

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การออกแบบตัวควบคุมปีกผีเสื้ออิเล็กทรอนิกส์ด้วยการย้อนกลับของตัวอินทิเกรต

Design of controllers for an electronics throttle valve based on integrator backstepping

อาทิตย์ แสงงาม^{1*}, ปิโยรส จิระวัฒนา², ธนา ราษฎร์ภักดี³

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร 47000

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

³ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

* E-mail: arthitsangngam@gmail.com, โทรศัพท์: 042 725 033, โทรสาร: 042 725 034

บทคัดย่อ

ระบบปีกผีเสื้อเป็นระบบที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศผสมกับเชื้อเพลิงเพื่อเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ ซึ่งประกอบด้วยเซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนปีกผีเสื้อเพื่อปรับเปลี่ยนมุมให้สอดคล้องกับความเร็วรอบและแรงบิดของเครื่องยนต์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบระบบควบคุมสำหรับปีกผีเสื้ออิเล็กทรอนิกส์ ตัวควบคุมออกแบบด้วยพื้นฐานของวิธีการย้อนกลับของตัวอินทิเกรต ผู้วิจัยได้จำลองระบบเพื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมที่เสนอ ติดตั้งและทดสอบการทำงานของระบบควบคุมกับเครื่องยนต์เพื่อรับประกันว่าตัวควบคุมสามารถใช้งานได้จริง จากผลการศึกษาพบว่า การจำลองควบคุมระบบด้วยวิธีที่เสนอแสดงถึงความสามารถในการควบคุมปีกผีเสื้อโดยวิธีการย้อนกลับของตัวอินทิเกรตสามารถนำมาใช้ออกแบบระบบควบคุมหากทราบพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ทั้งหมด การทดลองควบคุมปีกผีเสื้อไม่สามารถทราบพารามิเตอร์ทั้งหมด อีกทั้งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยเหตุนี้จึงได้นำวิธีการควบคุมแบบสลับมาใช้ จากการทดลองพบว่า ผลตอบสนองที่ได้มีค่าติดตามค่าเป้าหมายตามที่ต้องการ แต่ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการประมาณค่าพารามิเตอร์อาจมีค่ามากเกินไป ระบบจึงมีการแกว่ง วิธีที่จะช่วยแก้ปัญหาได้ คือใช้วิธีการประมาณค่าความไม่แน่นอนเพื่อให้ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากขึ้น

คำหลัก: การย้อนกลับของตัวอินทิเกรต, ปีกผีเสื้ออิเล็กทรอนิกส์, เซอร์โวมอเตอร์

Abstract

An electronic throttle system is a DC motor which positions the throttle plate, which is used in combustion engine for adjusting the air-fuel-ratio. This research is proposed to design an electronic throttle valve controller with integrator backstepping method. The simulation result shows the effectiveness of the control. Integrator backstepping method assume that the parameters are certain and known. But in practical system, the parameters are unknown or change. So, a robust control with switching control is incorporated to achieve an asymptotic tracking control. The experimental result shows that with the same desired trajectory for simulation and experimental, the response of the experimental is

chattering around the desired trajectory. Therefore, a robust control with uncertainty estimation will be eliminated this problem.

Keywords: Integrator backstepping, Electronics throttle valve, Servo motor

1. บทนำ

ปัจจุบันรถยนต์บางรุ่นมีการนำเทคโนโลยีที่เรียกว่า Drive-By-Wire มาใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ ทำให้การตอบสนองของเครื่องยนต์มีความรวดเร็วและแม่นยำ ส่งผลให้มีการประหยัดน้ำมันมากขึ้น ระบบ Drive-By-Wire มีการแทนที่ชิ้นส่วนทางกลด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว สามารถทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ การทำงานของระบบ Drive-By-Wire อาศัยการเปลี่ยนตำแหน่งของคันเร่งมาใช้เพื่อป้องกันอันตรายการเปลี่ยนแปลงกำลัง Supervisory Control จะทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์และระบบส่งกำลังเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูงที่สุด การควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์เปลี่ยนจากการควบคุมปีกผีเสื้อ (Throttle Valve) ด้วยเคเบิลเป็นการควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากระบบปีกผีเสื้อเป็นระบบการควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิงเพื่อเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ ถ้าอัตราส่วนเชื้อเพลิงอากาศมีความเหมาะสม จะส่งผลโดยตรงต่อเครื่องยนต์ นั่นคือเครื่องยนต์สามารถผลิตกำลังได้มากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดเจนในรูปของความเร็วและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่น้อยลง

