

การเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมพีไอ-พีดีด้วยการค้นหาแบบค้างคาว
เพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมสำหรับการควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้า
A Comparison of PI-PD Controller Designed by Bat Search
to Reduce Set-Point Kick for Temperature Control of an Electric Kettle

دننพล คำน้ญญำ¹ และ นณมล ชูเมื่อง²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี,

E-Mail: danupon.k@rmutsb.ac.th

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง,

E-Mail: lecho20@hotmail.com

วันที่รับบทความ 18 พฤษภาคม 2567

วันแก้ไขบทความ 22 มิถุนายน 2567

วันตอบรับบทความ 26 มิถุนายน 2567

บทคัดย่อ

รูปแบบที่ปรับปรุงตัวควบคุมพีไอดี คือ ตัวควบคุมพีไอ-พีดี โดยทั่วไปตัวควบคุมพีไอดีที่วางตัวอยู่บนทางเดินไปหน้าก่อให้เกิดการขยายตัวของสัญญาณควบคุม ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง บทความนี้ จึงนำเสนอตัวควบคุมพีไอ-พีดีเพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุม ตัวควบคุมพีไอ-พีดีจะมีเทอมพีและเทอมไออยู่ในทางเดินแบบไปหน้าและจะมีเทอมพีและเทอมดีอยู่ในทางเดินแบบป้อนกลับ งานวิจัยนี้ได้ใช้การค้นหาแบบค้างคาวเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอ-พีดีสำหรับการควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้า ผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอ-พีดีจะเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีและตัวควบคุมไอ-พีดีที่ถูกออกแบบด้วยการค้นหาแบบค้างคาว จากผลที่ได้รับพบว่า การค้นหาแบบค้างคาวสามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ไอ-พีดีและพีไอ-พีดีได้อย่างเหมาะสม ตัวควบคุมพีไอ-พีดีจะให้ค่าพุ่งเกินสูงสุดและช่วงเวลาเข้าที่น้อยที่สุดและลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมน้อยกว่าตัวควบคุมพีไอดี

คำสำคัญ: ตัวควบคุมพีไอ-พีดี, ตัวควบคุมไอ-พีดี, ตัวควบคุมพีไอดี, การค้นหาแบบค้างคาว, กาต้มน้ำไฟฟ้า

ABSTRACT

One of the modified versions of the PID controller is the PI-PD controller. Generally, the PID controller is placed on the forward path, causing a very higher control signal called the set-point kick to affect the power of electronic devices. This paper proposes the PI-PD controller in which its P- and I-elements are placed on the forward path, whereas its P- and D-elements are placed on the feedback path. In this work, the bat search (BS) is applied to design the PI-PD controller for controlling the temperature of an electric kettle. Result of the PI-PD controller will be compared to those of the PID and I-PD controllers. As a result,

the BS can design the PID, I-PD, and PI-PD optimally. The PI-PD produces a more minor set-point kick than the PID does. Moreover, the PI-PD can provide minor overshoot and settling time and reduce the set-point kick as the PID does.

KEYWORDS: PI-PD controller, I-PD controller, PID controller, bat search, electric kettle

