

การปรับค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดสำหรับการควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์ดีเซล

PID Tuning Using Extremum Seeking for Throttle Position Control of Diesel Engine

เสริมศักดิ์ โชตนา^{1*} และ วิทิต จันตรรัตน์กุลชัย¹

¹ ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสัมผัสเทียม (CRVLAB) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*ติดต่อ: Email: im_por_tantzz@hotmail.com, โทรศัพท์: 087-1107060

บทคัดย่อ

การแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum Seeking) เป็นระบบควบคุมแบบปรับค่าได้ซึ่งไม่ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการนำมาใช้ปรับอัตราการขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัล (Proportional Integral, PI) ซึ่งพีไอเป็นตัวควบคุมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่มีข้อเสียที่การปรับค่าอัตราขยายของพีไอเป็นแบบการปรับค่าด้วยมือ โดยเมื่อนำมาใช้กับรถยนต์ที่มีหลายสภาวะในการทำงานซึ่งอาจจะเกินขอบเขตที่ตัวควบคุมแบบพีไอจะทำงานได้ จึงมีการนำการแสวงหาค่าสุดขีดมาใช้ในการปรับอัตราการขยายของตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อให้ระบบควบคุมเหมาะสมกับทุกสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ โดยจะนำมาใช้ควบคุมตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อ (Throttle) ซึ่งเป็นกลไกที่ใช้ปรับอัตราการไหลของอากาศที่จะเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยจะส่งผลกระทบต่อรอบเดินเบาของเครื่องยนต์รวมทั้งกำลังและความเร็วของเครื่องยนต์ด้วย ในบทความนี้จะแสดงการใช้การปรับอัตราการขยายของตัวควบคุมแบบพีไอด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดซึ่งจะเป็นการปรับอัตราขยายแบบเรียลไทม์ โดยจะเปลี่ยนไปตามแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อให้ได้ตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อที่ต้องการ จากการทดลองจะพบว่าระบบควบคุมที่ใช้มีเสถียรภาพ สามารถปรับอัตราการขยายของตัวควบคุมแบบพีไอให้เป็นไปตามการรบกวนที่เกิดขึ้น และได้ตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อตามที่กำหนด

คำหลัก: การแสวงหาค่าสุดขีด การควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อ ระบบควบคุมแบบปรับค่าได้

Abstract

Extremum seeking is an adaptive control that does not require mathematical model. The system works by adjusting gains of the PI control. PI has been widely used in applications, but it has to manually tune. When the PI control is applied to automotive engine, which has many operating conditions that may exceed the working range of a fixed PI, the extremum seeking can be used to tune the PI gains so that the control system is suitable for all engine working conditions. The extremum seeking is applied to the PI control of the throttle, which is a mechanism that controls the air flowing into combustion chamber, which would affect the idle speed, power and engine speed. In this paper, we present an extremum seeking to tune the PI gains to achieve the desired position of the throttle in real-time, in the presence of changing

supplied voltage. The experimental results show that the control system has good stability, can adjust the PI gains under the existing disturbance, and obtains specified throttle position.

Keywords: Extremum seeking control, throttle position control, adaptive control

1. บทนำ

ลิ้นปีกผีเสื้อมีความสำคัญต่อการทำงานของเครื่องยนต์ในทุกสภาวะเพราะเป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่กำหนดอัตราการไหลของอากาศก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยจะส่งผลต่อรอบเดินเบาของรถยนต์, กำลังและความเร็วของเครื่องยนต์รวมถึงการบริโภคเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ด้วย[1] และเนื่องจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมทางด้านยานยนต์มีการแข่งขันกันอย่างสูงทำให้มีความพยายามในการลดต้นทุนในส่วนของการผลิตลิ้นปีกผีเสื้อ จึงทำให้อุปกรณ์มีความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้น ดังนั้นระบบควบคุมตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อจึงมีความสำคัญมากขึ้น[2]

ในการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อมีผู้สนใจได้เสนอแนวคิดและทฤษฎีที่น่าสนใจดังนี้ ในปี ค.ศ.2001 C.C. Wit, I. Kolmanovsky และ J. Sun [3] ได้เสนอการใช้เทคนิคสัญญาณป้อนไปข้างหน้า(Feedforward) ร่วมกับเทคนิคระบบควบคุมสัญญาณพัลส์(pulse) แบบปรับค่าได้ซึ่งจะไปช่วยชดเชยผลกระทบที่ไม่เป็นเชิงเส้นต่าง ๆ เพื่อให้ตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อมีความแม่นยำมากขึ้น ต่อมาในปี ค.ศ.2007 W.B. Yu, D.Y. Wang, D.X. Zhao, Y.Q. Huang [4] ได้ศึกษาการควบคุมตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อโดยใช้เทคนิค Improved fuzzy control ซึ่งทำให้ระบบมีการตอบสนองที่เร็วและค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงสถานะอยู่ตัวน้อยลง และในปี ค.ศ. 2010 B. Alt, J.P. Blath, F. Svaricek และ M. Schultalbers [5] ได้แนะนำการวิเคราะห์และทดลองเกี่ยวกับการควบคุมตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อโดยใช้เทคนิค Self-tuning control design ซึ่งใช้ระบบควบคุมแบบ I-PD และการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น(nonlinear control) ซึ่งจะไปช่วยชดเชยผลกระทบที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งก็คือแรงเสียดทานและระบบทางกล

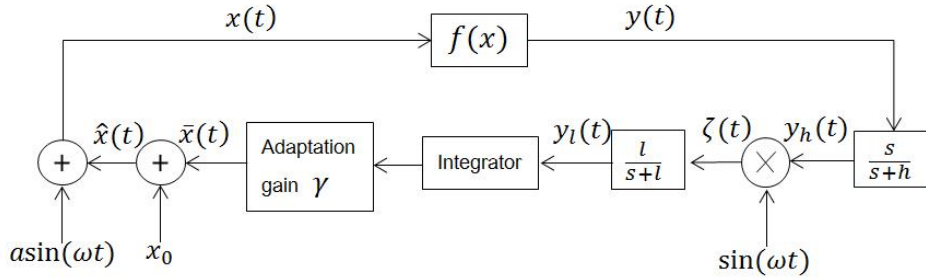
ของสปริง แต่วิธีนี้ยังคงต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในระบบควบคุม

ทฤษฎีการแสวงหาค่าสุดขีด(Extremum seeking) ได้คิดค้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1922 โดย Leblance แต่เพิ่งกลับมาเป็นที่สนใจอีกครั้งเมื่อมีการศึกษาของ M. Krstic ในช่วงสิบกว่าปีที่ผ่านมา วิธีแสวงหาค่าสุดขีดเป็นการควบคุมแบบปรับค่าได้โดยไม่ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรในระบบควบคุม เพื่อให้ได้สัญญาณป้อนออกมีค่าน้อยที่สุดหรือมากที่สุดตามความต้องการ ในปี ค.ศ. 1997 M. Krstic และ H.H. Wang [6] ได้ศึกษาและนำเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการแสวงหาค่าสุดขีด โดยได้ทำการพิสูจน์เสถียรภาพของระบบการแสวงหาค่าสุดขีดแบบสัญญาณป้อนกลับ ต่อมาในปี ค.ศ.2005 N. Killingsworth และ M. Krstic [7] ได้แนะนำเกี่ยวกับการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด ซึ่งเป็นการจำลองการปรับค่าตัวแปรพีไอดีตามสัญญาณ step response เพื่อให้มีค่าโอเวอร์ชูต(Overshoot) และเวลาเข้าที่(Settling time) ที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปรับค่าตัวแปรแบบอื่นๆ และในปี ค.ศ.2013 E. Hellstrom, D. Lee, A.G. Stefanopoulou และ H. Yilmaz [8] ได้แนะนำวิธีการแสวงหาค่าสุดขีดที่ใช้ในการปรับค่า Spark Timing ในเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงผสม

ในบทความนี้ ส่วนที่ 2 แสดงทฤษฎีของวิธีการแสวงหาค่าสุดขีด(Extremum seeking) ส่วนที่ 3 แสดงอุปกรณ์และการเตรียมการทดลอง ส่วนที่ 4 แสดงผลการทดลอง และบทสรุปในส่วนที่ 5

2. การแสวงหาค่าสุดขีด

การแสวงหาค่าสุดขีด(Extremum seeking) ถูกใช้ในการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีในระบบปิดซึ่งไม่ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และ



