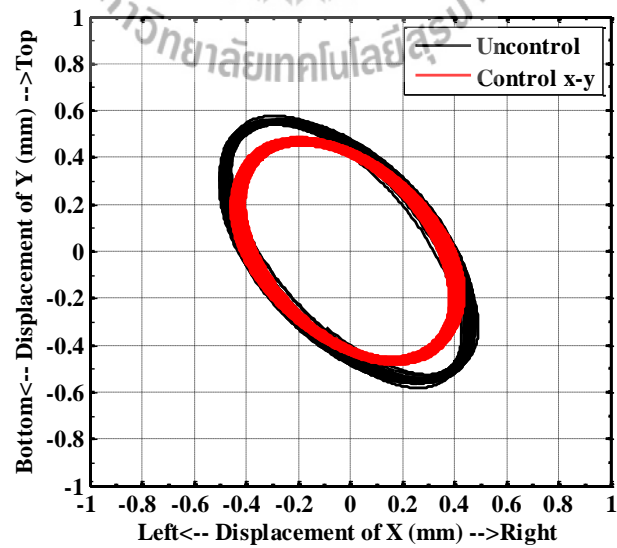
ซึ่งผลที่ได้จากการควบคุมทิศทาง y เพียงทิศทางเดียวแสดงการกระจัดในทิศทาง x และ y ดังรูปที่ 4.10

ผลที่ได้จากการควบคุมในทิศทาง y และ x ที่ความเร็วรอบ 100 RPM เมื่อเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนที่เกิดขึ้นของเพลลาที่ตำแหน่งเพลลาแสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเปรียบเทียบก่อนการควบคุมกับหลังการควบคุมจะเห็นว่า การกระจัดในทิศทาง x ลดลงจาก 0.4978 mm เหลือ 0.4574 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.5879 mm เหลือ 0.4765 mm

ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลจากการรันมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 100 RPM จากการบันทึกค่าในช่วงเวลาที่ได้นำเสนอไปแล้วในข้างต้นโดยแบ่งการควบคุมออก 3 กรณี คือควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียว ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียวและควบคุมทิศทาง y และ x ตามลำดับ โดยใช้ตัวชดเชยเฟสด้วย ITAE 3rd Order เมื่อสัญญาณมีเฟสตรงกันกับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งสัญญาณอ้างอิงนี้มาจากการลดขนาดของสัญญาณที่ผ่านตัวชดเชยเฟสให้เหลือ 70% ของสัญญาณการสั่น เนื่องจากเราต้องการควบคุมให้การสั่นลดลง 30% และการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมแบบ PD ซึ่งกำหนดการ Switch ON/OFF ให้กับแม่เหล็กทางด้านซ้าย ขวา บนและล่างตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า สามารถลดการสั่นในทิศทาง x สูงสุดที่ 24.3% และทิศทาง y สูงสุดที่ 26.74%



รูปที่ 4.10 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแส ทั้งทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 100 RPM



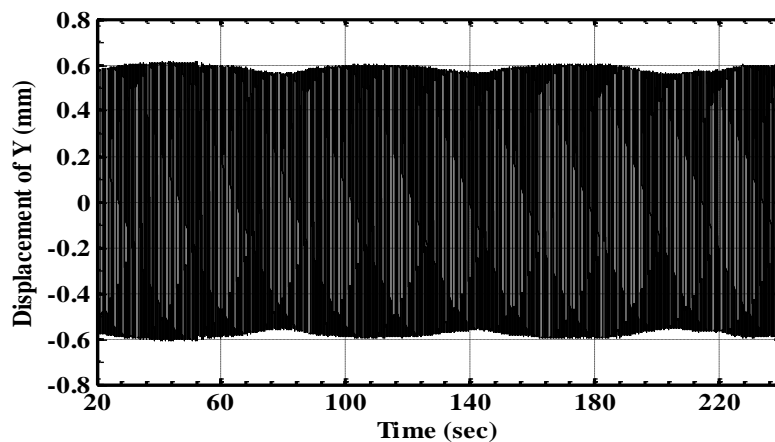
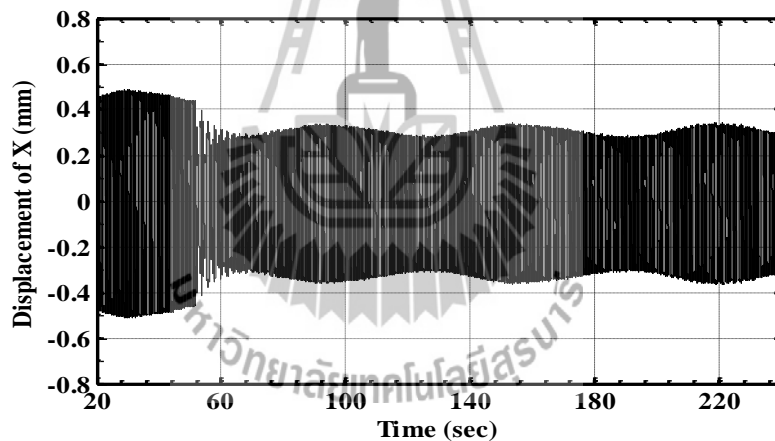
รูปที่ 4.11 แสดงเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนของเพลานเมื่อควบคุมในทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 100 RPM

4.1.2 ผลการทดสอบควบคุมการสั่นของเพลลาที่รองรับด้วยระบบแบริ่งแม่เหล็ก แบบกระตุ้นแบบ 4 โพลที่ความเร็วรอบ 200 และ 300 RPM

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

- ควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ 200 RPM

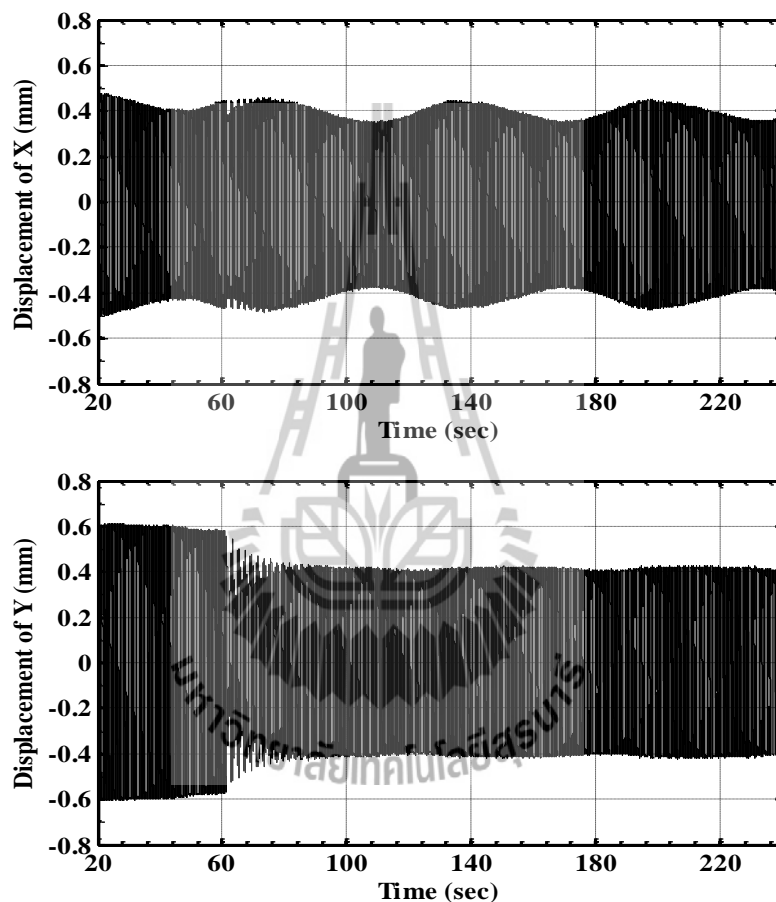
จากรูปที่ 4.12 การกระจัดของเพลลาในทิศทาง x เพียงทิศทางเดียวที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 200 RPM ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 50 วินาที แสดงให้เห็นว่าเพลลา มีขนาดการสั่นลดลงในทิศทาง x และส่วน y ไม่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถสรุปได้ว่าการกระจัดในทิศทาง x ลดลงจาก 0.4887 mm เหลือ 0.3387 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.614 mm เหลือ 0.6034 mm



