

DRC-08

ออกแบบระบบเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ สำหรับลูกบอลลอยตัว Servo System Design using Pole-Placement with State Observer for Magnetic Levitation Ball

นพรุจ เขียวนาค^{1*}, ธนรัชต์ อุ่นศิริ², นิตติศักดิ์ หนูมาน้อย² และ จิระพล ศรีเสริญผล²

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม วิทยาเขตบึงพระ 43 ม. 6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี
รหัสไปรษณีย์ 20110

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา รหัสไปรษณีย์
30000

*ติดต่อ Email Address: b03me12@hotmail.com โทร 09-332-92145

บทคัดย่อ

ระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก ที่ใช้แรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ายกลูกบอลให้ลอยอยู่บนอากาศ เป็นระบบมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น และไม่มีเสถียรภาพในการทำงาน ปัจจุบันมีการนำระบบดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและขนส่งมวลชน เช่น ระบบเบร้งแม่เหล็กไฟฟ้า รถไฟฟ้าพลังงานแม่เหล็ก แม้กระทั่งการผลิตพลังงานทดแทนอย่างกังหันลมที่กำลังมีการคิดค้นพัฒนากังหันลมแนวตั้งที่มีการใช้งานแม่เหล็กลอยในระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้ดีขึ้น มีการศึกษาพัฒนาระบบควบคุมชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและสามารถควบคุมระบบดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวควบคุมที่เป็นที่นิยม คือ ตัวควบคุมแบบพีดี หรือตัวชดเชยชนิดเฟสนำหน้า แต่ตัวควบคุมดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการควบคุมต่ำ มีช่วงการทำงานที่แคบ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ พร้อมเพิ่มตัวอินทิเกรตหนึ่งตัวสำหรับระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก โดยประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบให้เป็นเชิงเส้น การออกแบบตัวควบคุมชนิดป้อนกลับเซอร์โว โดยใช้ค่าป้อนกลับที่ได้จากตัวสังเกตสถานะ ผลการจำลองสถานการณ์และการทดลองของระบบเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ มีการตอบสนองทางพลวัตที่ดีขึ้นจาก 6.67 % เป็น 1 % และมีระยะของการควบคุมลูกบอลเพิ่มขึ้นจากช่วง 15.4 – 17.3 มิลลิเมตร เป็น 15.2 – 18.0 มิลลิเมตร

คำหลัก: ลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก, การทำเชิงเส้นแบบจาโคเบียน, ออกแบบระบบเซอร์โว, ตัวสังเกต

Abstract

The Magnetic levitation system that uses force from an electromagnetic field to levitate a magnet ball. This system is a non - linear model and unstable system. At present, this method is utilized in a variety of ways with beneficial outcomes both in education and industry such as magnetic bearing maglev - train and the wind turbine. Research and advancements have been made with regards to various control systems. The most commonly utilized or popular method is PD - controller or Lead compensator but the performance is not good enough. This research presents Servo system using pole-placement with state observer and increase the integration of the system with magnetic levitation ball control system. In this research approximate mathematical model of magnetic levitation, linearization, the design of the state feedback servo system control with observer. The simulation and experimental results indicate that control system designed is more beneficial change from 6.67 % to 1 % and has the wider operating range from 15.4 – 17.3 mm to 15.2 – 18.0 mm.

Keywords: Magnetic levitation ball, Jacobian linearization, Servo system design, Observer

