

การควบคุมความเร็วรอบเดินเบาของรถกระบะเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม
ดีเซล แก๊สธรรมชาติ ด้วยวิธีการควบคุมแบบแผนเลื่อน

Idle Speed Control of Pick-up truck with dual Diesel-natural gas engine by Sliding
Mode Control Method

นิชานันท์ ศรีแก้ว*, และ วิทิต จัตรรัตนกุลชัย

ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสนั่นสะเทือน (CRVLAB) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*ติดต่อ: nichanunair@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการออกแบบและการนำตัวควบคุมแบบแผนเลื่อนมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบเดินเบาของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงดีเซลร่วมกับแก๊สธรรมชาติ เครื่องยนต์เป็นกระบวนการแบบไม่ต่อเนื่องมีความไม่แน่นอนและมีสิ่งรบกวนจากระบบต่างๆ ตัวควบคุมที่นำมาใช้เป็นแบบไม่เชิงเส้นถูกออกแบบตามทฤษฎีแบบแผนเลื่อน ตัวควบคุมความเร็วรอบเดินเบาถูกออกแบบและเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบพีไอดี โดยแบ่งการทดสอบเป็นสองช่วงการทำงาน ได้แก่ ช่วงการสมดุบน้ำมันเดินเบา และช่วงการควบคุมขณะเครื่องปรับอากาศตัดต่อวงจรจากการทดลองแสดงประสิทธิภาพตัวควบคุมทั้งสองแบบ โดยตัวควบคุมทั้งสองแบบสามารถควบคุมความเร็วเดินเบาในสภาวะทั่วไป การเปลี่ยนค่าติดตั้งทันทีที่มีผลทำให้ประสิทธิภาพตัวควบคุมแบบพีไอดีลดลง แต่การควบคุมแบบแผนเลื่อนสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วและคงทนต่อระบบที่ไม่แน่นอนและมีสิ่งรบกวน ค่าอัตราขยายสามารถปรับได้ตามความเร็วและโหลดที่หลากหลาย

คำหลัก: การควบคุมแบบแผนเลื่อน, การควบคุมความเร็วรอบเดินเบา, เครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม

Abstract

This paper presents the design and implementation of sliding mode controller for the idle speed control on dual Diesel-natural gas engine. The engine is an inherently discrete process, has uncertainty and disturbances from other systems. A non-linear controller is designed on sliding mode theory. Different strategies for the idle speed controller design are presented and compared with PID controller. Experiments are divided into two operations, which are engine idling with the first gear engaged and engine idling during air conditioner switched on and off with neutral gear. Experimental results show the effectiveness of both controllers. Both controllers can control the idle speed well during normal operation. However, during the swift set point change, the PID controller was proved to be only marginally effective. But the sliding mode control has fast response and is robust with uncertain model and disturbance. The sliding mode control gains can be scheduled to handle the speed-and-load variation.

Keywords: sliding mode control, idle speed control, Diesel Dual Fuel engine.

DRC-2031

1. บทนำ

การพัฒนาการควบคุมเดินเบา (Idle Speed Control, ISC) นับเป็นส่วนสำคัญในอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากการสูญเสียพลังงานจากการเดินเบานับเป็นปัจจัยหลักของการขับเคลื่อนพาหนะภายในเมือง ดังนั้นหลายสิบปีที่ผ่านมาจึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการศึกษาและวิจัย เนื่องจากการควบคุมจะใช้กับเครื่องยนต์ ซึ่งมีความไม่แน่นอน (Uncertainty), สิ่งรบกวน (Disturbances) จากระบบต่างๆ และเป็นระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Plant) จึงยากต่อการควบคุมเพื่อให้ได้ผลของการตอบสนองที่ดี

การควบคุมเดินเบาของเครื่องยนต์ให้รอบเดินเบาอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ซึ่งเป็นช่วงการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อรอบเครื่องยนต์ลดลงอันเนื่องมาจากภาระที่กระทำกับเครื่องยนต์เช่น การทำงานของคอมเพรสเซอร์ของระบบปรับอากาศ (Air-conditioning System), ระบบส่งถ่ายกำลัง (Power Transmission System), ระบบการบังคับเลี้ยว (Steering System) และอื่นๆ โดยจะทำการควบคุมการฉีดน้ำมันเข้าห้องเผาไหม้ไปผสมกับอากาศ เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถรักษารอบเดินเบาให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ

ในการออกแบบการควบคุมความเร็วเดินเบาที่มีผู้สนใจได้เสนอแนวคิดและทฤษฎีที่น่าสนใจดังนี้ ในปี ค.ศ. 1999 M. Thornhill, S. Thompson, H. Sindano [1] เสนอแนวคิดการเปรียบเทียบวิธีควบคุมความเร็วเดินเบาด้วยวิธีการควบคุมแบบต่างๆ ได้แก่ การควบคุมแบบพีไอ (PI), การควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy), การควบคุมแบบปรับแต่งฟัซซี่ด้วยการคาดคะเนของสมิท (Adaptive FLC with SP), การควบคุมพลวัตแบบเมทริกซ์ (DMC) ได้ผลว่าการควบคุมโดยเรียงจากการควบคุมดีที่สุดถึงการควบคุมแย่ที่สุดดังนี้ แบบ DMC, Adaptive FLC with SP, Fuzzy logic, PI control, Adaptive FLC และในปี 2002 Manxue และ Robert N.K. Loh [2] ออกแบบตัวควบคุมเดินเบารถยนต์ 4 สูบ ขนาด 2.4 ลิตร โดยใช้การออกแบบตัวควบคุมแบบ Discrete Sliding Mode (DSM) โดยที่