รูปที่ 4.12 แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแสในทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 200 RPM

- ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ 200 RPM

จากรูปที่ 4.13 แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง y เพียงทิศทางเดียว ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 200 RPM ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 60 วินาที แสดงให้เห็นว่าเพลลา มีขนาดการสั่นลดลงในทิศทาง x และส่วน y ไม่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถสรุปได้ว่า การกระจัด ในทิศทาง x ลดลงจาก 0.4887 mm เหลือ 0.4454 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.6146 mm เหลือ 0.4284 mm

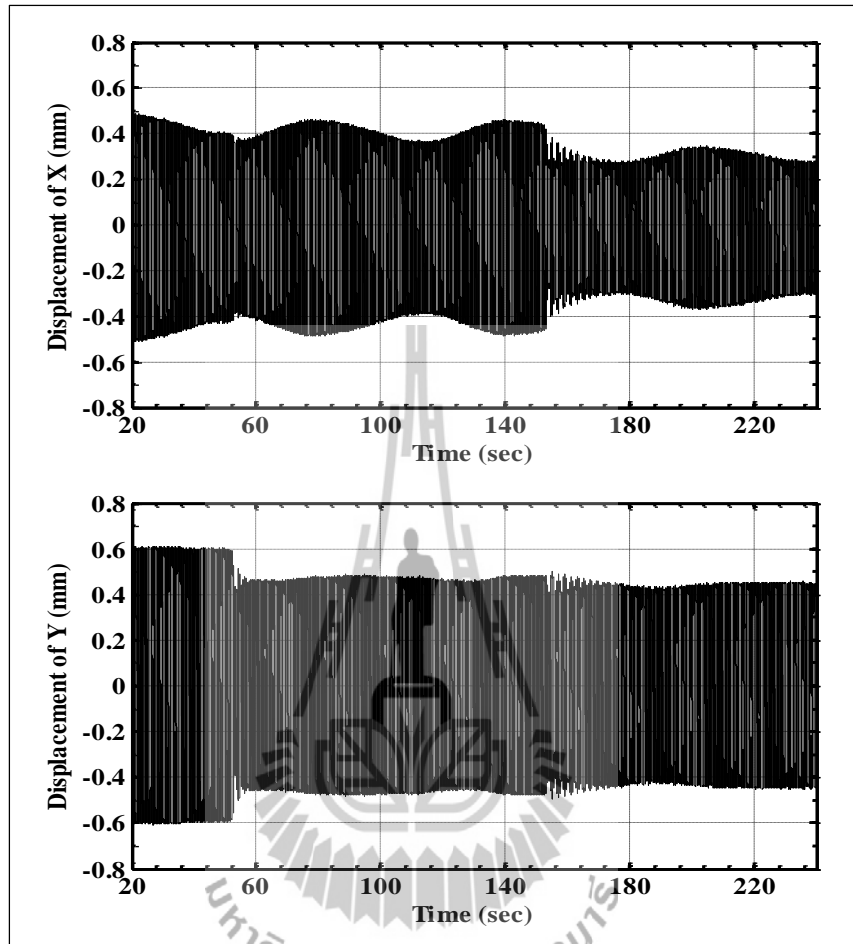


รูปที่ 4.13 แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแสในทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 200 RPM

- ควบคุมทิศทาง x และ y ที่ 200 RPM

จากรูปที่ 4.14 แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 200 RPM โดยทำการควบคุมทิศทาง y ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 50 วินาที และการควบคุมทิศทาง x ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 160 วินาที แสดงให้เห็นว่าเพลลา มีขนาดการสั่นลดลงในทั้งในทิศทาง x และ y สามารถสรุปได้ว่า การกระจัดในทิศทาง x

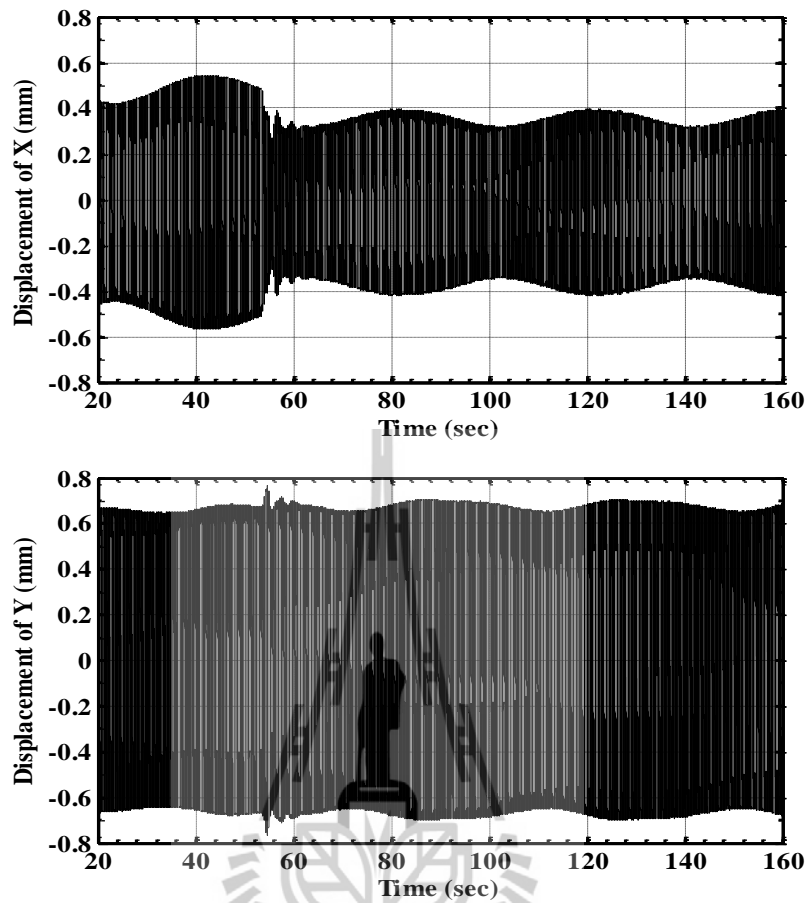
ลดลงจาก 0.4887 mm เหลือ 0.3478 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.615 mm เหลือ 0.4610 mm



รูปที่ 4.14 แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแส ทั้งทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 200 RPM

- ควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ 300 RPM

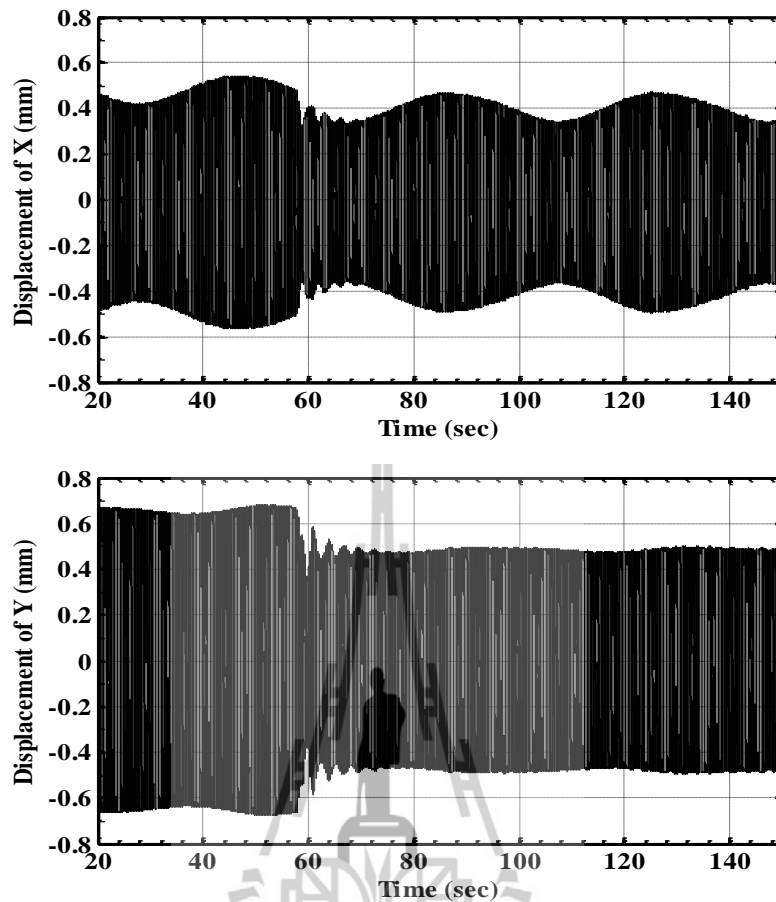
จากรูปที่ 4.15 แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง x เพียงทิศทางเดียว ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 300 RPM ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 60 วินาที แสดงให้เห็นว่าเพลลา มีขนาดการสั่นลดลงในทิศทาง x และส่วน y ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสามารถสรุปได้ว่า การกระจัด ในทิศทาง x ลดลงจาก 0.5437 mm เหลือ 0.3968 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.6846 mm เหลือ 0.6711 mm



รูปที่ 4.15 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแสในทิศทาง x ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 300 RPM

- ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ 300 RPM

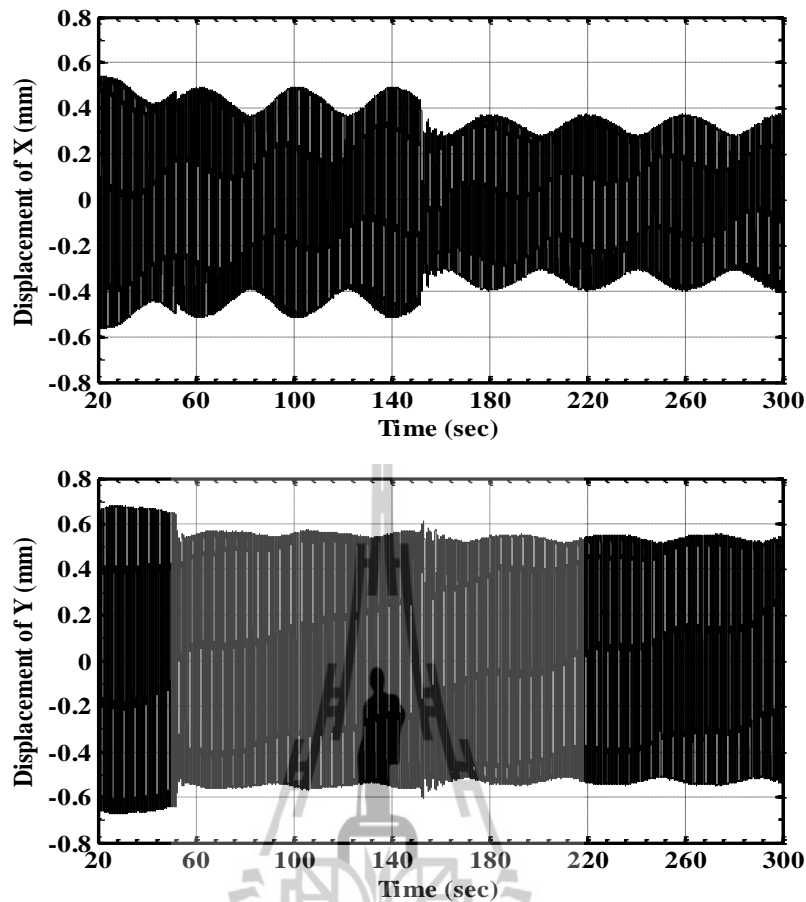
จากรูปที่ 4.16 แสดงการกระจัดของเพลานในทิศทาง y เพียงทิศทางเดียว ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 300 RPM ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 75 วินาที แสดงให้เห็นว่าเพลามี ขนาดการสั่นลดลงในทิศทาง x และส่วน y ไม่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถสรุปได้ว่า การกระจัด ในทิศทาง x ลดลงจาก 0.5437 mm เหลือ 0.4704 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.6846 mm เหลือ 0.5006 mm



รูปที่ 4.16 แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแสในทิศทาง y ทิศทางเดียวที่ความเร็วรอบ 300 RPM