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงวิธีการแสวงหาค่าสุดขีด

การทำงานของวิธีการแสวงหาค่าสุดขีดนั้นเป็นดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งค่าตัวแปรขาเข้า $x(t)$ จะถูกรบกวน (Perturbed) โดยสัญญาณ $a \sin(\omega t)$ และค่าเอาต์พุต $y(t)$ จะผ่านตัว high-pass filter, demodulate, low-pass filter, Integrator, Adaptation gain และสุดท้ายบวกเข้ากับค่าเริ่มต้นของระบบ x_0 ซึ่งเป็นผลทำให้ได้ค่าตัวแปรขาเข้าใหม่ออกมา

โดย \hat{x} คือค่าประมาณค่า (Estimate) และ x^* คือตำแหน่งค่าสุดขีด (Extremum point) ดังนั้นเราต้องการให้ $\tilde{x} = \hat{x} - x^*$ มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยค่าเอาต์พุต y จากการใช้การประมาณค่าโดย first-order Taylor's series รอบๆ \hat{x} มีค่าดังนี้ [9]

$$y = f(x) = f(\hat{x} + a \sin(\omega t)) \approx f(\hat{x}) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} a \sin(\omega t)$$

เมื่อผ่านตัว High-pass filter แล้วพจน์ของค่าคงที่ที่จะถูกกำจัดออกไป ดังนั้นผลที่ได้คือ

$$y_h \approx \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} a \sin(\omega t)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \zeta &= y_h \sin(\omega t) \approx \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} a \sin^2(\omega t) \\ &= \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \frac{a}{2} - \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \frac{a}{2} \cos(2\omega t) \end{aligned}$$

ดังนั้นหลังจากผ่าน low-pass filter ซึ่งจะไปกำจัดพจน์ $\cos(2\omega t)$ ก็จะได้ค่าตามนี้คือ

$$y_l \approx \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \frac{a}{2} \quad (1)$$

ดังนั้น

$$\dot{\hat{x}} = \dot{x} = \gamma y_l \quad (2)$$

เมื่อพิจารณา second-order Taylor's series ของ f รอบๆ x^* จะได้

$$\begin{aligned} f(x) &\approx f(x^*) + f'(x^*)(x - x^*) + \frac{1}{2} f''(x^*)(x - x^*)^2 \\ &= f(x^*) + \frac{1}{2} f''(x^*)(x - x^*)^2 \end{aligned}$$

เนื่องจากค่า $f'(x^*) = 0$ เพราะเป็นค่าที่ตำแหน่งสุดขีด (Extremum point) ของ f ดังนั้น

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \approx f''(x^*)(\hat{x} - x^*) \quad (3)$$

เพราะว่า $\dot{\hat{x}} = \dot{x}$ ดังนั้นจากสมการ (1) - (3) จะได้

$$\dot{\hat{x}} \approx \frac{a \gamma f''(x^*)}{2} \tilde{x}$$

โดยที่ \tilde{x} จะวิ่งเข้าหาศูนย์เมื่อกำหนดให้ $a > 0$ สำหรับปัญหาค่าสูงสุด ($f''(x^*) < 0$) หรือ $a < 0$ สำหรับปัญหาค่าต่ำสุด ($f''(x^*) > 0$)

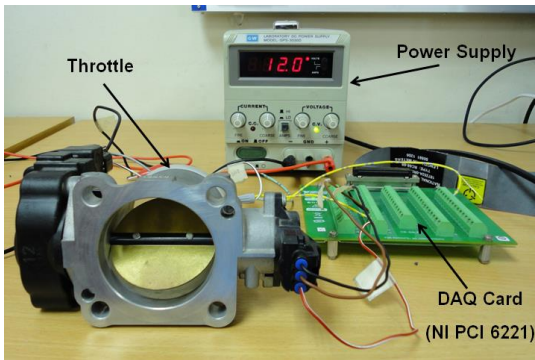
3. การเตรียมการทดลอง

ในการทดลอง มีโปรแกรมที่ใช้ได้แก่โปรแกรม LABVIEW และโปรแกรม MATLAB โดยโปรแกรม LABVIEW นั้นจะสั่งงานและรับสัญญาณกับลินปิกผีเสื้อโดยผ่านอุปกรณ์ NI-DAQmx PCI-6221 ซึ่งสัญญาณขาออกเพื่อไปสั่งงานให้กับลินปิกผีเสื้อเป็นสัญญาณพัลส์ที่ความถี่ 1000 Hz ในส่วนสัญญาณที่รับจากตัวเซนเซอร์ของลินปิกผีเสื้อจะเป็นสัญญาณอนาล็อก โดยอุปกรณ์และการเตรียมการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 2