เครื่องยนต์มีสิ่งรบกวน (Disturbances) จากระบบปรับอากาศและระบบบังคับเลี้ยว ผลการวิจัยพบว่าเครื่องยนต์สามารถรักษารอบเดินเบาที่กำหนดได้ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมเดิมที่ติดตั้งมากับรถยนต์ และในปีเดียวกัน Douglas W. Memering และ Peter H. Meckl [3] ได้เสนอวิธีการปรับแต่งและพัฒนาเทคนิคการควบคุมความเร็วเดินเบาในเครื่องยนต์ดีเซล และนำมาทำการทดสอบกับรถเครื่องยนต์ดีเซล แบบมีภาระของการจูนด้วยวิธี Minimum Variance self-tuner และ Pole Placement Self-Tuner ทั้งสองวิธีสามารถปรับจูนการควบคุมได้ประสบความสำเร็จเหมือนกันแต่รูปแบบ Minimum Variance self-tuner มีช่วงการเปลี่ยนความเร็วเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วกว่าแต่มีค่า overshoot สูงกว่าแบบ Pole Placement self-tuner ต่อมาในปี 2007 Y. Yildiz และคณะ [4] ใช้เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมแบบ Adaptive Posicast ในการควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 หัวข้อ คือ การติดตาม (Tracking) รอบความเร็วตามที่กำหนด และการหลีกเลี่ยงสิ่งรบกวน (Disturbance Rejection) จาก การบังคับเลี้ยว ซึ่งทั้ง 2 ส่วนสามารถลดค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสองได้ 6% และ 48% ตามลำดับ ในปี 2011 P.V. Manivannan และคณะ [5] ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบ Proportional Derivative (PD) ใช้การสื่อสารผ่าน dSPACE Micro Autobox สำหรับการควบคุมรอบเดินเบาของรถยนต์สองล้อ 125 cc แบบหนึ่งลูกสูบ โดยใช้การวัดค่า Indicated Mean Effective Pressure (IMEP) ที่ความเร็วรอบและช่วงเวลาการจุดระเบิดต่างๆ แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการฉีดน้ำมัน รวมถึงตำแหน่งวาล์วลิ้นปีกผีเสื้อก็คงที่ จากการทดลองพบว่าสามารถลดการเกิดมลพิษ (Emissions) ได้ถึง 60% และลดการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel Consumption) ได้ 11.2%

แนวความคิดของระบบควบคุมแบบโครงสร้างผันแปร (Variable Structure Control: VSC) จะแตกต่างกับระบบควบคุมชนิดอื่น โดยที่โครงสร้างระบบจะมีการผันแปรไปในระหว่างการควบคุม ซึ่งการผันแปร

DRC-2031

ของโครงสร้างนี้ จะกระทำเพื่อให้ตัวแปรสแตต (Variable State) จะเคลื่อนที่ไปบนระนาบเฟส (Phase Plane) เข้าสู่จุดกำเนิด (Origin) เรียกการเคลื่อนที่นี้ว่าการเคลื่อนที่แบบสไลด์ดิง (Sliding Motion) เรียกกระบวนการควบคุมแบบ VSC นี้ว่าโหมดการควบคุมแบบแผนเลื่อน (Sliding Mode Control: SMC) และเรียกพื้นผิวการเคลื่อนที่นี้ว่าพื้นผิวการสไลด์ (Sliding Surface) หรือพื้นผิวการสวิตช์ (Switching Surface) ดังนั้นกล่าวได้ว่าโหมดการควบคุมแบบ SMC จะเกิดในระบบควบคุมแบบ VSC เมื่อเวกเตอร์ความเร็วของตัวแปรสแตต มีทิศพุ่งเข้าหาพื้นผิวการสไลด์ แนวคิดหลักของการออกแบบตัวควบคุมแบบ SMC มี 2 ขั้นตอน คือ 1) Sliding Phase และ 2) Reaching Phase ซึ่งจะกล่าวต่อไปในส่วนที่ 3 สำหรับการควบคุมแบบแผนเลื่อนนั้น ได้มีการศึกษาค้นคว้าอย่างแพร่หลายในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ต่อมาในปี 2007 สัญญา แวนิล [6] ออกแบบตัวควบคุมชดเชยแบบมูมนำ (Lead Compensator) แล้วทำการพัฒนาตัวควบคุมดังกล่าวด้วยแนวทางของการควบคุมแบบแผนเลื่อน (SMC) สำหรับการควบคุมระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ให้สามารถรักษาการลอยตัวของลูกบอล ข้อดีคือ ใช้เพียงแต่การวัดตำแหน่งลูกบอล แต่ไม่ต้องวัดความเร็วของลูกบอล จากการวิจัยยังพบว่าการแกว่งมาก และใช้เวลานานในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) และในปี 2011 สมพร และ ธีรยุทธ [7] ออกแบบตัวควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ SMC ดั้งเดิม เทียบเคียงกับตัวควบคุม SMC ที่มีการปรับปรุงให้เหมาะสมโดยใช้วิธีพันธุกรรม (Genetic Algorithm) มาใช้ควบคุมลูกตุ้มผกผัน (Inverted Pendulum) พบว่ามีการตอบสนองชั่วขณะ (Transient Response) ที่รวดเร็วกว่าตัวควบคุมแบบ SMC ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนพื้นฐานดั้งเดิม