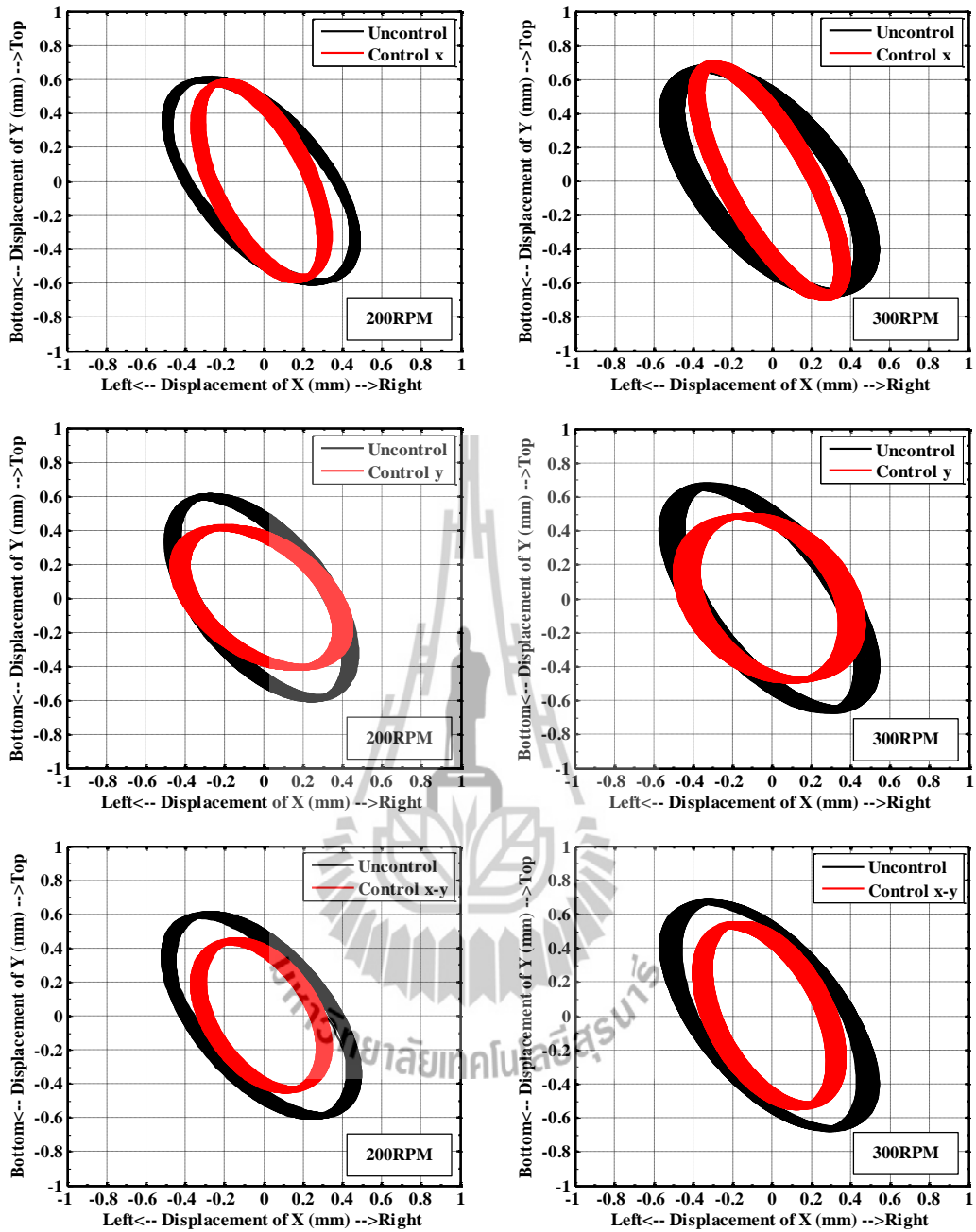
- ควบคุมทิศทาง y และ x ที่ 300 RPM

จากรูปที่ 4.17 แสดงการกระจัดของเพลลาในทิศทาง x และ y ตามลำดับที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 300 RPM โดยทำการควบคุมทิศทาง y ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 50 วินาที และการควบคุมทิศทาง x ซึ่ง Switch ตัวควบคุมที่เวลา 150 วินาที แสดงให้เห็นว่าเพลลา มีขนาดการสั่นลดลงในทั้งในทิศทาง x และ y สามารถสรุปได้ว่า การกระจัดในทิศทาง x ลดลงจาก 0.5437 mm เหลือ 0.3751 mm และทิศทาง y ลดลงจาก 0.6846 mm เหลือ 0.5524 mm



รูปที่ 4.17 แสดงการกระจัดของเพลาในทิศทาง x และ y เมื่อมีการควบคุมกระแส ทั้งทิศทาง x และ y ที่ความเร็วรอบ 300 RPM

ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลจากการรันมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 200 RPM จากการบันทึกค่าที่ช่วงเวลาที่ได้นำเสนอไปแล้วในข้างต้นโดยแบ่งการควบคุมออก 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 จากการบันทึกค่าที่ช่วงเวลาที่ได้นำเสนอไปแล้วในข้างต้น สรุปได้ว่าสามารถลดการสั่นในทิศทาง x สูงสุดที่ 31.03% และทิศทาง y สูงสุดที่ 26.88% และมีวงโคจรการหมุนที่ความเร็วรอบ 200 และ 300 RPM แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงเปรียบเทียบวงโคจรการหมุนของเพลาเมื่อควบคุมในทิศทางต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบ 200 และ 300 RPM

4.2 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบการลดการสั่นของเพลาด้วยระบบแบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล รองรับด้านเดียว เมื่อพิจารณาผลจากการรันมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 100 200 และ 300 RPM

โดยแบ่งการควบคุมออก 3 กรณีคือควบคุมทิศทาง x ทิศทางเดียว ควบคุมทิศทาง y ทิศทางเดียว และควบคุมทิศทาง y และ x ตามลำดับ โดยใช้ตัวชดเชยเฟสด้วย ITAE 3rd Order จะเห็นได้ว่าสามารถตอบสนองต่อพฤติกรรมทางพลวัตและชดเชย Delay ที่เกิดขึ้นต่าง ๆ ไม่ว่าจะมาจากอุปกรณ์ หรือ ระบบควบคุมเองได้อย่างเหมาะสม เพื่อใช้ในการควบคุมขนาดแอมพลิจูดต่อไป ส่วนการควบคุมขนาดแอมพลิจูดนั้นได้ใช้ตัวควบคุมแบบ PD ในการควบคุมการป้อนกระแสให้กับแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ซึ่งควบคุมใช้หลักการ Switching Relay ON/OFF กระแสที่ไหลผ่านขดลวด เพื่อควบคุมแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น ทั้ง 4 ด้าน โดยพิจารณาที่ตำแหน่งปลายเพลลาที่มีแบร์ริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลรองรับอยู่ ผลการทดลองสามารถลดการสั่นทิศทาง x เท่ากับ 28.67% และทิศทาง y เท่ากับ 27.97% ในช่วงความเร็วรอบ 100 RPM



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล รองรับการสั่นด้านเดียว ซึ่งสามารถสรุปผลงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษาได้ดังนี้

1. สามารถประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเพลลาที่มีปลายข้างหนึ่งรองรับด้วยแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ด้วยการระบุเอกลักษณ์จากพฤติกรรมการสั่นของเพลลาในแนวแกน x และ y โดยใช้วิธีการ Nonlinear Least Squares เพื่อการหาค่าสัมประสิทธิ์เทียบเท่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

2. ออกแบบระบบควบคุมแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพล ซึ่งระบบควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือควบคุมในแนวแกน x และแนวแกน y โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ผ่าน RAPCON Board เพื่อสั่งการ Switching Relay ON/OFF ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวด เพื่อสร้างแรงดึงดูดเพลลาในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของเพลลานั้น

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

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

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

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. วิธีการควบคุมแม่เหล็กแบบกระตุ้น 4 โพลโดยใช้หลักการ Switching Relay ON/OFF มีข้อดีก็คือ มีราคาถูก ความทนทาน แต่ก็ยังมีข้อเสียคือ Relay มีอายุการใช้งานตามจำนวน

การตัดต่อวงจร และความถี่ที่มีจำกัดในการ On/Off ของ Relay ซึ่งสัมพันธ์กันกับความถี่รอบการหมุนของเฟลา

2. ในทางปฏิบัติระบบแปรจึงเป็นได้ทั้งตัวขับเคลื่อน (Drive) หรือตัวรองรับ ดังนั้นเพื่อให้สามารถครอบคลุมการทำงานมากขึ้นจำเป็นต้องใช้ ระบบแปรแม่เหล็กในแนวรัศมีทั้งสองด้านและอาจมีความจำเป็นต้องใช้ ระบบแปรแม่เหล็กในแนวแกนร่วมด้วย และเนื่องจากระบบแปรแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีเพียง 4 โพล ซึ่งถือว่าไม่เพียงพอที่จะควบคุมเพื่อลดการสั่นที่เกิดขึ้นได้ จึงจำเป็นต้องออกแบบให้มีจำนวนโพลเพิ่มขึ้นอาจเป็น 6 หรือ 8 โพล แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจะมีความซับซ้อนขึ้น โครงสร้างทางกายภาพที่ต้องมีขดลวดพันอยู่ภายในก็จะเป็นเงื่อนไขหรือข้อกำหนดในการออกแบบ

3. ความสามารถของตัวควบคุมแบบ PD นั้นเพียงพอที่จะควบคุมการสั่นได้ในช่วงที่กำหนด แต่สำหรับระบบที่ต้องการความแม่นยำหรือมีความละเอียดต่อการควบคุมสูงอาจไม่เพียงพอ จำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมที่ปรับตัวได้ (Adaptive Control) หรือตัวควบคุมที่มีความคงทน (Robust Control) เพื่อให้การตอบสนองรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลง และมีความคงทนต่อการตอบสนอง เพื่อยืนยันความมีเสถียรของระบบได้



เอกสารอ้างอิง

- จิระพล ศรีเสริฐผล (2554). **Mechanical Vibrations**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 450 หน้า.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). **การควบคุมระบบพลศาสตร์**. (พิมพ์ครั้งที่ 2). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 848 หน้า.
- สรารวุฒิ 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**. (4th 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**. (4th 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

ก.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 8×12 bit analog inputs, 2×16 bit capture inputs, 2×16 bit encoder inputs, 1×8 bit digital input, 2×12 bit analog outputs, 2×16 bit frequency outputs, 2×16 bit pulse outputs and 1×8 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 8×16 bit inputs and 8×16 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 μC is the central microcontroller, UART is the universal-asynchronous-receiver-transmitter unit and PC is the host computer.