อย่างไรก็ตามแบบจำลองพลวัต (Dynamic Model) ของวาล์วปีกผีเสื้อมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ทำให้มีการควบคุมระบบด้วยวิธีควบคุมหลายวิธี เช่น การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด (Sliding Mode Control) [2,4,6] เป็นวิธีหนึ่งซึ่งมีนักวิจัยให้ความสนใจและมีการพัฒนาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีควบคุมที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์หรือมีการรบกวนจากภายนอก (External Disturbance) ซึ่งอาศัยเพียงข้อมูลจากขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ ทำให้

สามารถประกันความคงทน (Robustness) ได้ ซึ่งสัญญาณควบคุมของการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดแยกได้เป็นสองส่วน ส่วนของสัญญาณต่อเนื่องสำหรับควบคุมเมื่อสถานะของระบบอยู่บนพื้นผิวสไลบ (Sliding Surface) และอีกส่วนเป็นสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องสำหรับควบคุมเมื่อสถานะของระบบไม่อยู่บนพื้นผิวสไลบ แต่มีข้อเสียคือการควบคุมดังกล่าวทำให้เกิดแชทเทอริง (Chattering) จึงมีการพัฒนาเพิ่ม และมีการศึกษาความหนาของชั้นขอบเขต (Boundary Layer) โดยใช้ Boundary Layer Integral Sliding Mode Control [1] เพื่อลดปัญหานั้น การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมของดีซีเซอร์โวมอเตอร์โดยการประยุกต์เทคนิคการเรียนรู้และชดเชยความไม่แน่นอนร่วมกับวิธี boundary layer technique และ saturation function พบว่าการควบคุมทำให้ระบบเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9]

งานวิจัยนี้เสนอการควบคุมด้วยวิธีการย้อนกลับของตัวอินทิเกรตสำหรับควบคุมปีกผีเสื้ออิเล็กทรอนิกส์ทำงานด้วยเซอร์โวมอเตอร์ และประยุกต์ใช้การควบคุมแบบสไลบเพื่อตรวจสอบการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ และหาแนวทางปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. แบบจำลองปีกผีเสื้ออิเล็กทรอนิกส์

วาล์วปีกผีเสื้ออิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยมอเตอร์เฟืองทด แผ่นเอียงซึ่งมีสปริงดันกลับ และตำแหน่งเซนเซอร์ ซึ่งประกอบกันเป็นระบบปีกผีเสื้ออิเล็กทรอนิกส์ [7] สัญญาณควบคุมที่ส่งให้กับมอเตอร์คือ ความต่างศักย์ของขดลวดอาเมเจอร์ (Voltage armature) โดยกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาเมเจอร์จะสร้างแรงบิดให้กับเฟืองทดซึ่งจะส่งถ่ายแรงบิดสู่แผ่นเอียงของปีกผีเสื้อ แผ่นเอียงจะหยุดเมื่อแรงบิดของมอเตอร์มีค่าสมดุลกับค่าสปริงดันกลับ ระบบปีกผีเสื้ออิเล็กทรอนิกส์ [8] แสดงดังนี้

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = -\frac{K_s}{J}\theta - \frac{C_s}{J}\omega - \frac{K'_d}{J}\omega - \frac{K_f}{J}\text{sgn}(\omega) + \frac{K_T}{J} \frac{V_{Bat}}{R_a + R_{Bat}} u \quad (1)$$

θ คือมุมปีกผีเสื้อ, ω คือความเร็วเชิงมุมปีกผีเสื้อ, J คือความเฉื่อยของระบบ, K_s คือค่าคงที่สปริง, C_s คือค่าคงที่แรงบิดสปริง, K'_d คือค่าคงที่แรงเสียดทานสมมูล, K_f คือค่าคงที่เสียดทานกลลอมบี้, K_T คือค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์, V_{Bat} คือแรงดันขณะไม่มีภาระ, R_a คือความต้านทานอาเมเจอร์, R_{Bat} คือความต้านทานภายใน, u คือสัญญาณควบคุม

ผลการตอบสนองการควบคุมคือ θ และสัญญาณควบคุมคือ u สามารถเขียนสมการพลศาสตร์ของระบบได้ดังนี้

$$\ddot{\theta} = -\frac{K_s}{J}\theta - \frac{C_s}{J}\dot{\theta} - \frac{K'_d}{J}\dot{\theta} - \frac{K_f}{J}\text{sgn}(\dot{\theta}) + \frac{K_T}{J} \frac{V_{Bat}}{R_a + R_{Bat}} u \quad (2)$$

เขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\ddot{\theta} = f(\theta, \dot{\theta}) + bu + d(t) \quad (3)$$

$$y = \theta$$

f ฟังก์ชันไม่รู้ค่า, b ตัวแปรที่ไม่รู้ค่าและกำหนดให้เป็นค่าคงที่, d สัญญาณรบกวน

3. การควบคุมแบบการย้อนกลับของตัวอินทิเกรต

การควบคุมชนิดกระทำย้อนกลับ (Backstepping Control) เป็นอีกวิธีที่พัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้สัญญาณควบคุมเสมือน (Virtual Control) ในการทำให้ระบบที่มีหลายดีกรีไถ่ลง จากนั้นสัญญาณควบคุมขั้นสุดท้ายจะถูกสร้างมาจากสมการไลปูนอฟ เพื่อบังคับระบบให้เป็นไปตามสมการเสถียรภาพ (Stability) ของไลปูนอฟ [5] การย้อนกลับของตัวอินทิเกรต (Integrator backstepping) เป็นวิธีการในการออกแบบระบบควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีความสัมพันธ์กันเป็นลำดับชั้น โดยจะมีตัวแปรควบคุมเสมือน (Virtual Control Input) เป็นตัวเชื่อมความสัมพันธ์ในแต่ละชั้น และมีฟังก์ชันควบคุมของไลปูนอฟ (Control Lyapunov Function) เป็นตัวแสดง

ถึงเสถียรภาพของระบบควบคุม กำหนดสมการระบบคือ

$$\dot{x}_1 = f(x_1) + g(x_1)x_2 \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = u \quad (5)$$

พิจารณาว่า x_2 เป็นกฎการควบคุมเสมือน (Virtual control law) ของสมการ (4) และกฎการควบคุมที่ต้องการ (desired virtual control law), $(\alpha_1(x_1))$ จะทำให้สมการ (4) มีเสถียรภาพ ซึ่งผลต่างระหว่างกฎการควบคุมเสมือนกับกฎการควบคุมที่ต้องการ (z) เป็นดังนี้

$$z = x_2 - \alpha_1(x_1) \quad (6)$$

อนุพันธ์เทียบกับเวลา (Time derivative) ของผลต่างระหว่างกฎการควบคุมเสมือนกับกฎการควบคุมที่ต้องการจะได้

$$\dot{z} = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1(x_1) \quad (7)$$

$$\therefore \dot{z} = u - \frac{\partial \alpha_1(x_1)}{\partial x_1} \cdot \dot{x}_1 \quad (8)$$

จากสมการ (6) ได้

$$x_2 = z + \alpha_1(x_1) \quad (9)$$

แทนสมการที่ (9) ในสมการ (4) ได้

$$\dot{x}_1 = f(x_1) + g(x_1)(\alpha_1(x_1) + z) \quad (10)$$

การหากฎการควบคุมที่ต้องการ จะใช้ฟังก์ชันไลปูนอฟ ($V_1(x_1)$)

$$V_1(x_1) = \frac{1}{2} x_1^2 \quad (11)$$

อนุพันธ์เทียบกับเวลาของฟังก์ชันควบคุมของไลปูนอฟ

$$\dot{V}_1 = x_1 \dot{x}_1 \quad (12)$$

โดยที่อนุพันธ์เทียบกับเวลาของฟังก์ชันควบคุมของไลปูนอฟจะต้องมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ($\dot{V}_1 < 0$) ระบบจึงจะมีเสถียรภาพ ดังนั้น เราจะต้องหากฎการควบคุมที่ต้องการ ที่ทำให้สมการ (12) มีค่าน้อยกว่าศูนย์

การพิจารณาจะเลือกฟังก์ชันไลปูนอฟดังนี้

$$V_2(x_1, z) = V_1(x_1) + \frac{1}{2} z^2 \quad (13)$$

พิจารณาอนุพันธ์เทียบกับเวลาของ $V_2(x_1, z)$

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_2(x_1, z) &= x_1 \dot{x}_1 + z \dot{z} \\
 &= x_1 [f(x_1) + g(x_1)(\alpha_1(x_1) + z)] \\
 &\quad + z \left[u - \frac{\partial \alpha_1(x_1)}{\partial x_1} (f(x_1) + g(x_1)(\alpha_1(x_1) + z)) \right] \\
 &= x_1 [f(x_1) + g(x_1)(\alpha_1(x_1))] \\
 &\quad + z \left[x_1 g(x_1) + u - \frac{\partial \alpha_1(x_1)}{\partial x_1} (f(x_1) + g(x_1)(\alpha_1(x_1) + z)) \right]
 \end{aligned} \quad (14)$$