DRC-08

1. บทนำ

ในปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีในภาคอุตสาหกรรมและการคมนาคมต่าง ๆ มีการนำระบบแม่เหล็กลอยมาประยุกต์ใช้งานมากขึ้น เช่น รถไฟฟ้าความเร็วสูงขับเคลื่อนด้วยการผลักดันด้วยสนามแม่เหล็ก ระบบเบรคแม่เหล็ก กังหันผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมซึ่งมีตัวรองรับเป็นระบบแม่เหล็กลอย เป็นต้น โดยคณะผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญของระบบดังกล่าวที่จะเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรมและการคมนาคมต่าง ๆ ในอนาคต และได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบระบบควบคุมสำหรับระบบลูกบอลแม่เหล็กทรงกลมลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้หลักของ Magnetic Co - Energy Function ในการสร้างแบบจำลอง [1, 2] ซึ่งแรงของแม่เหล็กของระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Levitation) โดยใช้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux Density) ในช่องว่างระหว่างแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นผลมาจากค่าความเหนี่ยวนำของระบบนั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแกนของขดลวดและลูกบอลแม่เหล็ก [3] นำเสนอการ Optimized Core Parameter เพื่อให้ทราบค่าความเหนี่ยวนำที่ระยะต่าง ๆ การทำให้เป็นเชิงเส้น ณ จุดสมดุลด้วย Taylor's Series เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น [4] และไม่มีเสถียรภาพในการควบคุม เมื่อวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบตั้งแต่สมการตั้งต้น [5] ได้นำเสนอเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพโดยทำ Linearization ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงการสร้าง Algorithm สำหรับระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีสัญญาณอินพุตเป็นตำแหน่งของวัตถุที่ลอยอยู่ และแรงของแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดูดวัตถุ [6] และใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับ Offset Error Reduction ในการทำให้ระบบเป็นเชิงเส้นในช่วงปฏิบัติงาน [7]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ในการควบคุมระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก เป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ และไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากแรงแม่เหล็ก ซึ่งระบบที่มีลักษณะเป็น Type 0 มาใช้ควบคุมระบบดังกล่าวเพื่อให้ลูกบอลสามารถลอยบนอากาศ และมีผลการตอบสนองตามที่ต้องการ ซึ่งเป็นระบบที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางระหว่างลูกบอลถึงแกนแม่เหล็กกับกระแสที่ป้อนให้แก่ขดลวด เพื่อสร้างแรงแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น จึงมี

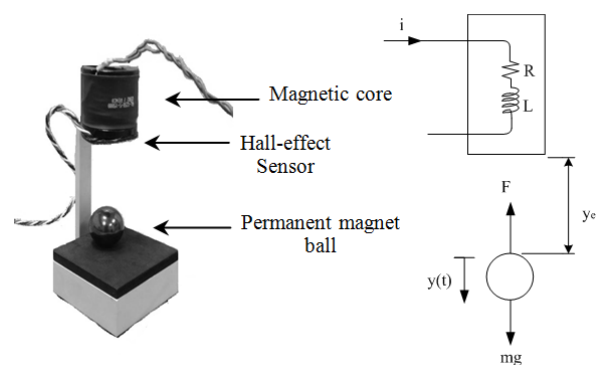
ตัวควบคุมพีดีเป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้สำหรับระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กเพื่อให้สามารถที่จะควบคุมผลการตอบสนองได้ แต่มีความผิดพลาดที่สภาวะสมดุล และมีช่วงการควบคุมที่แคบ การออกแบบตัวควบคุมรูปแบบอื่น ๆ ที่ได้ศึกษากันเช่น Sliding Mode, PD + Lead Controller [8], H_∞ Controller [9], Pole - Placement Method [10] และ State Feedback Control [11] เป็นต้น บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบเบรคแม่เหล็กสำหรับควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแม่เหล็กโดยประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้นในช่วงการทำงานรอบระยะปฏิบัติงานของลูกบอลแม่เหล็ก และใช้วิธีการวางตำแหน่งโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ พร้อมเพิ่มตัวอินทิเกรตในฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิดของระบบ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการควบคุมดีขึ้น

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการการเคลื่อนที่ของลูกบอลแม่เหล็กลอยตัวสามารถหาได้จากกฎของนิวตัน ผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อลูกบอลดังแสดงในรูปที่ 1 จะได้

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -F(u, y) + mg \quad (1)$$

เมื่อ y คือระยะห่างระหว่างลูกบอลแม่เหล็กถาวรกับขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า m คือน้ำหนักของลูกบอลแม่เหล็กถาวร และ g คือค่าแรงโน้มถ่วงของโลก และแรงของสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อลูกบอลเพื่อให้ลูกบอลแม่เหล็กลอยตัว ประมาณค่าได้จากสมการ $F(u, y) = ki/y^3$ เมื่อ k คือค่าคงที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสมการทำให้แรงที่ลูกบอลเกิดสมดุล



รูปที่ 1. แผนภาพอิสระของลูกบอลแม่เหล็กลอยตัว

DRC-08

กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ กล่าวว่าผลรวมทางพีชคณิตของแรงดันรอบวงปิดเท่ากับศูนย์ จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าของขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