ระบบการแสวงหาค่าสุดขีดต้องการที่จะทำให้ค่าความผิดพลาดสะสมที่เกิดขึ้นน้อยที่สุดโดยค่าความผิดพลาดสะสมได้จาก

$$J(t) = \int_{t_0}^T e(t) dt$$

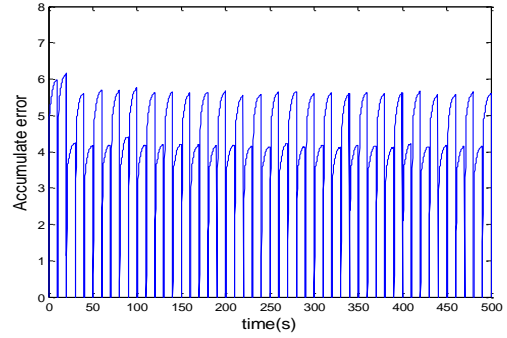
เมื่อ $e(t) = r(t) - y(t)$ และกำหนดให้ค่า $t_0 = 0.5$, $T = 10$ วินาที ส่วนค่าตัวแปรอื่นๆที่ใช้ในบทความนี้ สำหรับการแสวงหาค่าสุดขีดเป็นไปตามนี้คือ $\omega = 2 \text{ rad/s}$, $h = 0.5$ สำหรับ high-pass filter $s/s+h$, $l = 1$ สำหรับ low-pass filter $l/s+l$, ค่าแอมพลิจูดของฟังก์ชัน sine คือ a_{k_p} และ $a_{k_i} = 0.01$ และ Adaptive gain มีค่าคือ $\gamma_{k_p} = -0.45$, $\gamma_{k_i} = -0.35$ ส่วนค่าเริ่มต้นของระบบมีค่าเท่ากับ $x_{0,k_p} = 1$, $x_{0,k_i} = 4.5$



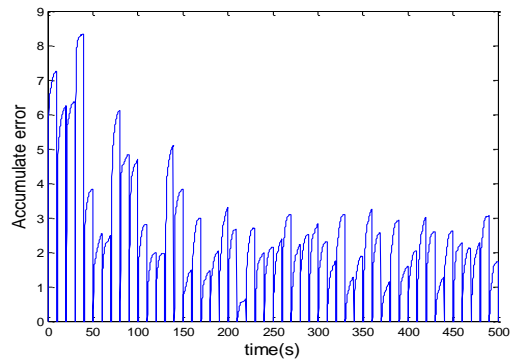
รูปที่ 2 อุปกรณ์และการเตรียมการทดลอง

4. การทดลอง

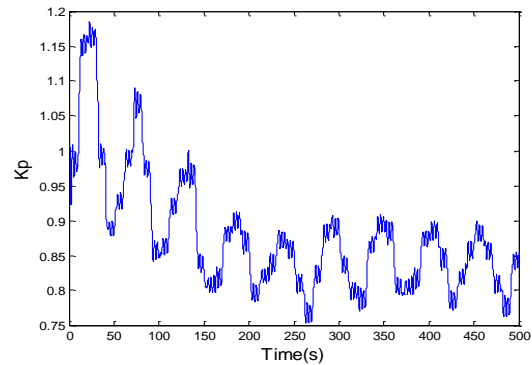
การทดลองจะทำการแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าคงที่ 12 โวลต์ และอีกส่วนหนึ่งคือการทดลองที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลง โดยการทดลองจะทำการควบคุมล้นปีกผีเสื้อให้เคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) ซึ่งเริ่มต้นล้นปีกผีเสื้อจะอยู่ที่ตำแหน่ง 0 องศาอยู่ที่ตำแหน่งนี้นาน 10 วินาทีก็จะเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่ง 50 องศาอยู่ที่ตำแหน่งนี้นาน 10 วินาทีก็จะเคลื่อนที่กลับไปอยู่ที่ตำแหน่ง 0 องศาดังเดิม กำหนดให้การเคลื่อนที่ของล้นปีกผีเสื้อเป็นเช่นนี้วนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลา 500 วินาที ดังนั้นเพื่อดูผลตอบสนองจากการควบคุมด้วยวิธีแสวงหาค่าสุดขีด จะมีการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดสะสมกับระบบควบคุมแบบพีไอ ซึ่งอัตราขยายจะกำหนดไว้ที่ $k_p = 1$ และค่า $k_i = 4.5$