ในทำนองเดียวกัน $\dot{V}_2 < 0$ ระบบจึงจะเสถียรภาพ เราจึงต้องหา u ที่ทำให้สมการ (14) มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 u &= -cz + \frac{\partial \alpha_1(x_1)}{\partial x_1} [f(x_1) + g(x_1)(\alpha_1(x_1) + z)] \\
 &\quad - x_1 g(x_1) \quad ; c > 0
 \end{aligned} \quad (15)$$

แทนค่าสมการ (15) ลงใน (5) จะสามารถหาค่า x_2 ได้ จากนั้นนำไปแทนค่าในสมการ (4) จะได้ค่า x_1 ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการ

4. เทคนิคการควบคุมแบบสลับ

จากวิธีการย้อนกลับของตัวอินทิเกรต จะเห็นว่าระบบจะมีเสถียรภาพถ้าอนุพันธ์เทียบเวลาของฟังก์ชันควบคุมของไลปุนอฟมีค่าน้อยกว่าศูนย์ จากสมการ (12) จะเห็นได้ว่าอนุพันธ์เทียบเวลาของฟังก์ชันควบคุมของไลปุนอฟจะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ถ้า x_1 และ $\dot{x}_1$ มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกัน นั่นคือ ถ้า x_1 มีค่าเป็นบวก $\dot{x}_1$ จะต้องมีค่าเป็นลบ

จากสมการ (10) เพื่อความง่ายในการพิจารณา เราจะกำหนดให้ $g(x_1) = 1$ และ $z = 0$ นั่นคือ

$$\dot{x}_1 = f(x_1) + \alpha_1(x_1) \quad (16)$$

กำหนดให้ $\alpha_1 = -k \operatorname{sgn}(x_1)$

$$\text{โดยที่ } \operatorname{sgn}(x_1) = \begin{cases} 1 & ; x_1 > 0 \\ -1 & ; x_1 < 0 \end{cases}$$

ซึ่ง k จะต้องมีความมากกว่า $f(x_1)$ นั้นหมายความว่าไม่จำเป็นต้องรู้ค่าที่แน่นอนของ $f(x_1)$ เพียงแต่รู้ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ (Maximum possible value) ก็สามารถที่จะทำให้ $\dot{V}_1 < 0$ ได้

ในทางปฏิบัติด้วยข้อจำกัดในเรื่องของอุปกรณ์การตรวจวัด ไม่สามารถทราบค่าทั้งหมดได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีควบคุมแบบสลับ ซึ่งวิธีนี้จะพยายามปรับ

ค่าผลตอบสนองที่ได้ออกมาจากระบบ (Output) ให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ คือ ถ้าค่าผลตอบสนองที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าเป้าหมาย ระบบจะบังคับให้ผลตอบสนองเพิ่มขึ้น แต่ถ้าค่าผลตอบสนองที่ได้มีค่ามากกว่าค่าเป้าหมาย ระบบก็จะบังคับให้ผลตอบสนองลดลง เมื่อระบบทำการปรับค่าอย่างต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จะทำให้ค่าผลตอบสนองที่ได้ มีค่าสลับไปสลับมา ระหว่างค่าที่มากกว่าและค่าที่น้อยกว่าค่าเป้าหมาย

5. เทคนิคการประมาณค่าความไม่แน่นอน

การจัดการเพื่อลดการสั่นของระบบ (Chattering) จะกล่าวถึงการแก้ปัญหาโดยวิธีของการประมาณค่าความไม่แน่นอน [3] โดยการพิจารณาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบ ค่านี้เองจะมีผลต่อการติดตามค่าที่ต้องการ พิจารณาสมาการของระบบจริงและระบบอ้างอิงดังนี้

$$\dot{x} = \Delta(t) + g(x_1)x_2 \quad (17)$$

$$\dot{x}_d = g(x_1)x_2 \quad (18)$$

พิจารณาพื้นผิวสไลด์ดิ้ง (Sliding Surface) โดย $s(x, t)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ [4] เมื่อ $\tilde{x} = x - x_d$ ดังสมการ