1. บทนำ

โดยทั่วไป กาต้มน้ำไฟฟ้าเป็นหม้อต้มน้ำให้ร้อนชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างเป็นแบบโลหะสำหรับใช้ต้มน้ำร้อน ฝาครอบและหุ้บมีลักษณะอยู่ในตัว กาต้มน้ำไฟฟ้าถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการต้มน้ำ ชงชา กาแฟปรุงอาหารกึ่งสำเร็จรูปและอื่น ๆ เป็นต้น กาต้มน้ำไฟฟ้าสามารถทำความเร็วในการต้มน้ำให้ร้อนได้เร็วที่สุด โดยมีความเร็วเกือบสองเท่าของเตาต้มน้ำร้อนแบบตั้งพื้น หลายปีที่ผ่านมามีปัญหาของการควบคุมอุณหภูมิเป็นปัญหาที่ท้าทายมาตลอดโดยเฉพาะกับระบบควบคุม เครื่องใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีการควบคุมอุณหภูมิในรูปแบบเดียวหรือในรูปแบบอื่น ๆ แต่ยังคงใช้วิธีการควบคุมแบบง่าย ๆ เช่น การควบคุมแบบเปิด-ปิดสำหรับกาต้มน้ำไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิที่โดดเด่น คือ การควบคุมแบบเปิด-ปิดโดยใช้เทอร์โมสแตท (Thermostat) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำด้วยกาต้มน้ำไฟฟ้าจะมีค่าพลังงานสูงมากกว่าในการต้มน้ำชนิดเดียวกันแบบตั้งพื้น ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องพัฒนาระบบควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียพลังงานและต้นทุนที่ใช้กาต้มน้ำไฟฟ้า

วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี (Proportional-Integral-Derivative Controller: PID Controller) Minorsky N. (1922), Pessen D. W. (1996) ให้กับกาต้มน้ำไฟฟ้า จึงนิยมใช้แนวทางการออกแบบที่ยึดถือเป็นแนวปฏิบัติโดยทั่วไป คือ การออกแบบเชิงวิเคราะห์ (Analytical Design Method) หรืออาจอาศัยสูตรสำเร็จในการคำนวณ เช่น วิธีของซีเกลอร์และนิโคลส์ (Ziegler-Nichols Method: ZN) Ziegler J. G. and Nichols N. B. (1942) ซึ่งวิธีดังกล่าวจะให้ความสะดวกต่อวิศวกรในภาคปฏิบัติการ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์มักประสบปัญหาเกี่ยวกับข้อจำกัดของระบบภายใต้การควบคุมกระบวนการ ระบบควบคุมที่ผ่านการออกแบบแล้วจะให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่พอยอมรับได้ แต่ไม่อาจกล่าวได้ว่าเป็นผลตอบสนองที่เหมาะสม จึงทำให้การออกแบบระบบควบคุมที่อาศัยวิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์มีข้อจำกัด โดยทั่วไป ตัวควบคุม PID ที่วางตัวอยู่บนทางเดินป้อนไปหน้า (Forward Path) ของระบบ จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อสัญญาณควบคุม (Control Signal) นั่นคือ เทอม P และ D ในตัวควบคุม PID จะมีหน้าที่ปรับค่าแบบสัดส่วน (Proportional) และค่าอนุพันธ์ (Derivative) ของสัญญาณอินพุต

ในขณะที่ สัญญาณอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดก่อให้เกิดสัญญาณควบคุมที่มีค่าสูง เรียกว่า การขยายตัวของสัญญาณควบคุม (Set-Point Kick) ในการแก้ปัญหาเพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุม ก็คือ ใช้ตัวควบคุม I-PD (I-PD Controller) Sato T. and Inoue A. (2004) มีเทอม I ที่วางตัวอยู่ในทางเดินแบบป้อนไปหน้าและเทอม P และ D วางตัวอยู่ในทางเดินแบบป้อนกลับ (Feedback Path) ของวงรอบการควบคุม จากการสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ตัวควบคุม I-PD สามารถลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมได้อย่างน่าพอใจ อย่างไรก็ตาม ผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของระบบที่ใช้ตัวควบคุม I-PD ให้ผลตอบสนองช้ากว่าที่ใช้ตัวควบคุม PID ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอตัวควบคุม PI-PD เพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมและเพื่อปรับปรุงผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของระบบควบคุม ตัวควบคุม PI-PD ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีเทอม P และ I ที่วางตัวอยู่ในทางเดินแบบป้อนไปหน้า และมีเทอม P และ D วางตัวอยู่ในทางเดินแบบป้อนกลับของวงรอบการควบคุม