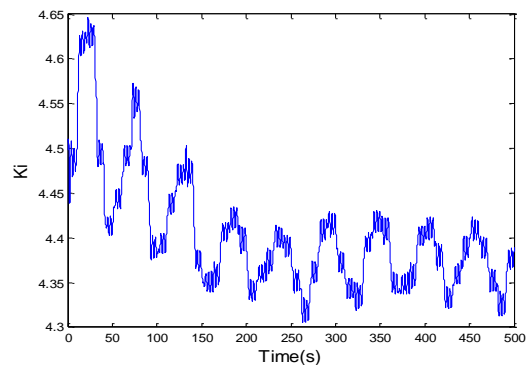
รูปที่ 3 ค่าความผิดพลาดสะสมของการควบคุมแบบพีไอก่อนการใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4 (ก) การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดสะสม (ข) อัตราขยาย k_p ที่เปลี่ยนแปลง (ค) อัตราขยาย k_i ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าคงที่ หลังจากใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด

4.1 แรงดันไฟฟ้าขาเข้าคงที่

ในส่วนนี้จะกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าขาเข้าอยู่ที่ 12 โวลต์คงที่เป็นเวลา 500 วินาที และในขั้นตอนแรกจะใช้การควบคุมแบบพีไอเพื่อจะดูค่าความผิดพลาดสะสมซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดสะสมจะมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงในทุกๆรอบการเคลื่อนที่ของลินปิกผีเสื้อ

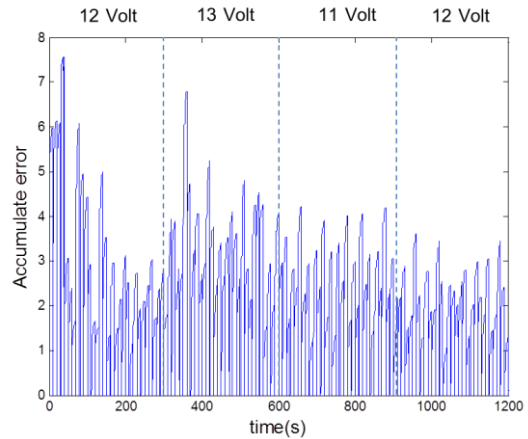
ในส่วนผลจากการทดลองโดยใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 โดยภาพแรกจะเป็นค่าความผิดพลาดสะสมเทียบกับเวลาซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่ามีค่าความผิดพลาดสะสมที่ลดลงจากตอนแรกและค่าจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าน้อยที่สุดประมาณ 3 ซึ่งเป็นค่าน้อยสุดที่ระบบสามารถทำได้ และอีกสองภาพยังแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราขยาย k_p และ k_i ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราขยายมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเพื่อไปหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ระบบเกิดความผิดพลาดสะสมน้อยที่สุด

4.2 แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลง

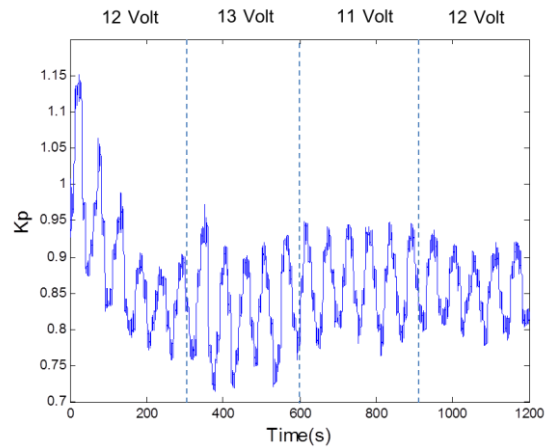
รถยนต์ที่ใช้งานกันโดยทั่วไปนั้นความต่างศักย์จากแหล่งจ่ายไฟมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาโดยสาเหตุอาจเกิดจากรอบของเครื่องยนต์ที่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งส่งผลต่อไดชาร์จ(Alternator) ที่จะประจุไฟเข้าสู่แบตเตอรี่ซึ่งส่งผลให้ความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงไปด้วย หรืออาจเกิดจากโหลดที่มากขึ้น เช่น การเปิดเครื่องปรับอากาศหรือเครื่องเสียงก็ทำส่งผลต่อไดชาร์จซึ่งทำให้ความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน

ในการทดลองส่วนนี้ได้กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าขาเข้าเปลี่ยนแปลงตามนี้คือในตอนเริ่มต้นกำหนดให้มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 12 โวลต์จนกระทั่งในวินาทีที่ 300 เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าจาก 12 โวลต์เป็น 13 โวลต์ ต่อมาในวินาทีที่ 600 เปลี่ยนเป็น 11 โวลต์และในวินาทีที่ 900 จึงเปลี่ยนกลับมาที่ 12 โวลต์ดังเดิม โดยผลจากการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งอัตราขยาย k_p และ k_i มีการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเพราะต้องการ

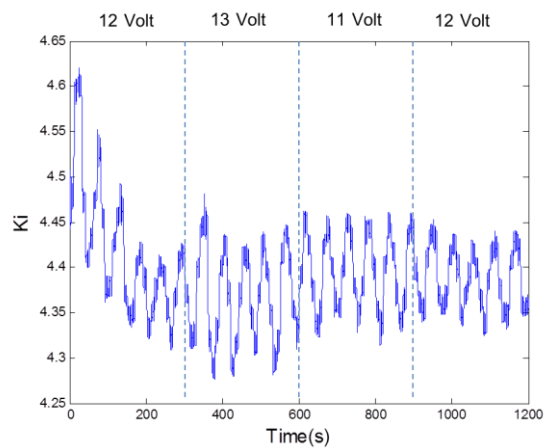
เปลี่ยนแปลงไปสู่ค่าที่ดีที่สุดซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดสะสมมีค่าน้อยที่สุดในขณะที่มีการใช้แรงดันไฟฟ้านั้นๆอยู่



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 (ก) การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดสะสม (ข) อัตราขยาย k_p ที่เปลี่ยนแปลง (ค) อัตราขยาย k_i ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลง หลังจากใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้การควบคุมด้วยวิธีการแสวงหาค่าสุดขีดนั้นทำได้ดีเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบพีไอโดยเฉพาะค่าความผิดพลาดสะสมมีค่าลดลงอย่างมากซึ่งเป็นผลให้การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อเป็นไปอย่างแม่นยำ ในขณะที่การทดลองแบบมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้าระบบควบคุมด้วยวิธีการแสวงหาค่าสุดขีดก็ยังทำได้ดีซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราขยาย k_p และ k_i เพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาดสะสมที่น้อยที่สุดในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้านั้นๆอยู่ จึงเป็นผลให้การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อยังคงมีประสิทธิภาพและความแม่นยำอยู่เสมอแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของลิ้นปีกผีเสื้อก็ตาม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] McKay, D., Nichols, G. and Schreurs, B. (2000). Delphi Electronic Throttle Control Systems for Model Year 2000; Driver Features, System Security, and OEM Benefits. ETC for the Mass Market, SAE World Congress 2000, Detroit, Michigan USA.
- [2] Li, S., Cakmakci, M., Kolmanovsky, I.V. and Ulsoy, A.G. (2009) Throttle Actuator Swapping Modularity Design for Idle Speed Control. American Control Conference 2009, St. Louis, MO, USA.
- [3] Wit, C.C., Kolmanovsky, I. and Sun, J. (2001). Adaptive Pulse Control of Electronic Throttle, American Control Conference 2001, Arlington, VA USA.
- [4] Deur, J., Pavkovic, D., Peric, N., Jansz, D. and Hrovat, D. (2004). An Electronic Throttle Control Strategy Including Compensation of Friction and Limp-Home Effects. IEEE Transactions on Industry Application, vol. 40(3), May/June 2004, pp. 821 - 834.
- [5] Yu, W.E., Wang, D.Y., Zhao, D.X. and Huang, Y.Q. (2012). Study on The Improve Fuzzy Control Strategy of Engine Throttle Position Control System, International Conference on Machine Learning and Cybernetics 2007, Hong Kong
- [6] Krstic, M. and Wang, H.H. (1997). Design and Stability Analysis of Extremum Seeking Feedback for General Nonlinear System, Conference on Decision & Control 1997, San Diego, California USA.
- [7] Killingsworth, N. and Krstic, M. (2005). Auto-Tuning of PID Controllers via Extremum Seeking, American Control Conference 2005, Portland, OR USA.
- [8] Hellstrom, E., Lee, D., Jiang, L., Stefanopoulou, A.G. and Yilmaz, H. (2013). On-Board Calibration of Spark Timing by Extremum Seeking for Flex-Fuel Engines, IEEE Transaction on Control Systems Technology 2013, USA.
- [9] Ariyur, K.B. and Krstic, M. (2003). Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control, John Wiley & Sons, Newyork.