เมื่อ R คือค่าความต้านทาน L คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและ i คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวด

สมการแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม Hall effect sensor ที่เกิดจากการลอยตัวของลูกบอลสามารถประมาณดังนี้

$$v = c_0 + c_1 \frac{1}{y^2} + c_2 i \quad (3)$$

เมื่อ c_0, c_1 และ c_2 เป็นค่าคงที่ที่สัมพันธ์กันกับสัญญาณที่วัดได้จาก Hall effect sensor กับระยะลูกบอลและกระแสไฟฟ้า

จากสมการดังกล่าวข้างต้น สามารถจัดในรูปสมการสเตตโดยที่

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [y \ \dot{y} \ i]^T \quad (4)$$

และ

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = g - k \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{x_1^3} x_3, \dot{x}_3 = -\frac{R}{L} x_3 + \frac{1}{L} u \quad (5)$$

พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลูกบอลแม่เหล็กลอยตัวมีลักษณะของแรงแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตามสามารถพิจารณาระบบให้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นในช่วงการทำงานได้ โดยผู้วิจัยได้นำทฤษฎีการทำให้เป็นเชิงเส้นแบบจาโคเบียน (Jacobian linearization) โดยกำหนดจุดสมดุลที่ $m\ddot{y} = 0$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \dot{x}_l &= Ax_l + Bu_l \\ v &= Cx_l + v_e \end{aligned} \quad (6)$$

โดยที่

$$x_l = [x_1 - x_{1e} \ x_2 - x_{2e} \ x_3 - x_{3e}]^T, u_l = u - u_e$$

$$v_l = v - v_e$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{3g(gmR)^{\frac{1}{3}}}{(ku_e)^{\frac{1}{3}}} & 0 & -\frac{gR}{u_e} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

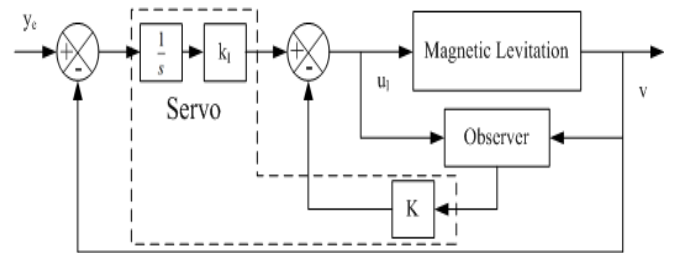
$$C = \begin{bmatrix} -\frac{2c_1 gmR}{ku_e} & 0 & c_2 \end{bmatrix} \text{ และที่จุดสมดุล จะได้}$$

$$x_{1e} = \left(\frac{ku_e}{gmR} \right)^{\frac{1}{3}}, x_{2e} = 0, x_{3e} = \frac{u_e}{R}$$

เมื่อ u_e คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ลูกบอลแม่เหล็กลอยและ v_e คือสัญญาณวัดระยะของ Hall effect sensor ณ ตำแหน่งสมดุล ที่ระยะสมดุล x_{1e}

3. ออกแบบระบบเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการป้อนกลับตัวแปรสเตต พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ค่าตัวแปรของระบบไม่ขึ้นกับเวลา ที่ต้องการจะใช้ตัวสังเกตสถานะในการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบและทำการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพโดยใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยระบบเซอร์โวที่มีการเพิ่มตัวอินทิเกรตเตอร์ในระบบหนึ่งตัว เพื่อให้ระบบมีค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัวลดลง และออกแบบบนตัวสังเกต ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2. แผนภาพการทำงานของระบบเซอร์โว

การออกแบบตัวสังเกตระบบแบบอันดับเต็มสำหรับระบบเซอร์โวนั้น สามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu_l + K_{ob}(v_l - \hat{v}) \\ \hat{v} &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (7)$$

เมื่อ K_{ob} คืออัตราขยายของตัวสังเกต, $\hat{x}$ คือตัวแปร สเตตของตัวสังเกต, $\hat{v}$ คือเอาต์พุตของตัวสังเกต

การออกแบบระบบเซอร์โวที่มีการวางตำแหน่งโพลและตัวสังเกต จะได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} u_l &= -K\hat{x} + k_i \xi \\ \dot{\xi} &= r - v_l = r - Cx_l \end{aligned} \quad (8)$$