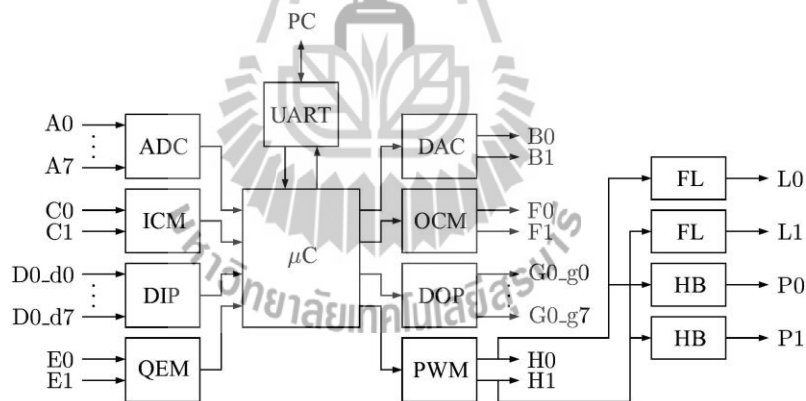


Figure 1. Functional block diagram of the board.

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.

ก.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 rtw_2009b_win7_fix.zip มาด้วย ซึ่งการติดตั้ง ต้องทำทีละขั้นตอน ด้วยวิธีการดังนี้

5. เข้าไปหาไฟล์ที่ชื่อว่า rtw_main.c ภายในคอมพิวเตอร์ เช่น

“C:\Program Files\MATLAB\R2009b\toolbox\rtw\targets\rtwin\src” แล้วเปิดดูชื่อไฟล์ rtw_main.c เป็น rtw_main.org และ copy ไฟล์ rtw_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 rtwini.tlc และ rtwinfo.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 rtw_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

Resume

Associate Professor Jiraphon Srisertpol, Ph.D

Current address: 111/172 Suranaree University of Technology, Muang

Nakhon Ratchasima, Thailand,30000

E-mail: jiraphon@sut.ac.th , srisertpol@hotmail.com

Tel:+664422 3117 **Fax:**+6644224413



Education

2003 Ph.D. (System analysis, Control and Processing information) St.Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia. (Russian Federation scholarship)

1998 M.E. (Technical Maintenance Aviation Electrosystems and Pilot- Navigation Complexes) St.Petersburg State Academy of Aerospace Instrumentation, Russia.

2008 New university executive course

- “Energy and Sustainable Development” at the International Centre for Sustainable Energy Development , UNESCO/The Russian Federation Co-Sponsored Fellowships Program, Oct. 14, – Nov. 25, 2010, Moscow, Russia.
- “2011 International Scientific Instrument Technology Workshop” at the Instrument Technology Research Center, Oct. 17, - Oct. 28, 2011, Hsinchu, Taiwan.

Previous professional activities

1998- 2006 **Lecture**, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology

2006- 2009 **Assistant Rector**, Suranaree University of Technology

2009- 2013 **Chair**, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology

2009- 2012 **Committee**, Academic Council of Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

2009- 2012 **Committee**, Thai Society of Mechanical Engineering (TSME)

2009- 2010t **Adviser**, Total Energy Management No.8, Department of Industrial Promotion, Ministry of Industry

Present position

2013- present **Vice Rector for Student Affair**, Suranaree University of Technology

2014- present **Associate professor**, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology

2010- present **Head**, System & Control Engineering Laboratory, Suranaree University of Technology

Academic works

1. International journal

- **Srisertpol, J.**, “Method of Parameter Identification for Non-Stationary Process”, The Instrumentation, Systems and Automation Society (ISA) EuroXChange No. 7(Spring) 2002, pp 33-36.
- **Jiraphon Srisertpol**, Prasit Srinakorn, Adtavirod Kheawnak and Kontorn Chomniprasart (2010) “Mathematical Modeling and Parameters Estimation of an Anaerobic Digestion of Shrimp Culture Pond Sediment in a Biogas Process”, International Journal of Energy and Environment, Issue4 Vol.4. pp.213-220.
- **Jiraphon Srisertpol**, Suradet Tantrairatn, Prarinya Tragrunwong and Vorapot Khomphis (2011) “Estimation of the Mathematical Model of the Reheating Furnace Walking Hearth Type in Heating Curve Up Process”, International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Issue 1 Vol.5, pp.167-174.
- Suradet Tantrairatn, Paphakorn Soonanon, Sirisak Rangklang and **Jiraphon Srisertpol** (2012) “A Comparison of Cover Coat Methods for Electronic Flexible Printed Circuit (E-FEC) Based on Peeling Strength” Advanced Materials Research, Vol.421, pp.489-492.
- Thanawat Pongam, **Jiraphon Srisertpol** and Vorapot Khomphis (2012) “Manufacturing Process Identification for the Reheating Furnace Walking Hearth Type using Genetic Algorithm” International Journal Modeling and Optimization, Vol.2(2), pp.114-118.
- Pewmaikam Chermpon, **Jiraphon Srisertpol** and Chanyut Khajorntraidet (2012) “Adaptive Fuzzy Logic Compensator for Permanent Magnet Synchronous Motor Torque Control System” International Journal Modeling and Optimization, Vol.2(2), pp.141-146.
- Saraporn C., Dolwichai T., **Srisertpol J.** and Teeka K. (2013) “Signal Conditioning of Low-cost Gyroscope using Kalman Filter and Nonlinear Least Square Method” Advanced Materials Research, Vol.622-623, pp.1519-1523.
- **Srisertpol J.**, Srinakorn P., Kheawnak A. and Chomniprasart K. (2013) “Estimation of Biogas Production from Shrimp Pond Sediment using the Artificial Intelligent”, Applied Mechanics and Material, Vol.260-261, pp.695-700.
- Khajorntraidet C., **Srisertpol J.**, and Prattanarak C.(2013) “Alternative Technique for DC Servo Motor Control using Adaptive Load Torque Compensator”, Advanced Science Letters, Vol.19(8), pp.2139-2143.
- Pawin Jawayon and Jiraphon Srisertpol (2013) “Speed Estimation 3-Phase BLDC Motor using Genetic Algorithm” International Journal of Engineering Science and Innovation Technology (IJESIT), Vol.2(1), January 2013, 254-263.
- Saraporn C., Dolwichai T., **Srisertpol J.** and Teeka K. (2013) “Signal Conditioning of Low-cost Gyroscope using Kalman Filter and Nonlinear Least Square Method” Advanced Materials Research, Vol.622-623, pp.1519-1523.
- **Srisertpol J.**, Srinakorn P., Kheawnak A. and Chomniprasart K. (2013) “Estimation of Biogas Production from Shrimp Pond Sediment using the Artificial Intelligent”, Applied Mechanics and Material, Vol.260-261, pp.695-700.

- Khajontraidet C., **Srisertpol J.**, and Prattanarak C. (2013) "Alternative Technique for DC Servo Motor Control using Adaptive Load Torque Compensator", *Advanced Science Letters*, Vol.19(8), pp.2139-2143.
- Thanawat Pongamg, **Jiraphon Srisertpol** and Vorapot Khomphis (2013) "PI Controller Design for Temperature Control of Reheating Furnace Walking Hearth Type in Setting Up Process", *Advanced Materials Research*, Vol.780, pp.801-806.
- Aunsiri T., Numanoy N., Hemsuwan W. and Srisertpol J. (2014) "Servo System using Pole-Placement with State Observer for Magnetic Levitation System" , *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol.309, pp.921-926.
- Odngam S., Khaewnak N., Dolwichai T. and **Srisertpol J.** (2014) "A Comparative Study on Gasoline, LPG and Biogas Affecting the Dynamic Responses of SI Engine", *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol.309, pp.927-932.
- Thanawat Pongamg, Vorapot Khomphis and **Jiraphon Srisertpol** (2014) "System Modeling and Temperature Control of Reheating Furnace Walking Hearth Type in Setting Up Process", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.28(8), pp.3377-3385.