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x} \quad (19)$$

เมื่อ λ คือค่าคงที่บวก (Positive constant) และจะได้ฟังก์ชันสไลด์ดิ้ง (Sliding Function) ดังนี้

$$s = x - x_d \quad (20)$$

อนุพันธ์เทียบเวลาของฟังก์ชันสไลด์ดิ้งแสดงดังนี้

$$\dot{s} = \dot{x} - \dot{x}_d \quad (21)$$

$$= \Delta(t) + g(x_1)x_2 - g(x_1)x_2$$

$$\therefore \dot{s} = \Delta(t) \quad (22)$$

จากสมการข้างต้นสามารถที่จะหาค่าที่จะมาชดเชยกับความไม่แน่นอนของระบบ (Uncertainty Compensation, G) ค่านี้จะมีหน้าที่จัดการกับค่าความไม่แน่นอนของระบบเพื่อบังคับให้ค่าอนุพันธ์เทียบเวลาของพื้นผิวสไลด์ดิ้งมีค่าเท่ากับศูนย์ และจากสมการ (22) สามารถได้สมการใหม่ดังนี้

$$\dot{s} = \Delta(t) - G \quad (23)$$

ทุกทางเดินที่อยู่บนพื้นผิว $s(x, t)$ จะยังคงอยู่ในพื้นผิวนั้น นั่นคือ $\dot{s}$ มีค่าเท่ากับศูนย์

$$G = \Delta(t) \quad (24)$$

อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขข้างต้นนี้จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อทราบค่าความไม่แน่นอนที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ดังนั้นจากสมการ (24) จะใช้ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นก่อนหน้าเพื่อมาชดเชยกับค่าความไม่แน่นอนที่จะเกิดในปัจจุบัน ซึ่งคล้ายกับหลักการของการควบคุมแบบหน่วงเวลา (Time Delay Control) นั่นคือ

$$G = \Delta(t - L) \quad (25)$$

ค่าความไม่แน่นอนของระบบที่เวลาปัจจุบัน จะถูกชดเชยโดยค่าความไม่แน่นอนของระบบที่เกิดขึ้นก่อน ซึ่งเป็นค่าที่รู้แน่นอน และเป็นไปได้ว่าค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวจะชดเชยได้หมดเมื่อค่าเวลาหน่วง (L) ของระบบมีค่าเล็กเพียงพอที่ทำให้ระบบเป็นแบบต่อเนื่อง ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของการควบคุมแบบหน่วงเวลา

6. การจำลองระบบควบคุม

จากการศึกษาวิธีการย้อนกลับของตัวอินทิเกรต และวิธีควบคุมแบบสลับมาในหัวข้อที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับระบบของเครื่องยนต์ ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\dot{n} = \Delta_1 + T \quad (26)$$

$$\dot{T} = \Delta_2 + \phi \quad (27)$$

n คือความเร็วรอบของเครื่องยนต์, T คือแรงบิด, ϕ คือมุมการเปิดของวาล์วปีกผีเสื้อ

กำหนดให้

$$e_1 = n - n_d \quad (28)$$

$$e_2 = T - T_d \quad (29)$$

e_1 คือผลต่างระหว่างความเร็วรอบของเครื่องยนต์กับความเร็วรอบที่ต้องการ, e_2 คือผลต่างระหว่างแรงบิดของเครื่องยนต์กับแรงบิดที่ต้องการ

ดังนั้น เพื่อให้ความเร็วรอบและแรงบิดของเครื่องยนต์เป็นไปตามความต้องการ ค่า e_1 และ e_2 จึงควรมีค่าเท่ากับศูนย์ จากทฤษฎีความเสถียรของไลปูนอฟ สามารถเขียนฟังก์ชันควบคุมของไลปูนอฟสำหรับสมการ (26) ได้ดังนี้

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (30)$$

อนุพันธ์เทียบเวลาของฟังก์ชันควบคุมของไลปูนอฟ คือ

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 \quad (31)$$

จากสมการ (24)

$$\dot{V}_1 = (n - n_d)(\dot{n} - \dot{n}_d) \quad (32)$$

จากทฤษฎีเสถียรภาพของไลปูนอฟ ระบบจะเสถียรภาพถ้าอนุพันธ์เทียบเวลาของฟังก์ชันควบคุมของไลปูนอฟมีค่าน้อยกว่าศูนย์ และจากสมการ (32) จะเห็นได้ว่า $\dot{n}$ จะต้องเป็นลบจึงจะทำให้อนุพันธ์เทียบเวลาของฟังก์ชันควบคุมของไลปูนอฟมีค่าน้อยกว่าศูนย์ได้