DRC-08

เมื่อ ξ คือสัญญาณที่ออกมาจากอินทิเกรเตอร์, r คือสัญญาณอินพุตอ้างอิง และเวกเตอร์ค่าความผิดพลาดของระบบคือ

$$\begin{aligned} e(t) &= [x_l(t) - x_l(\infty) \quad \xi(t) - \xi(\infty)]^T \\ \dot{e} &= \hat{A}e + \hat{B}u_{le} \end{aligned} \quad (9)$$

เมื่อ $\hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}$, $\hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$, $u_{le} = -\hat{K}e$,
 $\hat{K} = [K \quad \vdots \quad -k_l]$.

4. อุปกรณ์การทดลอง

ในการงานวิจัยนี้ได้เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink บนคอมพิวเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อสัญญาณการควบคุมระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์สร้างสนามแม่เหล็กด้วย RAPCON board ซึ่งเชื่อมโยงระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ทดลองผ่านสาย Serial crossover cable ไปยัง PCI Serial card ของคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในส่วน Real – time windows target เป็นบอร์ดที่สามารถควบคุมแบบ Real time การทดลองนี้ได้ใช้เครื่องต้นแบบของบริษัท Zeltom education and industrial control systems โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. อุปกรณ์สร้างสนามแม่เหล็กพร้อมแท่นวาง และลูกบอลแม่เหล็กถาวร น้ำหนัก 41.3 กรัม และเซนเซอร์วัดการกระจัด (Hall Effect Sensor) ดังแสดงในรูปที่ 1
2. บอร์ดควบคุม RAPCON board และ PCI Serial Card ดังแสดงในรูปที่ 3
3. คอมพิวเตอร์พร้อมระบบปฏิบัติการ Windows 7 32 Bit และโปรแกรม MATLAB v2009a



รูปที่ 3 บอร์ด RAPCON และ PCI Serial Card

5. ผลการทดลองของระบบเซอร์โวควบคุมลูกบอลลอยตัว

เนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายถึงกระบวนการและวิธีการกำหนดขอบเขตการทำงานเพื่อใช้ในการควบคุมลูกบอลจากตำแหน่งสมดุลให้เป็นไปตามต้องการ โดยแสดงการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง รวมถึงการเขียนอัลกอริทึมเพื่อใช้ในการควบคุมและอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับชุดทดลอง รวมถึงแสดงผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองของตัวควบคุมพิตกับตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองด้วยการเขียนอัลกอริทึมของตัวควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink บนคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการเชื่อมต่อ RAPCON Board และในการออกแบบตัวควบคุมได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก

Description	Parameters	Value(unit)
Mass of Ball	m	41.30x10 ⁻³ kg
Resistance	R	1.71 Ω
Inductive	L	15.10x10 ⁻³ H
Initial current	X _{3e}	1.05 A
Electromagnetic constant	k	3.10x10 ⁶ Kg m ⁵ /s ² /A

โดยการนำค่าต่างๆในตารางที่ 1 ลงในสมการที่ 5 จะได้

$$\dot{x}_l = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1.675 \times 10^5 & 1.471 \times 10^3 & -113.24 \end{bmatrix} x_l + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_l \quad (10)$$

$$v = [3.5667 \times 10^4 \quad 0 \quad 20.5298] x_l + v_e$$

พิจารณาเสถียรภาพของระบบ โดยวิธีการแก้ปัญหาค่าเฉพาะ (Eigenvalue problem) ซึ่งจะได้ค่าโพลคือ -113.245 -31.3215 และ 31.3215 พบว่ามีโพลหนึ่งตัวอยู่ด้านขวาของระนาบ แสดงว่าระบบดังกล่าวไม่มีเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาความสามารถในการสังเกต (observability) ได้ rank เท่ากับ 3 แสดงว่าระบบมีคุณสมบัติการสังเกต