ในบทความนี้จึงได้นำเสนอ การนำทฤษฎีแบบแผนเลื่อนมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมความเร็วเดินเบาของรถยนต์เชื้อเพลิงร่วมกับพลังงานทางเลือกซึ่งเป็นระบบที่มีความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของการ

เปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ และมีสิ่งรบกวน (Disturbances) จากระบบต่างๆ ที่มาจากภาระที่กระทำกับเครื่องยนต์ และยังเป็นระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Plant) ซึ่งตัวควบคุมแบบแผนเลื่อน (SMC) สามารถหลีกเลี่ยงสิ่งรบกวน (Disturbance Rejection) ที่กระทำกับระบบ ทำให้ระบบมีความคงทน (Robustness) และยังมีความเร็วในการตอบสนอง (Response) จึงสามารถควบคุมรอบเดินเบาให้อยู่ภายในช่วงที่ต้องการได้

ในบทความนี้ ส่วนที่ 2 แสดงทฤษฎีการออกแบบพีไอดี ส่วนที่ 3 แสดงทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบแผนเลื่อน (SMC) และการลดการสั่น ส่วนที่ 4 แสดงผลการทดลอง ส่วนที่ 5 สรุปผลการทดลอง ส่วนที่ 6 กิตติกรรมประกาศ และเอกสารอ้างอิงในส่วนที่ 7

2. ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี

เราใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีทั่วไปในรูป

$$u_s = k_p e + k_i \int_0^t e dt + k_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

ค่าตัวขยาย (Gain) ของการควบคุมแบบพีไอดีจะถูกเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อการตอบสนองต่อสภาวะ

3. ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบแผนเลื่อน

Variable Structure System (VSS) เป็นคำที่ใช้เรียกทั่วไปของระบบพลวัต (Dynamical System) ที่มีส่วนของโครงสร้างแบบ "Switching Logic" ภายในโครงสร้างทางคณิตศาสตร์นั้นประกอบด้วยอัลกอริทึมของการสวิตช์ ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะ (State) ของระบบในขณะนั้น โดยโครงสร้างแบบ Switching Logic นี้จะทำงานร่วมกัน หรือมีความสัมพันธ์กับระบบย่อยอื่นๆ ภายในระบบพลวัตระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งกฎการควบคุม (Control Law) มีส่วนของโครงสร้างแบบ Switching Logic เช่น มีฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องซิกนัม (Signum Function) ให้การทำงานแบบสวิตช์ที่กลับไปกลับมาด้วยความถี่สูงจึงเรียกการควบคุมนี้ว่าการควบคุมแบบแผนเลื่อน (Sliding Mode Control; SMC)

DRC-2031

แบบจำลอง (Model) ของรถมีความไม่แน่นอน การทำให้เป็นเชิงเส้นของสัญญาณเข้าและขาออก จึงไม่สามารถให้ผลการควบคุมตามที่ต้องการได้

วิธีการควบคุมแบบแผนเลื่อน (SMC) เป็นวิธี ควบคุมคงทน (Robustness) ภายใต้ความไม่แน่นอน (Uncertainty) ที่มีขอบเขต สามารถแบ่งสัญญาณ ควบคุมเป็น 2 ส่วน ส่วนสัญญาณต่อเนื่อง (Continuous Time Signal) สำหรับควบคุมที่สถานะ ระบบบนแผนเลื่อน (Sliding Surface) และอีกส่วนคือ สัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time Signal) สำหรับ ควบคุมระบบที่ไม่อยู่บนแผนเลื่อน (Sliding Surface)

พิจารณาระบบไม่เชิงเส้นอันดับสอง ในสมการ

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2)$$

$$\dot{x}_2 = h(x) + g(x)u \quad (3)$$

เมื่อ u เป็นสัญญาณควบคุม (Control Signal) h และ g เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่ไม่ทราบค่า โดยที่ $g(x) \geq g_0 > 0$ สำหรับทุกค่า x ดังนั้นระบบจึงยอม ให้มีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้ในเทอมของ h และ g และจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขตามสมการ (4)

$$\left| \frac{a_1 x_2 + h(x)}{g(x)} \right| \leq \rho(x), \quad \forall x \in R^2 \quad (4)$$