2. National journal

- **Srisertpol, J.**, Katkov, M.S., Azamov, A.A., (2002), "System Identification of Model Non-Stationary Plant Using The Structure of The Generalized Tuning of Measurement (GTSM)", *Control and Information Systems for Mobile Objects "Seminars ASK Lab 2001" St.Petersburg, Polytechnic 2002*. pp 163-171. (in russian)
- **Jiraphon Srisertpol**, Supot Phungpimai and Pawin Jawayon (2010), "Analysis and Design Adaptive Control for an Infrared Oven in HDD Manufacturing Process", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol.33 No.3, July - September 2010. pp.11-24.
- Prasit Srinakorn, Khwanta Tantikamton, Adtavirod Khaewnak, **Jiraphon Srisertpol** and Kontorn Chamniprasart (2011), "Treatment of Marine Shrimp Culture Pond Sediment by Anaerobic Digestion Process", *Journal of Environmental Management*, Vol.7, No.2, July- December 2011.
- Winai Tumthong, Prasertsiri Varunchitapongsa and **Jiraphon Srisertpol** (2014), "Equipment to Detect Bad Isolator in Hard Disk Drive Testing Process", *KKU Engineering Journal*, Vol.41, No.3, July-September 2014, pp.301-311.

3. International conference

- **Srisertpol, J.**, Katkov, M.S., Azamov A.A.(2001), "The Synthesis of The Indirect Adaptive Control System", *Proceedings of the 5th International Federation of Automatic Control (IFAC) Symposium "Nonlinear Control Systems"*, pp 346-379.
- **Srisertpol, J.**(2001), "Adaptive System with Modal Control", *Proceedings of the BICAMP'01-The Third International School-Seminar*, pp 64-66.

- **Srisertpol, J.**, Katkov, M.S.(2002), "Research of Adaptive Parametrical Measurement System For Non-Stationary Plant", Proceedings of the International Symposium "Space Instrument and Technologies" ,pp 101-102.
- **Srisertpol J.**, Rodpai A. (2007) "Mathematical Model of Linear Viscoelastic Materials using Weighting Least Square Method", Proceedings of the 26th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2007), 12-14 February 2007, Innsbruck, Austria., pp.452-457.
- **Jiraphon Srisertpol**, Chanyut Khajorntraidet, Chermtong Prattanaruk (2008) " Adaptive Algorithms for Suppressing Beam Vibration of Dual Mass Cantilever Absorber", Proceedings of the 36th International Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics-2008 (APM08)" , 6-10 July 2008, St.Petersburg, Russia., pp.629-639.
- **Jiraphon Srisertpol**, Supot Phungpimai and Pawin Jawayon (2009) "PID Closed-loop Identification and Design for an Infrared Oven", Proceedings of the 2nd International Data Storage Technology Conference (DST-CON 2009), 13-15 May 2009, Thailand Science Park Convention Center, Bangkok, Thailand.
- **Jiraphon Srisertpol**, Chanyut Khajorntraidet, (2009) "Estimation of DC Motor Variable Torque using Adaptive Compensation", Proceedings of the 2009 Chinese Control and Decision Conference (2009 CCDC) , 17-19 June 2009, Guilin, China.pp.718-723.
- **Jiraphon Srisertpol**, Supot Phungpimai, (2009) "Closed-loop Identification of Infrared Oven in HDD Manufacturing Process", Proceedings of the 2009 Chinese Control and Decision Conference (2009 CCDC) , 17-19 June 2009, Guilin, China.pp.2396-2400.
- Chanyut Khajorntraidet, **Jiraphon Srisertpol**, (2010) "Simulation Studies of Position Control System for Estimation of DC Motor Load Torque",The 9th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation (ISPRA'10), 20-22 February 2010, University of Cambridge, UK., pp107-112.
- **Jiraphon Srisertpol**, Supot Phungpimai, (2010) " Model Reference Adaptive Temperature Control of the Electromagnetic Oven Process in Manufacturing Process",The 9th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation (ISPRA'10), 20-22 February 2010, University of Cambridge, UK., pp57-61.
- **Jiraphon Srisertpol**, Arthit Srikhew and Pawin Jawayon, (2010) "AI-Based Sensorless Speed Estimation of 3-Phase BLDC Motor", Proceeding of the Third International Workshop on Advanced Computational Intelligence (IWACI2010), 25-27 August 2010, Suzhou, China, pp537-543.
- **Jiraphon Srisertpol**, Prasit Srinakorn, Adtavirod Kheawnak, Kontorn Chomniprasart and Arthit Srikhew (2010) "Estimation dynamical Model of an Anaerobic Digestion of Shrimp Culture Pond Sediment in a Biogas Process using Genetic Algorithm", The 9th WSEAS International Conference on SYSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING (ICOSSE'10), Iwate, Japan, October 4-6, 2010. pp.449-453.
- Chanyut Khajorntraidet and **Jiraphon Srisertpol** (2010) "Torque Control for DC Servo Motor using Adaptive Load Torque Compensation", The 9th WSEAS International Conference on SYSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING (ICOSSE'10), Iwate, Japan, October 4-6, 2010. pp454-458.
- **Jiraphon Srisertpol**, Sorada Khaengkarn and Warong Pungpipat (2010) "Optimal Hot Plate Temperature and Pressing Time in Attachment Process for Flexible Damper", The 9th WSEAS International Conference on

SYSSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING (ICOSSE'10), Iwate, Japan, October 4-6, 2010. pp.459-463.

- **Jiraphon Srisertpol**, Paphakorn Soonanon, Preecha Chapathong and Sorada Khaengkarn (2010) "Verification of Measurement System for Shearography Machine", The 9th WSEAS International Conference on SYSSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING (ICOSSE'10), Iwate, Japan, October 4-6, 2010. pp.484-488.
- **Jiraphon Srisertpol**, Suradet Tantrairatn, Prarinya Tragrunwong and Vorapot Khomphis (2010) "Temperature Control for Reheating Furnace Walking Hearth Type in Heating Curve Up Process", The 9th WSEAS International Conference on SYSSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING (ICOSSE'10), Iwate, Japan, October 4-6, 2010. pp.464-469.
- Prasertsiri Varunchitapongsa, **Jiraphon Srisertpol** and Winai Tumthong (2012) "Mechanical Property Change of Variation Isolator in the Pocket Slot", International Data Storage Technology Conference, Impact Convention Center, Thailand, January 9-10, 2012.
- Winai Tumthong, Prasertsiri Varunchitapongsa, **Jiraphon Srisertpol** and Chermdhong Prattanarak (2012) "Vibration Analysis of Pocket Slot using Finite Element Method", The 4th International Conference on System Modeling and Optimization, Hong Kong, China, February 17-18, 2012, pp.38-43.
- Thanawat Pongamg, **Jiraphon Srisertpol** and Vorapot Khomphis (2012) "Open-loop Identification of the Mathematical Model of the Reheating Furnace Walking Hearth Type in Manufacturing Process", 2012 International Conference on System Modeling and Optimization, Hong Kong, China, February 17-18, 2012, pp.24-30.
- Chalermpon Pewmaikam, **Jiraphon Srisertpol** and Chanyut Khajorntraidet (2012) "Torque Control with Fuzzy Logic Compensator for PMSM", 2012 International Conference on System Modeling and Optimization, Hong Kong, China, February 17-18, 2012, pp.31-37.
- Jakkra Nunthasukon, **Jiraphon Srisertpol** and Yuthaporn Kumchoo (2012) "Simulation Studied of the Estimated SI Engine Load Torque using Adaptive Observer-Compensator" SEATUC 2012 6th International Symposium, KMUTT, Thailand, March 6-7, 2012.
- Piyawat Kongsong, **Jiraphon Srisertpol** and Damrongsak Tongsoomporn (2013) "A study of Head-Disk Interaction in High Track Density Magnetic Recording System", The 5th International Data Storage Technology Conference, Sukol Hotel, Thailand, January 14-15, 2013.
- Anat Boonsawat and **Jiraphon Srisertpol** (2013) "Study in Head-Disk Contact Process with Readback Signal under Thermal Control on Variable Temperature", The 5th International Data Storage Technology Conference, Sukol Hotel, Thailand, January 14-15, 2013.
- Thanawat Pongamg, **Jiraphon Srisertpol** and Vorapot Khomphis (2013) "PI Controller Design for Temperature Control of Reheating Furnace Walking Hearth Type in Setting Up Process", The 4th International Conference on Material and Manufacturing Technology, Seoul, South Korea, May 11-12, 2013.
- Pewmaikam C., Numanoy N. and Srisertpol J. (2013) "PI Controller plus Adaptive Fuzzy Logic Compensator for Torque Controlled System of DC Motor" The 3rd International Conference on Engineering and Applied Science (2013 ICEAS), Osaka, Japan, November 7-9, 2013.