DRC-08

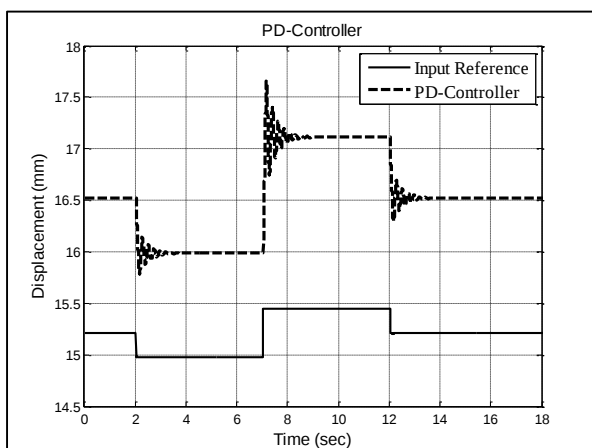
สำหรับการออกแบบตัวสังเกตโดยกำหนดให้ตำแหน่งโพลของตัวสังเกตอยู่ที่ $s_{1,2} = -210 \pm 42.8486i$ และ $s_3 = -200$ ซึ่งจะได้เมทริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกตดังนี้

$$K_e = [0.0068 \quad 1.3448 \quad 13.7985]^T$$

เนื่องจากระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นระบบที่มีอันดับ 3 และเมื่อทำการออกแบบระบบเซอร์โว จะส่งผลให้อันดับของระบบเพิ่มเป็น 4 ($\text{rank}(\beta) = 4$) และมีเมทริกซ์อัตราขยายของระบบเซอร์โวเป็น $\hat{K} = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad -k_f]$ กำหนดให้ตำแหน่งโพลของระบบเซอร์โวคือ $s_{1,2} = -42 \pm 42.8486i$ และ $s_{3,4} = -15$ ดังนั้นสามารถหาเมทริกซ์อัตราขยายของระบบเซอร์โว ($\hat{K}$) ได้จากหลักการของแอดเคอร์มินด์ (Ackermann's Formula) เมทริกซ์อัตราขยายของระบบควบคุมจะได้

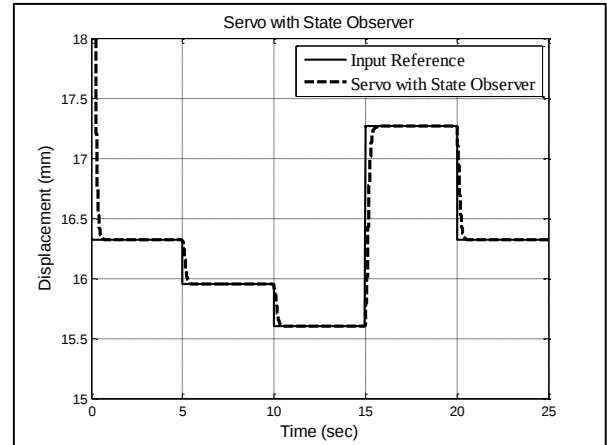
$$\hat{K} = [3.0385 \times 10^5 \quad 7.7363 \times 10^3 \quad 4.395 \quad 24.7209]$$

การทดสอบการตอบสนองทางพลวัตของระบบที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันได ได้ทดลองเปรียบเทียบการตอบสนองทางพลวัตต่อการควบคุมการลอยตัวของลูกบอลลอยด้วยตัวควบคุมพีดีกับระบบเซอร์โว โดยรูปที่ 4 แสดงผลการทดลองของตัวควบคุมพีดี จะพบว่าการตอบสนองมีค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัว 6.67 % และสามารถควบคุมลูกบอลลอยในช่วง 15.4 – 17.3 มิลลิเมตร



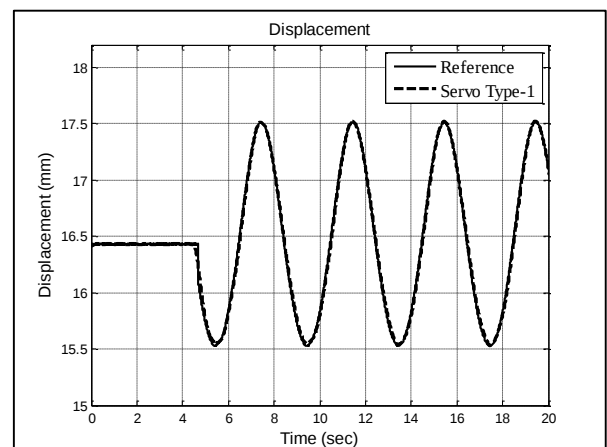
รูปที่ 4 แสดงผลการตอบสนองการควบคุมลูกบอลลอยด้วยตัวควบคุมพีดี