สำหรับบางฟังก์ชัน $\rho(x)$ ที่ทราบค่า โดยทำการ ออกแบบการควบคุมให้มีโครงสร้างเป็นดังสมการ (5)

$$u = -x_1 \operatorname{sgn}(s) \begin{cases} x_1, & s < 0 \\ 0, & s = 0 \\ -x_1, & s > 0 \end{cases} \quad (5)$$

โดยที่ $s = ax_1 + x_2 = 0, a > 0$; เรียก Sliding Surface เนื่องจากมีลักษณะการเคลื่อนที่กลับไป กลับมาระหว่าง $s > 0$ และ $s < 0$

จากสมการที่ (5) จะพบว่าสัญญาณควบคุมมี ฟังก์ชันซิกนัม (Signum Function) ซึ่งเป็นโครงสร้าง แบบฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเกิดการทํางานแบบสวิทช์ สลับไปมาอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ที่ เรียกว่า Sliding Mode ไปบนพื้นผิว $s = 0$ เนื่องจากการ สวิตช์กลับไปมาของสัญญาณควบคุม ดังนั้น ขั้นตอนในการออกแบบจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1) Reaching Phase เป็นการทำให้แนววิถีของ ระบบที่มีสถานะเริ่มต้น $x_0 = x(0) \neq 0$ ใดๆ ซึ่งสม นัยกับพื้นผิว $s_0 = s(x_0) \neq 0$ บนระนาบสถานะ (Phase Space, R^2) ในกรณีทั่วไปคือปริภูมิสถานะ (State Space, R^n) เคลื่อนที่เข้าหาชั้นขีดผิว (Boundary Layer) $\{|s| \leq \varepsilon\}$ ซึ่งเป็นเซตไม่แปรผัน (Invariant)

2) Sliding Phase เป็นการเคลื่อนที่ของแนววิถี ของระบบภายในชั้นขีดผิว $\{|s| \leq \varepsilon\}$ โดยจะต้อง ออกแบบ Sliding Surface ให้มีเสถียรภาพเชิงเส้น กำกับ หรือ Stable Sliding Surface จึงจะทำให้ สถานะของระบบที่เคลื่อนที่อยู่บนพื้นผิว $s = 0$ (หรือ ภายในเซตไม่แปรผัน $\{|s| \leq \varepsilon\}$) นี้มีเสถียรภาพ (Stable) เป็นอย่างน้อย

3.1 Reaching Phase

หากกฎการควบคุมที่ทำให้ระบบซึ่งมีสถานะเริ่มต้น $x_0 \neq 0$ ใดๆ (สมนัยกับพื้นผิว $s_0 \neq 0$) บนระนาบ หรือปริภูมิสถานะ (State Space, R^n) เคลื่อนที่เข้า ไปยังพื้นผิว $s = ax_1 + x_2 = 0$ หรืออยู่ภายในเซตไม่ แปรผัน $\{|s| \leq \varepsilon\}$ ซึ่งครอบคลุมจุดกำเนิด โดย กำหนดฟังก์ชันเลียปูนอฟ $V = (1/2)s^2$ และสำหรับ $\dot{s} = a\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = a_1 x_2 + h(x) + g(x)u$ จะได้

$$\dot{V} = s\dot{s} \quad (6)$$

$= sa_1 x_2 + h(x) + g(x)su \leq g(x)|s|\rho(x) + g(x)su$ จุดประสงค์ในขั้นตอนนี้คือ พยายามกำจัดเทอมที่ ทราบค่าแน่นอนออกจาก $\dot{V}$ ซึ่งอาจทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับรูปแบบของระบบรวมกับการออกแบบกฎ การควบคุมแบบ SMC ในรูป

$$u = -\beta(x) \operatorname{sgn}(s) \quad (7)$$

เมื่อ β เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นซึ่งเราต้องเลือกใน ภายหลังเพื่อกำจัดเทอมไม่เชิงเส้นออก และจาก สมการ (6) จะได้

$$\dot{V} \leq g(x)|s|\rho(x) + g(x)\beta(x)s \operatorname{sgn}(s) \quad (8)$$

$g(x)|s|\rho(x) + g(x)\beta(x)s \operatorname{sgn}(s) = -g(x)\beta(x) - \rho(x)|s|$ จากสมการที่ (6) เพื่อให้ $\dot{V} < 0$ จึงออกแบบให้ $\beta(x) \geq \rho(x) + \beta_0, \beta_0 > 0$ และเนื่องจาก $-g(x) \leq -g_0 < 0$ ผลที่ได้คือ

DRC-2031

$$\dot{V} \leq -g_0 \beta_0 |s| < 0 \quad (9)$$

ดังนั้นจะเห็นว่าแนววิถีเริ่มต้นของระบบจะเคลื่อนที่เข้าหา Sliding Surface $s = 0$ ในเวลาจำกัด และวิธีการที่ง่ายที่สุดของการออกแบบถ้าในโดเมนที่เราสนใจหรือโดเมนที่ระบบทำงาน ซึ่งสามารถหาค่าขอบเขตบน ที่เป็นค่าคงที่บวก k_1 ทำให้ระบบสอดคล้องกับเงื่อนไข

$$\left| \frac{a_1 x_2 + h(x)}{g(x)} \right| \leq k_1 \quad (10)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการควบคุมให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$u = -k \operatorname{sgn}(s) \quad (11)$$