- Numanoy N., Srisertpol J. and Dolwichai T. (2013) "Vibration Suppression of the Shaft using Single-Side Support Four-pole Active Magnetic Bearing" The 3rd International Conference on Engineering and Applied Science (2013 ICEAS), Osaka, Japan, November 7-9, 2013.
- Photiseang K. and Srisertpol J. (2014) "Vibration Analysis and Damage Detection of the Bearing on HDD Tester" International Conference on Intelligent Systems, Data mining and Information Technology (ICIDIT2014), Bangkok, Thailand, April 21-22, 2014.
- Aunsiri T., Numanoy N., Hemsuwan W. and Srisertpol J. (2014) "Servo System using Pole-Placement with State Observer for Magnetic Levitation System" The 2014 International Conference on Advanced Mechanical and Industrial Engineering and Control Systems (MICS 2014), Zhangjiajie, China, May 28-31, 2014.
- Odngam S., Khaewnak N., Dolwichai T. and Srisertpol J. (2014) "A Comparative Study on Gasoline, LPG and Biogas Affecting the Dynamic Responses of SI Engine" The 2014 International Conference on Advanced Mechanical and Industrial Engineering and Control Systems (MICS 2014), Zhangjiajie, China, May 28-31, 2014.
- Yanisa Laoonguthai, Prasit Srinakorn and **Jiraphon Srisertpol** (2015) "Enhancing Biogas Production from Shrimp Pond Sediment with Additive" International Conference on Chemical and Biochemical Engineering (ICCB15), Paris, France, July 20-22, 2015.
- Phunhuntod J., Numanoy N. and Srisertpol J. (2015) "Sensorless Volume Estimation of the Blood Bag in Blood Donation Process using Adaptive Compensator with Observer" 2015 World Conference on Innovation, Engineering and Technology (IET 2015), Kyoto, Japan, September 8-10, 2015, pp.36-48.
- Charoensuk K., Numanoy N. and Srisertpol J. (2015) "Verifying objects inside packaging box on belt conveyor by weight estimator" 2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC2015), Chongqing, China, December 19-20, 2015., p.470-474.
- Prathan Chommuangpuk, Sorada Khaengkarn and **Jiraphon Srisertpol** (2016) "Design of High-Speed Automatic Visual Inspection Machine for Head Gimbal Assembly" SEATUC 2016 10th International Symposium, SIT, Japan, February 22-24, 2016.
- Nattawat Yachum, Sorada Khaengkarn and **Jiraphon Srisertpol** (2016) "The Development Control System of Vacuum Pressure in Vacuum Chamber" The 2nd International Conference on Engineering Science and Innovative Technology (ESIT 2016), Phuket, Thailand, April 21-23, 2016.
- Supachai Prawanta, Sorada Khaengkarn and **Jiraphon Srisertpol** (2016) "Motion Control of a 3-DOF Girder System using Eccentric Circular Cam" 2016 Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems(ACIRS2016), Tokyo, Japan, July 20-24, 2016.

4. National conference

- Chermotong Prattanaruk, **Jiraphon Srisertpol** (2004), "Synthesis Algorithm of Adaptive Dynamic Vibration Absorber to Suppress Beam Vibration", Proceedings of the 8th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering., pp 389-392.

- Autsadayut Rodpai, **Jiraphon Srisertpol**, N. P. Moshkin (2004) "Numerical Algorithm for Transfer Function Synthesize Using Experimental Frequency Response Data" , Proceedings of the 8th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering., pp 269-272.
- Chermtong Prattanaruk, **Jiraphon Srisertpol** (2006) "Stiffness Adjustment of Dual Mass Cantilever Absorber for Suppressing Beam Vibration", Proceedings of the 20th National Mechanical Engineering Conference, pp.621-628
- Autsadayut Rodpai, **Jiraphon Srisertpol** (2006) "Mathematical Model of Linear Viscoelastic Materials using System Identification Method", Proceedings of the 20th National Mechanical Engineering Conference, pp.753-760
- Eakarong Sukjit, Jakkrapong Klawkla, **Jiraphon Srisertpol** and Ekachai Juntasaro (2006), "Using FLUENT to Predict Heat Transfer in a Computer Case to Optimize the Number of Fans and the Locations to install", Proceedings of the 20th National Mechanical Engineering Conference, pp.607-612
- **Jiraphon Srisertpol**, Supot Phungpimai and Napoj Chinanawin (2008) "Analysis and PID Controller Design for Infrared Oven", Proceedings of the 22th National Mechanical Engineering Conference, pp.220-226
- **Jiraphon Srisertpol**, Peerayut Wangrakpaiboon and Sumetee Theesungnern (2008) "Vibration Study and Analysis of Vertical Cartesian Robot using The Finite Element Method", Proceedings of the 22th National Mechanical Engineering Conference, pp.420-423
- **Jiraphon Srisertpol**, Sumetee Theesungnern and Adisol Boonmag (2008) "Testing of a Miniature Shock Absorber Base on Operating Situation to Obtain Its Parameters", Proceedings of the Industrial Engineering Network Conference 2008, pp.921-926.
- **Jiraphon Srisertpol** and Somjai Soonthornsakul (2009) "Vibration Analysis of Transfer Module Effects to Head Gimbal Assembly(HGA) Base on Operating Situation", The Industrial Engineering Network Conference 2008, 21-22 October 2009, Khon Kaen, Thailand, pp1556-1561.
- **Jiraphon Srisertpol**, Peerayut Wangrakpaiboon and Sumetee Theesungnern (2009) "Vibration Study and Analysis of Test Chamber using Finite Element Method", Proceedings of the 23th National Mechanical Engineering Conference, 4-7 November 2009, Chiang Mai, Thailand.
- **Jiraphon Srisertpol**, Supot Phungpimai and Chanyut Khajorntraidet (2009)"Temperature Control of Infrared Oven Process using Model Reference Adaptive System", Proceedings of the 23th National Mechanical Engineering Conference, 4-7 November 2009, Chiang Mai, Thailand.
- Prasit Srinakorn, Aduvirod Kheawnak, Kontorn Chomniprasart and **Jiraphon Srisertpol** (2010)"Analysis of Biogas Production Process from Shrimp Culture Pond Sediment by Batch Method", in Proceedings of the 11th Thai Society of Agricultural Engineering Conference on "Innovation in Agricultural Engineering for Sufficiency Economy and Empowered Communities", 6-7 May 2010. Nakhonpathom, Thailand, pp.317-321.
- **Jiraphon Srisertpol** and Warong Pungpipat (2010) "Study and Analysis of Peeling Strength in Attachment Process for Flexible Damper" The Industrial Engineering Network Conference 2010, 13-15 October 2010, Ubon Ratchathani, Thailand