ปัจจุบันกรอบการทำงานได้ปรับเปลี่ยนกระบวนการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติก (Metaheuristic Optimization Search Techniques) Talbi E. G. (2009) ที่ได้รับความนิยมและใช้อย่างแพร่หลาย Yang X. S. (2010, 1) จากการสำรวจผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ในบรรดาของเทคนิคแบบเมตา-ฮิวริสติกที่มีการพัฒนาการค้นหาค่าเหมาะที่สุด (Bat Search: BS) นับว่าเป็นเมตา-ฮิวริสติกที่ทรงประสิทธิภาพมาก โดยให้สมบัติความหลากหลาย

(Diversification) และสมบัติความเข้มข้น (Intensification) ดีกว่าเมตา-ฮิวริสติกในแบบอื่น ๆ ได้รับการนำเสนอครั้งแรกโดย Yang เมื่อปี ค.ศ. 2010 Yang X. S. (2010, 2) ที่ได้รับแรงบันดาลใจจากค้างคาวที่มีพฤติกรรมการสะท้อนคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonar) ของค้างคาวที่มีการปล่อยพัลส์และความถี่ที่แตกต่างกัน (Echolocation) จากวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่า BS ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมด้านต่าง ๆ เช่น การออกแบบคานเชื่อมประกอบ (Design of Welded Beam) Yang X. S. (2011) การออกแบบภาชนะรับแรงดัน (Design of Pressure Vessel) การออกแบบสปริง (Design of Spring) Tsai P. W. et al. (2011) ภายใต้อัจฉริยภาพที่สำคัญในการควบคุม คือ ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Overshoot: M_p) ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time: t_r) ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time: t_s) ค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (Steady-State Error: e_{ss}) ความคงทน (Robustness) จากเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์และการรบกวนจากภายนอก (External Disturbance: t_d) ของระบบควบคุมที่ทดสอบ ในงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PI-PD ด้วย BS เพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมสำหรับการควบคุมอุณหภูมิของกาดม้ไฟฟ้า ผลการออกแบบตัวควบคุม PI-PD จะได้รับการเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID และ I-PD ที่ออกแบบด้วย BS เช่นเดียวกัน

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกาดม้ไฟฟ้า

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกาดม้ไฟฟ้า Madugu J. S. (2018) ซึ่งสามารถหาได้โดยให้สมมติอุณหภูมิของน้ำที่อยู่ภายในกาดม้ไฟฟ้ามีค่าสม่ำเสมอ และอุณหภูมิภายนอกของระบบมีค่าคงที่ ใช้กฎข้อหนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (First Law of Thermodynamics) Stphanopoulos G. (2006) แสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$C_T \frac{dT_w}{dt} = q(t) - q_o(t) \quad (1)$$

โดยที่ C_T คือ ความจุความร้อนของระบบ (Thermal Capacity of System) ($J / ^\circ C$)

$q_o(t)$ คือ การสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม (Heat Loss to Environment) (J), $q_o(t) = \frac{(T_w - T_a)}{R_T}$

T_a คือ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (Ambient Temperature) ($^\circ C$)

R_T คือ ความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance) ($^\circ C / J$)

T_w คือ อุณหภูมิของน้ำ (Temperature of Water) ($^\circ C$)

$q(t)$ คือ ความร้อนที่ถูกจ่ายโดยอุปกรณ์ทำความร้อน (Heat Supplied by Heater) (J)

แทนค่า $q_o(t) = \frac{(T_w - T_a)}{R_T}$ ลงในสมการที่ (1) แสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$C_T \frac{dT_w}{dt} = q(t) - \frac{(T_w - T_a)}{R_T} \quad (2)$$

$$\frac{dT_w}{dt} + \frac{T_w}{R_T C_T} = \frac{q(t)}{C_T} + \frac{T_a}{R_T C_T} \quad (3)$$

ผลการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) สมการที่ (3) แสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$sR_T C_T T_w(s) + T_w(0) + T_w(s) = Q(s)R_T + T_a(s) \quad (4)$$

แต่อุณหภูมิสภาพแวดล้อมคงที่ $T_w(0) = T_a(s)$ สมการที่ (4) แสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$G(s) = \frac{T_w(s)}{Q(s)} = \frac{R_T}{(R_T C_T s + 1)} \quad (5)$$

โดยที่ $R_T C_T$ คือ ค่าคงตัวทางเวลาของกระบวนการ (Time Constant of Process: τ_g)

R_T คือ ค่าอัตราขยายของกระบวนการ (Process of Gain: K_g)

ในทางปฏิบัติ พบว่า มีค่าเวลาไร้ผลสนอง (Dead Time: L) สามารถเขียนอยู่ในรูปของ e^{-Ls} โดยที่ เวลาไร้ผลสนอง e^{-Ls} ใช้การประมาณแบบพาดอันดับหนึ่ง (Pade Approximation-Order 1) จากสมการที่ (5) จึงก่อรูปเป็นสมการที่ (6)

$$G_p(s) = \frac{K_g}{(\tau_g s + 1)} e^{-Ls} ; e^{-Ls} \cong \frac{1 - Ls/2}{1 + Ls/2} \quad (6)$$

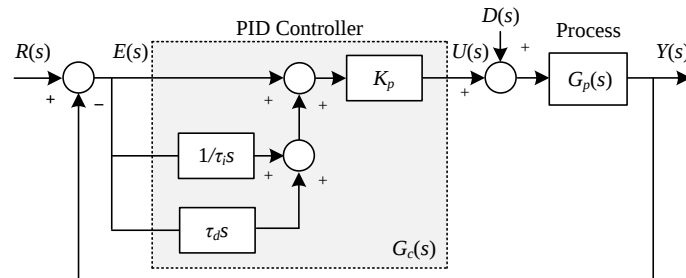
จากสมการที่ (6) ผลตอบสนองวงเปิดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่า มีค่าอัตราขยายของกระบวนการ $K_g = 1.03$ มีค่าคงตัวทางเวลาของกระบวนการ $\tau_g = 282.0$ นาที่ และมีค่าเวลาไร้ผลสนอง $L = 19.8$ นาที่ เขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกาดม้ไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$G_p(s) = \frac{-20.394s + 1.03}{5583.6s^2 + 301.8s + 1} \quad (7)$$

3. ปัญหาการออกแบบระบบควบคุม

3.1 ระบบควบคุมพีไอดี

โครงสร้างของระบบควบคุม PID ดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวควบคุม $G_c(s)$ จะรับสัญญาณคลาดเคลื่อน $E(s)$ มาผลิตสัญญาณควบคุม $U(s)$ เพื่อส่งไปควบคุมกระบวนการ $G_p(s)$ ให้มีผลตอบสนองด้านเอาต์พุต $Y(s)$ สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ พร้อมทั้งกำจัดสัญญาณรบกวนจากภายนอก $D(s)$ ไปพร้อมกัน



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบควบคุม PID

จากรูปที่ 1 ฟังก์ชันในโดเมนเวลา (Time-Domain) และในโดเมนเอส (s-Domain) ของตัวควบคุม PID แสดงได้ดังสมการที่ (8) และสมการที่ (9) โดยที่ K_p คือ อัตราขยายเชิงปรับสัดส่วน (Proportional Gain) $K_i = K_p / \tau_i$ คือ อัตราขยายเชิงปริพันธ์ (Integral Gain) และ $K_d = K_p \tau_d$ คือ อัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative Gain)

$$u(t)|_{PID} = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

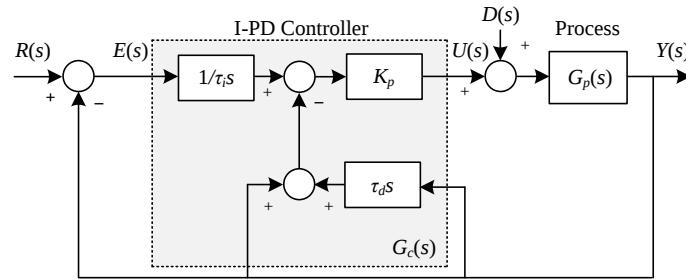
$$\frac{Y(s)}{R(s)} \Big|_{PID} = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G_p(s)}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G_p(s)} \quad (9)$$