โดยที่ค่าเกน k จะต้องออกแบบเพื่อให้

$$\dot{V} \leq -g(x)k - k_1 |s| < 0 \quad (12)$$

จึงจะต้องเลือกค่าเกน $k > k_1$ สำหรับการออกแบบเพื่อให้แนววิถีสถานะของระบบเคลื่อนที่เข้าหา Sliding Surface $s = 0$ ในเวลาจำกัด

3.2 Sliding Phase

กำหนดให้ Sliding Surface $s = 0$ เป็นพื้นผิวที่ผ่านจุดกำเนิด และเป็นฟังก์ชันของสถานะทุกตัวของระบบ โดยการออกแบบ Sliding Surface จะสมมติว่าแนววิถีของระบบอยู่บน Sliding Surface ได้อย่างสมบูรณ์การเคลื่อนที่ของระบบบน Sliding Surface นี้จะลดรูปเหลือเพียงสมการ (13) หรือ (14) เพียงสมการเดียว

$$a_1 e_1 + e_2 = 0 \quad (13)$$

$$e_2 = \dot{e}_1 = -a_1 e_1 \quad (14)$$

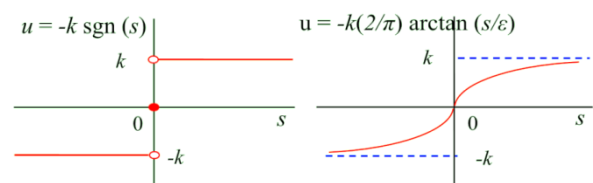
จะพบว่าระบบบน Sliding Surface เป็นเสมือนระบบอิสระ (Free System) $u = 0$ ทำให้เสถียรภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับค่า a_1 ของพื้นผิวถ้าเราออกแบบให้ $a_1 > 0$ จะทำให้ที่ t_∞ ค่า $e_1 \rightarrow 0$ ซึ่งผลที่ตามมาคือ $e_2 \rightarrow 0$ ที่เวลาเดียวกัน

ดังนั้นการออกแบบในขั้นตอน Sliding Phase ก็คือการออกแบบ Sliding Surface ให้มีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (Asymptotically Stable; AS) นั่นเอง ซึ่งจะทำให้สถานะของระบบบนพื้นผิวนั้นเข้าหาจุดกำเนิด

ข้อควรระวังอย่างหนึ่งเกี่ยวกับการใช้ฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องในกฎการควบคุม (ฟังก์ชันซิกนัม: Signum Function, $\operatorname{sgn}(s)$ ไม่ต่อเนื่องที่ศูนย์) เป็นผลทำให้ในขั้นตอน Sliding Phase ตัวควบคุมซึ่งเคลื่อนที่กลับไปกลับมาระหว่าง $s > 0$ และ $s < 0$ ทำให้แนววิถีสถานะของระบบกระโดดข้ามพื้นผิวอยู่ตลอดเวลา จึงเรียกการเคลื่อนที่ว่า Zix-Zag Motion ปรากฏการณ์ดังกล่าวที่เกิดขึ้นเรียกว่า การสั่นแบบฟันปลา (Chattering) ซึ่งในทางปฏิบัติเราควรหลีกเลี่ยงเนื่องจากการสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงดังกล่าวสามารถทำให้ตัวขับเคลื่อน (Actuator) เกิดความเสียหายได้ โดยจะกล่าวถึงการกำจัดการสั่นในหัวข้อถัดไป

3.3 การลดการสั่นในการควบคุมแบบแผนเลื่อน

การเกิดการสั่นแบบฟันปลา (Chattering) จะเกิดขึ้นเมื่อเข้าสู่ Sliding Phase ทำให้เกิดผลทางกายภาพเกิดการสั่นความถี่สูงซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบ โดยแนวทางการแก้ไขที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือ แทนฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง ฟังก์ชันซิกนัม (Signum Function) ด้วยฟังก์ชันต่อเนื่องที่มีลักษณะคล้ายกันในที่นี้แทนด้วย ฟังก์ชันผกผันแทนเจนท์ (Inverse Tangent Function) โดยที่รูปร่างของกราฟฟังก์ชันจะขึ้นอยู่กับค่า ε คือเมื่อ $\varepsilon \rightarrow 0$ แล้ว $-k(2/\pi) \arctan(s/\varepsilon) \rightarrow -k \operatorname{sgn}(s)$ ดังแสดงในรูปที่ 1



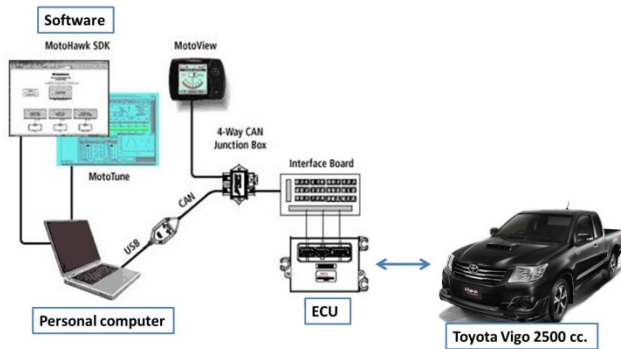
รูปที่ 1 ฟังก์ชันซิกนัม (Signum Function) และฟังก์ชันผกผันแทนเจนท์ (Inverse Tangent Function)