พิจารณาสมการ (26) จากวิธีควบคุมแบบสลับ จึงกำหนดให้

$$T = -k_1 \operatorname{sgn}(e_1) \quad \text{โดยที่ } k_1 > \Delta_1 \quad (33)$$

ซึ่ง T ที่ทำให้ระบบเสถียรก็คือกฎการควบคุมเสมือน (α) ของระบบนั่นเอง

สำหรับสมการ (27) สามารถเขียนฟังก์ชันควบคุมของไลปูนอฟโดยนำผลต่างระหว่างกฎการควบคุมเสมือนกับกฎการควบคุมที่ต้องการ (z) มาพิจารณาด้วย ได้ดังนี้

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z^2 \quad ; \quad z = T - \alpha \quad (34)$$

และอนุพันธ์เทียบเวลาของฟังก์ชันควบคุมของไลปูนอฟ คือ

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z\dot{z} \quad ; \quad \dot{z} = \dot{T} - \dot{\alpha}$$

นั่นคือ

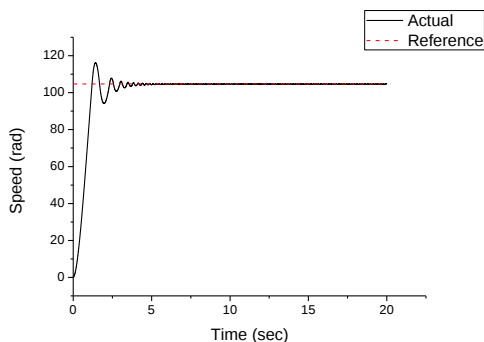
$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + (T - \alpha)(\dot{T} - \dot{\alpha}) \quad (35)$$

ในทำนองเดียวกัน อนุพันธ์เทียบเวลาของฟังก์ชันควบคุมของไลปูนอฟจะต้องมีค่าน้อยกว่าศูนย์ระบบจึงจะเสถียร และจากสมการ (35) จะเห็นได้ว่า $\dot{T}$ จะต้องเป็นลบจึงจะทำให้อนุพันธ์เทียบเวลาของฟังก์ชันควบคุมของไลปูนอฟมีค่าน้อยกว่าศูนย์ได้

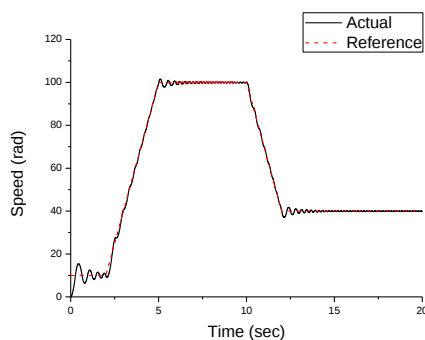
พิจารณาสมการ (27) จากวิธีควบคุมแบบสลับ จึงกำหนดให้

$$\phi = -k_2 \operatorname{sgn}(z) \quad \text{โดยที่ } k_2 > \Delta_2 \quad (36)$$

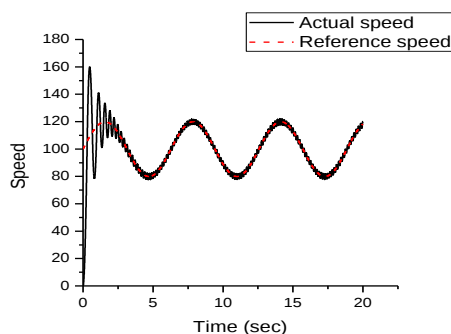
การจำลองระบบควบคุมความเร็วของเครื่องยนต์ทำงานด้วยเซอร์โวมอเตอร์ควบคุมปีกผีเสื้อด้วยวิธีการย้อนกลับของตัวอินทิเกรตและการควบคุมแบบสลับแสดงดังรูปที่ 1 แสดงผลการจำลองทั้งสัญญาณแบบ step ramp และ sinusoidal พบว่าค่าเวลาสู่สมดุลยังคงมีค่าไม่ดี เนื่องมาจากการควบคุมด้วยวิธีดังกล่าวต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด



(ก) ผลการตอบสนองเมื่อสัญญาณเป็นแบบ step function



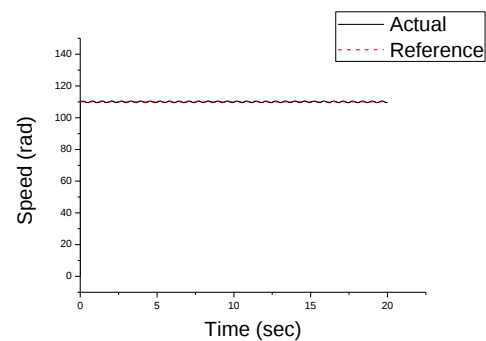
(ข) ผลการตอบสนองเมื่อสัญญาณเป็นแบบ ramp function



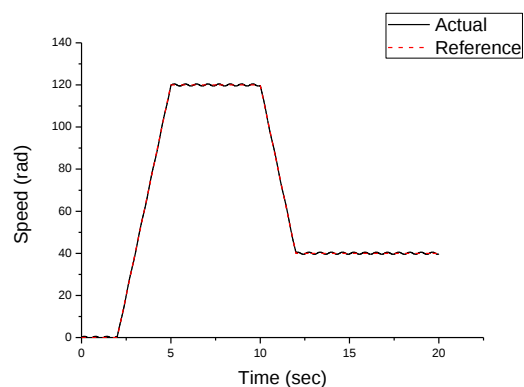
(ค) ผลการตอบสนองเมื่อสัญญาณเป็นแบบ sinusoidal

รูปที่ 1 กราฟแสดงผลการจำลองระบบควบคุมด้วยวิธีการย้อนกลับของตัวอินทิเกรตและการควบคุมแบบสลับ

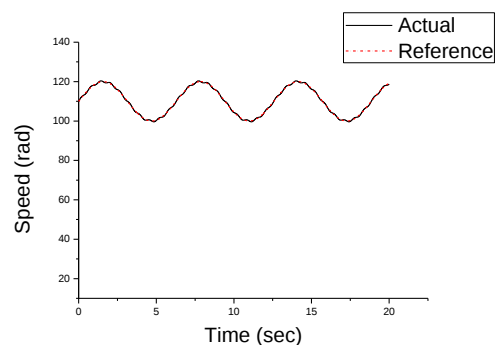
ผลการจำลองควบคุมด้วยวิธีการชดเชยค่าความไม่แน่นอนแสดงดังรูปที่ 2 ผลการจำลองพบว่ามีการติดตามค่าความเร็วที่ต้องการ นั้นหมายความว่าวิธีการควบคุมนี้สามารถชดเชยค่าความไม่แน่นอนของระบบได้



(ง) ผลการตอบสนองเมื่อสัญญาณเป็นแบบ step function



(ข) ผลการตอบสนองเมื่อสัญญาณเป็นแบบ ramp function

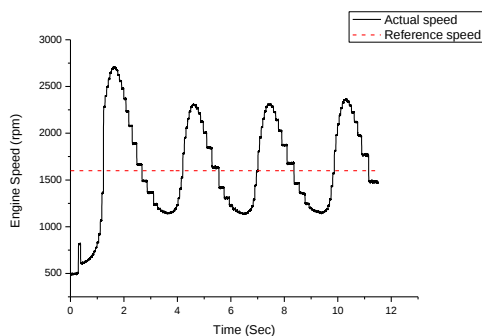


(ค) ผลการตอบสนองเมื่อสัญญาณเป็นแบบ sinusoidal

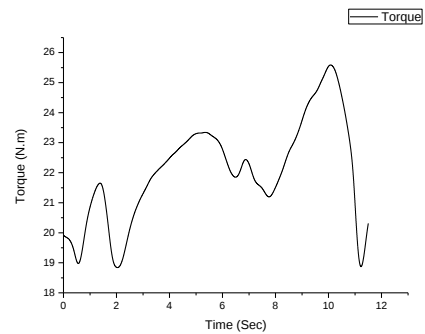
รูปที่ 2 กราฟแสดงผลการจำลองระบบควบคุมด้วยวิธีชดเชยค่าความไม่แน่นอน