เป้าหมายของการควบคุม คือ การให้ผลตอบสนองด้านเอาต์พุต $Y(s)$ สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ ด้วยเหตุนี้ ตัวควบคุมจะต้องปรับค่าสัญญาณควบคุม $U(s)$ อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สัญญาณคลาดเคลื่อน $E(s)$

มีค่าเป็นศูนย์ และกำจัดสัญญาณรบกวนจากภายนอก $D(s)$ ไปพร้อมกัน การใช้ตัวควบคุม PID เมื่อสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด จะทำให้สัญญาณควบคุม $U(s)$ มีขนาดที่สูงมาก ซึ่งเรียกว่า การขยายตัวของสัญญาณควบคุม (Set-Point Kick) ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ชุดขับเคลื่อน (Actuator) ของระบบเกิดการอิ่มตัว (Saturation) ผลตอบสนองด้านเอาต์พุต $Y(s)$ จึงไม่สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$

3.2 ระบบควบคุมไอ-พีดี

ระบบควบคุม I-PD จะเป็นการปรับโครงสร้างของระบบควบคุม PID เพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุม ระบบควบคุม I-PD จะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2 เทอม I อยู่บนทางเดินป้อนไปหน้า ส่วนในเทอม P และ D อยู่บนทางเดินป้อนกลับของวงรอบการควบคุม โดยที่ โครงสร้างอัตราขยายเชิงปริพันธ์ $K_i = K_p / \tau_i$ จะมีผลตอบสนองต่อสัญญาณค่าความผิดพลาด $E(s)$ การเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดจากการป้อนสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ จะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราขยายเชิงสัดส่วน K_p และอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ $K_d = K_p \tau_d$ เพราะถูกควบคุมจากเอาต์พุต $Y(s)$ ของระบบควบคุม



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบควบคุม I-PD

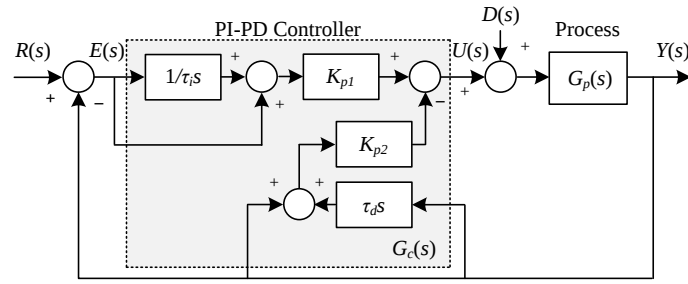
จากรูปที่ 2 ฟังก์ชันโดเมนเวลาและโดเมนเอสของตัวควบคุม I-PD แสดงได้ดังสมการที่ (10) และสมการที่ (11) อย่างเป็นทางการ ระบบที่ใช้ตัวควบคุม I-PD มักจะให้ผลตอบสนองชั่วคราวที่ช้ากว่าการใช้ตัวควบคุม PID

$$u(t)|_{I-PD} = K_i \int e(t) dt - \left(K_p y(t) + K_d \frac{dy(t)}{dt} \right) \quad (10)$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} \Big|_{I-PD} = \frac{\left(\frac{K_i}{s} \right) G_p(s)}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G_p(s)} \quad (11)$$