- **Jiraphon Srisertpol** and Palasorn Sommana (2010) "Vibration Analysis Equipment of HDD Actuator with Variable Temperature" The Industrial Engineering Network Conference 2010, 13-15 October 2010, Ubon Ratchathani, Thailand
- **Jiraphon Srisertpol**, Preecha Champathong and Paphakorn Soonanon (2010) "Verification Quality of Measuring System for Shearography Machine" The Industrial Engineering Network Conference 2010, 13-15 October 2010, Ubon Ratchathani, Thailand
- **Jiraphon Srisertpol** and Chalerm Boonchote (2010) "Development of Acoustic Resonance Measuring System of HDD Actuator by using LabVIEW[®]" The Industrial Engineering Network Conference 2010, 13-15 October 2010, Ubon Ratchathani, Thailand
- **Jiraphon Srisertpol**, Prarinya Tragrunwong and Vorapot Khomphis (2010) "Open-loop Identification for Reheating Furnace Walking Hearth Type in Heating Curve Up Process" The 24th National Mechanical Engineering Conference, 20-22 October 2010, Ubon Ratchathani, Thailand.
- Sirisak Rangklang, Paphakorn Soonanon and **Jiraphon Srisertpol** (2011) "Factors of Cover Coat Process of Electronic Flexible Printed Circuit(E-FPC) Based on Peeling Strength" The Industrial Engineering Network Conference 2011, 20-21 October 2011, Chonburi, Thailand. Pp.839-844.
- Sirisak Rangklang, Paphakorn Soonanon and **Jiraphon Srisertpol** (2011) "A Comparison of Cover Coat Methods for Electronic Flexible Printed Circuit (E-FEC) Based on Peeling Strength" The Industrial Engineering Network Conference 2011, 20-21 October 2011, Chonburi, Thailand. Pp.827-830.
- Jiraphon Srisertpol, Nitisak Numanauy, Withun Hemsuwan and Padej Paula-or (2012) "Unbalance Control of the Shaft with Active Magnetic Bearing by Adaptive PID Controller" The 26th National Mechanical Engineering Conference, 24-27 October 2012, Chiang Rai, Thailand.
- Chamap Saraporn, Chermotong Prattanaruk, **Jiraphon Srisertpol** and Teeka K. (2012) "Parameter Compensation and Noise Reduction of Low-Cost Gyroscope" The 26th National Mechanical Engineering Conference, 24-27 October 2012, Chiang Rai, Thailand.
- Yuthaporn Kumchoo, Teetat Donwichai, **Jiraphon Srisertpol** and Jakra Nunthasukon (2012) "Load Torque Estimation of SI engine using Adaptive Observer-Compensator" The 26th National Mechanical Engineering Conference, 24-27 October 2012, Chiang Rai, Thailand.
- Thanawat Pongamg, **Jiraphon Srisertpol** and Vorapot Khamphis (2012) "Mathematical Model between Fuel Flow rate and Temperature Zones of Reheating Furnace Walking Hearth Type in Manufacturing" The 26th National Mechanical Engineering Conference, 24-27 October 2012, Chiang Rai, Thailand.
- Winai Thumthong, **Jiraphon Srisertpol**, Suwatchai Krakeadpol and Saksan Chaikitti (2012) "Operational Deflection Shapes(ODS) of Stack Cooling" The 26th National Mechanical Engineering Conference, 24-27 October 2012, Chiang Rai, Thailand.
- Kralias Butbunchoo and **Jiraphon Srisertpol** (2013) "Study and Analysis Dynamic Response of Robot Arm in HDD Loading Process" ECTI-CARD 2013, May 8-10, 2013, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Napassadon Singhata and **Jiraphon Srisertpol** (2013) "Viscosity Estimation using DC Motor with Adaptive Torque Compensator" ECTI-CARD 2013, May 8-10, 2013, Nakhon Ratchasima, Thailand

- Nattapon Meedet, **Jiraphon Srisertpol** and Sarawut Sujitjorn (2013) "Lag-Lead Compensator Design for Exact Gain and Phase Margin" ECTI-CARD 2013, May 8-10, 2013, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Narong Srikaew, Vorapot Khomphis and **Jiraphon Srisertpol** (2014) "PI Control system Design in Melamine Container Production Process" in Proceedings of the 28th National Mechanical Engineering Conference, 15-17 October 2014, Khon Kaen, Thailand.
- Nopparut Kheawnak, Thanarat Aunsiri, Nitisak Numanauy and **Jiraphon Srisertpol** (2015) "Servo System Design using Pole-Placement with State Observer for Magnetic Levitation Ball" in Proceedings of the 29th National Mechanical Engineering Conference, 30 June -2 July 2015, Nakhon Ratchasima, Thailand, pp.773-778.
- Jaroonsak Phunkhntod, Nitisak Numanauy and **Jiraphon Srisertpol** (2015) "Volume Estimation of Blood Bag Using Load Torque Compensator of Blood Bag Shaking Machine " in Proceedings of the 29th National Mechanical Engineering Conference, 30 June -2 July 2015, Nakhon Ratchasima, Thailand, pp.815-822.
- Chatchawan Khemjeng, Jaroonsak Phunkhntod, Nitisak Numanauy and **Jiraphon Srisertpol** (2015) "Volume Estimation in Stir Container Using Load Torque Compensator of Magnetic Stirrer Machine" in Proceedings of the 29th National Mechanical Engineering Conference, 30 June -2 July 2015, Nakhon Ratchasima, Thailand, pp.831-837.
- Praya Khewpanrana and **Jiraphon Srisertpol** (2015) "Analysis and Aircraft Design for Prototype of Bicopter Tiltrotor Vertical Takeoff and Landing Unmanned Aerial Vehicle with 2 kilogram of Payload" in Proceedings of the 29th National Mechanical Engineering Conference, 30 June -2 July 2015, Nakhon Ratchasima, Thailand, pp.229-240.
- Winai Thumthong, Krissadawut Sirikhaew, Autsadayut Rodpai and **Jiraphon Srisertpol** (2015) "Structural Analysis using ODS Technique" in Proceedings of the 29th National Mechanical Engineering Conference, 30 June -2 July 2015, Nakhon Ratchasima, Thailand, pp.627-632.
- Thanakorn Boontan and **Jiraphon Srisertpol** (2015) "Load Torque Estimation Exerted on Joints of Robot Arm using Adaptive Compensation", The 8th National Conference on Technical Education, 26-27 November 2015, Bangkok, Thailand, pp.100-106.
- Wiroj Kaola-or and **Jiraphon Srisertpol** (2016) "The Control System of Gasoline Engine for 5 0 0 0 Watt Electrical Power Generator from Biogas with Supercharger", The 4th Academic Science and Technology Conference, 31 May 2016, Bangkok, Thailand.

Research Projects

1. Analysis and Control Vibration of Vertical Cartesian Robot (Government grant)
2. Improvement Temperature Controller of Infrared Oven Process (Government grant)
3. Develop Automation Manufacturing Line for HGST (Government- HGST grant)
4. Biogas Production from Shrimp Culture Pond Sediment By Anaerobic Digestion (Government grant)
5. Vibration Analysis of Testing Machine in Testing Process (Government grant)
6. Electrical generator- engine 20000 watt from Biogas (SUT grant)

5. Patents and Property Right

- Viscometer using Compensated Technique No.0901003287

Research interest: Mathematical Modeling, Adaptive System, System Analysis, Vibration Control