7. ผลการควบคุมปีกผีเสื้ออิเล็กทรอนิกส์

การออกแบบระบบควบคุม มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (n) เป็นไปตามค่าเป้าหมาย (n_d) ที่ป้อนให้แก่ระบบ และการที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ได้นั้น จำเป็นต้องควบคุมการเปิด-ปิดของวาล์วปีกผีเสื้อให้เหมาะสม ซึ่งการเปิด-ปิดวาล์วปีกผีเสื้อสามารถทำได้ด้วยการควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ การสั่งงานระบบควบคุมเพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ โดยระบบควบคุมสามารถควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ให้หมุนไปได้ 90 องศา รักษาตำแหน่งอยู่ที่ 1 มิลลิวินาที และ 2 มิลลิวินาที จึงออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ได้คือ ถ้าความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีค่าน้อยกว่าค่าเป้าหมาย ระบบจะทำการควบคุมองศาในการเปิดของวาล์วปีกผีเสื้อเพิ่มขึ้น นั่นคือ $n - n_d < 0$ ระบบจะส่งสัญญาณพัลส์มีความกว้าง 2 มิลลิวินาที ในทางกลับกัน ถ้าความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีค่ามากกว่าค่าเป้าหมาย ระบบก็จะควบคุมองศาในการเปิดของวาล์วปีกผีเสื้อให้ลดลง นั่นคือ $n - n_d > 0$ ระบบจะส่งสัญญาณพัลส์มีความกว้าง 1 มิลลิวินาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3 ผลการตอบสนองแสดงถึงความเร็วของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนแปลงรอบค่าเป้าหมาย แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความเร็วยังคงมีค่ารอบค่าเป้าหมาย ซึ่งผลการทดลองนี้แสดงถึงความสามารถของตัวควบคุมที่ใช้กับการควบคุมปีกผีเสื้อ และรูปที่ 4 แสดงถึงแรงบิดที่ได้จากเครื่องยนต์



รูปที่ 3 กราฟแสดงผลการทดลองควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)



รูปที่ 4 กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์

8. สรุปผล

การควบคุมด้วยวิธีการย้อนกลับของตัวอินทิเกรตรวมกับการควบคุมแบบสลับให้ผลการควบคุมติดตามค่าความเร็วเครื่องยนต์ตามที่ต้องการ การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า การควบคุมด้วยวิธีนี้สามารถใช้กับระบบควบคุมมุมปีกผีเสื้อได้จริง โดยผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องยนต์เกิดขึ้นรอบค่าเป้าหมายซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของระบบที่ไม่ทราบค่า จึงทำให้ระบบเกิดการแกว่งรอบค่าที่เราต้องการ และขณะเดียวกันมีสาเหตุมาจากเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้งานเพื่อขับปีกผีเสื้อมีช่วงการทำงานที่จำกัด การแก้ปัญหาค่าเวลาสู่สมดุลที่มากนั้น สามารถแก้ไขโดยใช้วิธีการชดเชยค่าความไม่แน่นอนของระบบ ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่า ระบบมีการตอบสนองที่ดี แต่อย่างไรก็ตามการใช้วิธีดังกล่าวจะทำให้การออกแบบระบบควบคุมมีประสิทธิภาพมากขึ้น

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Baik, I.-C., Kim, K.-H., and Youn, M.-J. (2000). Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using boundary layer sliding mode control technique, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8, 1: pp 47-54

- [2] Ozguner, U., Hong, H. and Pan, Y. (2001). Discrete-time sliding mode control of electronic throttle valve, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 2, pp 1819-1824.
- [3] Radpukdee, T. and Jirawattana, P. (2008). Uncertainty learning and compensation: an application to pressure tracking of an electro-hydraulic proportional relief valve, *Control Engineering Practice*, vol. 17, 2, February 2009, pp. 291-301
- [4] Slotine, J.J.E. and Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. New Jersey: Prince-Hall International Inc., USA.
- [5] Tan Y., Hu J. and Tan H. (2000). Adaptive Integral Backstepping Motion Control and Experiment Implementation. *IEEE Industry Applications Society*, vol. 2, pp 1081-1088.
- [6] Yokoyama, M., Shimizu, K., and Okamoto, N. (1998). Application of Sliding-mode servo controller to electronic throttle control. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 2, pp 1541-1545.
- [7] Yuan, X., Wang, Y. (2009). Neural networks based self-learning PID control of electronic throttle, *Nonlinear Dynamics*, vol. 55 (4), pp. 385-393.
- [8] Griffiths, P.G. (2002). Embedded software control design for an electronic throttle body, M.S. thesis, Department Mechanical Engineering, University of California, Berkeley.
- [9] ทศพร แจ่มใส, ธนา ราษฎร์ภักดี, ปิโยรส จิระวัฒนา และ พงพันธ์ ขันเนียม (2552). การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมของคอยล์สปริงด้วยดีซีเซอร์โวมอเตอร์โดยเทคนิคการเรียนรู้และชดเชยความไม่แน่นอนผ่านการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง

ประเทศไทย ครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่.