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

จากรูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์และการเชื่อมต่อการทดสอบโดยจะทำการเขียนตัวควบคุมในโปรแกรม Matlab ที่มีการติดตั้ง โปรแกรม MotoTron MotoHawk ECU ที่ใช้สำหรับสื่อสารกับรถยนต์ ใน

DRC-2031

การเชื่อมต่อ, จูนค่าพารามิเตอร์, อ่านค่า และบันทึกค่า โดยรถที่ใช้ในการทดสอบเป็นรถกระบะโตโยต้า เครื่องยนต์แบบ 2KD-FTV ติดตั้งเครื่องยนต์เชื้อเพลิงดีเซลร่วมกับแก๊สธรรมชาติ มีรายละเอียดตามที่แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์และการเชื่อมต่อการทดสอบ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของเครื่องยนต์

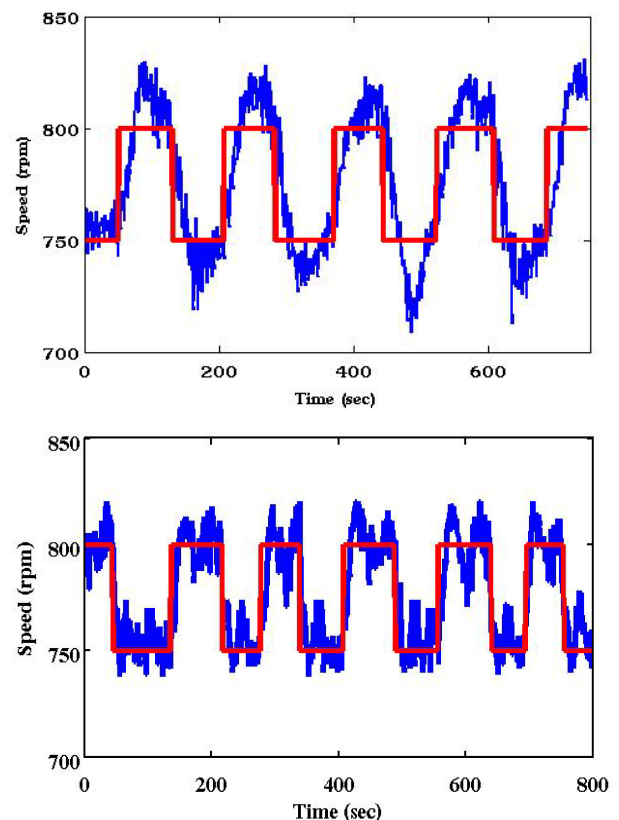
Model:	Toyota 2KD-FTV, Diesel Engine
Number of cylinders:	4 (Inline)
Number of valves:	16 (DOHC)
Manifold:	Cross-flow with turbocharger
Fuel system:	Common-rail direct injection
Displacement:	2,494 cc
Bore:	92.0 mm
Stroke:	93.8 mm
Connecting rod:	158.5 mm
Compression ratio:	18.5:1
Max power:	75 kW at 3,600 rpm
Max torque:	260 Nm at 1,600 - 2,400 rpm
Valve timings:	
I/O	718 deg CA
I/V	211 deg CA
E/O	510 deg CA
E/V	0 deg CA
Firing order:	1-3-4-2

การวิจัยในครั้งนี้ได้แบ่งการทดสอบตัวควบคุมความเร็วรอบเดินเบาเป็นสองช่วงการทำงาน ได้แก่

1) ช่วงการสมดุลงานเดินเบา ในที่นี้จะทำการทดสอบความเร็วการเดินเบาที่เกียร์ 1 (ทำการเข้าเกียร์ 1 จากนั้นปล่อยคลัช โดยที่ไม่มีการเหยียบคันเร่ง รถจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ ด้วยรอบเดินเบา) ดังนั้นจะมีสิ่งรบกวนระบบต่างๆ เช่น ความไม่ราบเรียบจากพื้นผิวถนน, ระบบส่งกำลัง, ระบบบังคับเลี้ยว และอื่นๆ