รูปที่ 5 แสดงผลการทดลองของระบบเซอร์โว มีค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัวน้อยลงอยู่ที่ 1 % และสามารถควบคุมลูกบอลลอยในช่วง 15.2 – 18.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 5. แสดงผลการตอบสนองการควบคุมลูกบอลลอยด้วยระบบเซอร์โว

การทดสอบการตอบสนองทางพลวัตของระบบที่มีต่ออินพุตที่มีลักษณะเป็นแบบฮาร์โมนิกโดยใช้สัญญาณอินพุตแบบ Sine Wave ที่มีแอมพลิจูดขนาด 1 มิลลิเมตร และมีความถี่ 1.6 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมเซอร์โว ผลการตอบสนองทางพลวัตที่เกิดขึ้นเป็นไปตามอินพุต ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6. แสดงผลการตอบสนองทางพลวัตต่อสัญญาณอินพุตแบบฮาร์โมนิกด้วยตัวระบบเซอร์โว

DRC-08

5. สรุป

การควบคุมลูกบอลแม่เหล็กให้ลอยตัวนั้นเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และไม่มีเสถียรภาพ บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการทำให้ระบบเป็นเชิงเส้นแบบจาโคเบียน และออกแบบระบบเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ โดยเพิ่มอินทิเกรต 1 ตัว ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่มีลักษณะการทำงานด้วยการติดตามสัญญาณ อินพุตอ้างอิงที่มีประสิทธิภาพ จึงเป็นตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเพื่อใช้ควบคุมลูกบอลแม่เหล็กลอยตัวให้มีผลการตอบสนองเป็นไปตามต้องการ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีตัวควบคุมแบบพีดี พบว่าระบบเซอร์โวมีผลการตอบสนองทางพลวัตที่ดีขึ้น และค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวน้อยลง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Jayawant, B. V. and Rea, D. P. (1968). New electromagnetic suspension and its stabilization. Proc. IEE, Vol. 115, No. 4, April 1968.

[2] Shu'aibu, D. S., Syed-Yusof, S., N.Fisal and Adamu, S. (2010). Low Complex System For Levitating Ferromagnetic Materials. International Journal Of Engineering Science And Technology, Vol. 2(6), pp.1844-1859.

[3] Hurley, W. G., and Wölflle, W. H. (1997). Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension System. IEEE Transactions on Education, May, vol.40 (2), pp.124-130.

[4] Wong, T. H. (1986). Design of a Magnetic Levitation Control System. IEEE Transactions on Education, December; vol.E-29 (4).

[5] Munaro, C. J., Filho, M.R., Borges, R.M., de Silva Munareto, S., and da Costa, W. T. (2002). Modeling and Observer-Based Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System. Proceedings of the International Conference on Control Applications, September, vol.1, pp.162-167.

[6] Yang, J. H., Lee, Y. S., and Kwon, O. K. (2010). Development of Magnetic Force Modeling Equipment for Magnetic Levitation System. The 2010 International

Conference on Control, Automation and Systems, October 27-30, pp.29-33.

[7] Yasser, M., Tanaka, H., and Mizumoto, M. (2010). A Method of Simple Adaptive Control Using Neural Networks with Offset Error Reduction for An SISO Magnetic Levitation System. The 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), July 17-19, pp.191-196.

[8] Cho, D., Kato, Y., and Spilman, D. (1993). Sliding Mode and Classical Controllers in Magnetic Levitation Systems. IEEE Conference, February, vol.13, pp.42-48.

[9] Mohamed, A., Vestgaard, B., and Busch-Vishniac, I. (1995). Real-Time Implementation of a Robust H_{∞} Controller for a 2-DOF Magnetic Micro-Levitation Positioner. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, December 9, vol.117 (4), pp.637-640.

[10] Suster, P., and Jadlovská, A. (2012). Modeling and Control Design of Magnetic Levitation System. The 10th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics(SAMI), January, pp.295-299.

[11] Lee, T. E., Su, J. P., and Yu, K. W. (2007). Implementation of the State Feedback Control Scheme for a Magnetic Levitation System. The 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, May 23-25, pp.548-553.