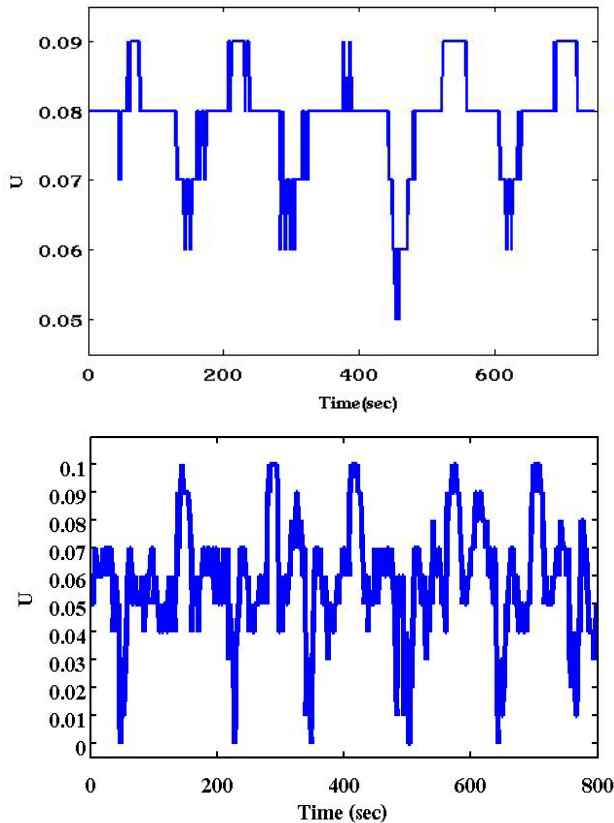
2) ช่วงการควบคุมขณะเครื่องปรับอากาศตัดต่อวงจร

จากรูปที่ 3 แสดงผลความเร็วรอบเดินเบา ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี และตัวควบคุมแบบแผนเลื่อน (ตามลำดับ) ของช่วงการสมดุลงานเดินเบา พบว่าการควบคุมที่ออกแบบด้วยทฤษฎีแบบแผนเลื่อนนั้นสามารถติดตามค่าระดับอ้างอิง (Tracking Reference) ได้ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี ทั้งในการตอบสนองชั่วขณะ (Transient Response) และสภาวะคงตัว (Steady State Response) มีค่า Overshoot น้อยกว่า แต่สำหรับค่าการควบคุมนั้น การควบคุมที่ออกแบบด้วยทฤษฎีแบบแผนเลื่อน จะมีช่วงค่าการควบคุมที่กว้างกว่า ทำให้ใช้พลังงานในการควบคุมมากกว่าตามที่แสดงในรูปที่ 4



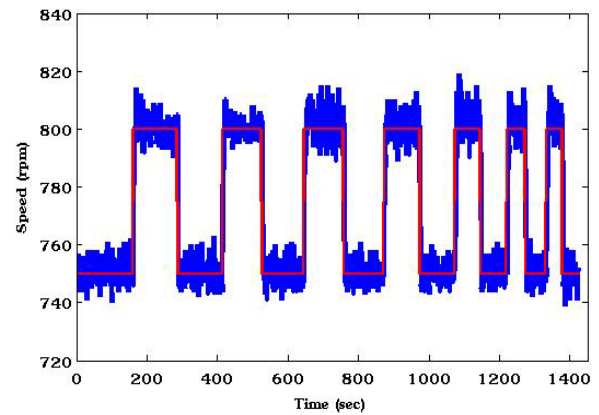
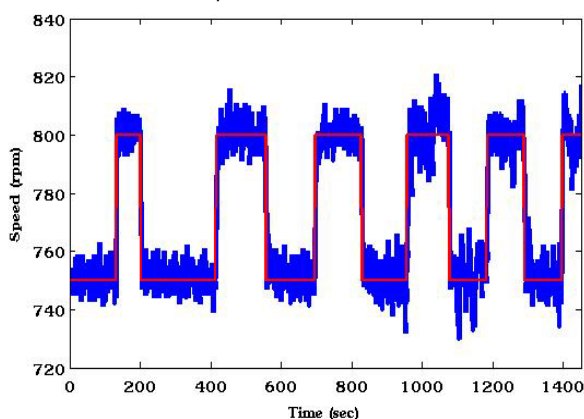
รูปที่ 3 การติดตามค่าระดับอ้างอิง (Tracking Reference) สำหรับช่วงการสมดุลงานเดินเบา: (บน) การควบคุมแบบ PID, (ล่าง) การควบคุมแบบ SMC

DRC-2031

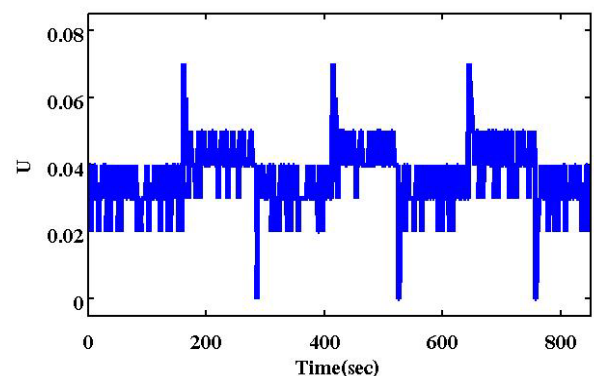
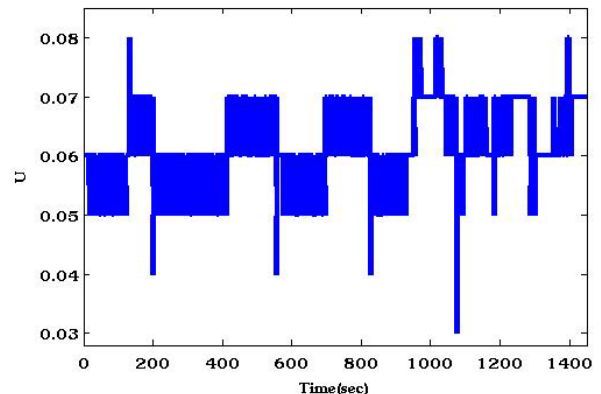


รูปที่ 4 ค่าการควบคุม (U) สำหรับช่วงการสมมูล
น้ำมันเดินเบา: (บน) การควบคุมแบบ PID, (ล่าง)
การควบคุมแบบ SMC

ช่วงการควบคุมขณะเครื่องปรับอากาศตัดต่อวงจร
นั้น ผลการทดสอบพบว่า การติดตามค่าระดับอ้างอิง
(Tracking Reference) ของการควบคุมทั้งสองแบบ
สามารถติดตามได้ดี ทั้งในสถานะผันแปร (Transient
Response) และสถานะอยู่ตัว (Steady State
Response) แต่การควบคุมแบบแบบฟuzzy จะมีการ
Overshoot มากกว่าการควบคุมแบบแบบแผน
ตามที่แสดงในรูปที่ 5 และสำหรับค่าการควบคุมนั้น
การควบคุมที่ออกแบบด้วยทฤษฎีแบบแผนเลื่อน
จะมีช่วงค่าการควบคุมที่กว้างกว่า เช่นเดียวกับการ
ทดสอบช่วงการสมมูลน้ำมันเดินเบา



รูปที่ 5 การติดตามค่าระดับอ้างอิง (Tracking
Reference) สำหรับช่วงการควบคุมขณะ
เครื่องปรับอากาศตัดต่อวงจร: (บน) การควบคุมแบบ
PID, (ล่าง) การควบคุมแบบ SMC



รูปที่ 6 ค่าการควบคุม (U) สำหรับช่วงการควบคุม
ขณะเครื่องปรับอากาศตัดต่อวงจร: (บน) การควบคุม
แบบ PID, (ล่าง) การควบคุมแบบ SMC

5. สรุป

การใช้ตัวควบคุมแบบแบบแผนเลื่อนนั้นรอบเดินเบา
สามารถติดตามค่าระดับอ้างอิง (Tracking Reference)
ได้ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมฟuzzy ที่มีการปรับค่าเกณฑ์ที่
ดีที่สุด ทั้งในการตอบสนองชั่วขณะ (Transient

DRC-2031

Response) และสภาวะคงตัว (Steady State Response) และมีค่า Overshoot น้อยกว่า โดยสิ่งรบกวน (Disturbance) ที่มาจากส่วนต่าง ๆ ของรถ เช่น ไฟแบตเตอรี่ ไฟส่องสว่าง การหมุนพวงมาลัย ฯลฯ มีผลทำให้ค่าออกแบบถูกรบกวนโดยเฉพาะการใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบดั้งเดิม หรือแม้แต่การปรับค่าตัวขยาย (Gain) ก็ทำได้ยาก และข้อได้เปรียบการควบคุมแบบแผนเลื่อนคือ คุณสมบัติการลดคำสั่ง (Order-reduction Property) ความคงทน (Robustness) ต่อระบบที่ไม่แน่นอน (Uncertainty) และระบบที่มีสิ่งรบกวน (Disturbance)

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณกิตติพงษ์ เยาวจา และคุณอิทธิเดช มุลมั่งมี นิสิตปริญญาเอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและคำแนะนำในการเขียนบทความนี้ งานทำที่ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสังเคราะห์แบบจำลองวิศวกรรมศาสตร์ ดีกณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Thornhill, S. Thompson, H. Sindano (1999). Birmingham, UK, A comparison of idle speed control schemes, Research and Development, Control Engineering Practice 8 (2000) 519-530
- [2] Manxue, Robert N.K. Loh (2002). Modeling, Design and Implementation of Discrete Sliding Mode Control for an Engine Idle Speed Control System, paper presented in Anchorage joint the American Control Conference 2002, AK
- [3] Douglas W. Memering, Peter H. Meckl (2002), West Lafayette, Comparison of Adaptive Control Techniques Applied to Diesel Engine Idle Speed Regulation, Purdue University, Journal of

Dynamic Systems Measurement and Control
Vol.124 December (2002) 682-688

[4] Y. Yildiz, A. Annaswamy, D. Yanakiev, I. Kolmanovsky (2007). A comparison of idle speed control schemes, paper presented in the Marriott Marquis Hotel at Times Square joint the American Control Conference 2007, New York City, USA

[5] P.V. Manivannan, M. Singaperumal, A. Ramesh (2011), Development of idle speed engine model using in-cylinder pressure data and an idle speed controller for a small capacity port fuel injected SI Engine, Indian Institute of Technology, Chennai, India, International Journal of Automotive Technology, Vol.12 (2011) 11-20

[6] สัญญาแวณิล (2007) งานวิจัยเรื่องการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก, วิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[7] สมพร และ ธีรยุทธ (2011) การหาค่าตัวควบคุม SMC ที่เหมาะสมสำหรับระบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธี GA, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จังหวัดกระบี่

[8] เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย (2551) ระบบควบคุมพลวัต, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[9] Khalil, H. K. (2001). Nonlinear Systems, 3rd Edition, New Jersey: Prentice Hall