3.3 ระบบควบคุมพีไอ-พีดี

ในงานวิจัยนี้ การลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมและปรับปรุงผลตอบสนองชั่วคราวของระบบ อาศัยโครงสร้างของระบบควบคุม PI-PD ดังรูปที่ 3 เทอม P_1 และ I อยู่บนทางเดินป้อนไปหน้า ส่วนเทอม P_2 และ D อยู่บนทางเดินป้อนกลับในวงรอบการควบคุม เมื่อสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด จะไม่ทำให้สัญญาณควบคุม $U(s)$ มีขนาดที่เพิ่มสูงมาก อัตราขยายเชิงสัดส่วน K_{p1} และอัตราขยายเชิงปริพันธ์ $K_i = K_{p1} / \tau_i$ จะมีผลตอบสนองต่อสัญญาณค่าความผิดพลาด $E(s)$ การเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดจากการป้อนสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ จะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราขยายเชิงสัดส่วน K_{p2} และอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ $K_d = K_{p2} \tau_d$ เพราะถูกควบคุมจากเอาต์พุต $Y(s)$ ฟังก์ชันโดเมนเวลาและโดเมนเอสของตัวควบคุม PI-PD แสดงได้ดังสมการที่ (12) และสมการที่ (13)



รูปที่ 3 โครงสร้างของระบบควบคุม PI-PD

$$u(t)|_{PI-PD} = K_{p1}e(t) + K_i \int e(t)dt - \left(K_{p2}y(t) + K_d \frac{dy(t)}{dt} \right) \quad (12)$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)}|_{PI-PD} = \frac{\left(K_{p1} + \frac{K_i}{s} \right) G_p(s)}{1 + \left(K_{p1} + K_{p2} + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G_p(s)} \quad (13)$$

4. การค้นหาแบบค้างคาว

การค้นหาแบบค้างคาวเลียนแบบพฤติกรรมการสะท้อนคลื่นเสียงความถี่สูงของค้างคาวขนาดเล็กที่มีการปล่อยพัลส์และความถี่ที่แตกต่างกัน ค้างคาวขนาดเล็กเป็นสัตว์เลือดอุ่นที่เลี้ยงลูกด้วยนมมีลักษณะคล้ายหนู แต่มีปีกบินได้เหมือนนก ค้างคาวมีดวงตาที่เรามองเห็นขนาดเล็กมาก จมูกและปากของค้างคาวจะทำหน้าที่ช่วยบังคับควบคุมคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเพื่อใช้ในการนำทางและค้นหาอาหาร ค้างคาวไม่ได้อาศัยตาในการมองเห็นขณะบินในที่มืด หากแต่จะเคลื่อนที่ในขณะบินเข้าหาแหล่งอาหารตามเสียงสะท้อนที่ถูกปล่อยออกมาด้วยคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงอย่างเป็นจังหวะและสม่ำเสมอ

คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงของมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน แต่หูของค้างคาวซึ่งมีความไวสูงมากจะสามารถตรวจจับคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงที่ส่งออกไปกระทบกับวัตถุใด ๆ แล้วสะท้อนกลับมายังหูของค้างคาวได้ ทำให้ค้างคาวสามารถรับรู้ถึงตำแหน่งและระยะห่างของสิ่งกีดขวางจากเสียงที่สะท้อนกลับมาได้ จึงทำให้ค้างคาวบินได้อย่างคล่องแคล่วว่องไวแม้อยู่ในความมืดโดยไม่พุ่งชนสิ่งกีดขวางรอบตัว รวมทั้งทำการตรวจสอบตำแหน่งของสิ่งที่เป็อาหาร (เหยื่อ) ในระยะทางต่าง ๆ ได้อีกด้วย ดังนั้น อัลกอริทึมแบบค้างคาวจึงอาศัยกลไกที่สำคัญ 3 ข้อ ดังต่อไปนี้ คือ

1) ค้างคาวสามารถค้นหาตำแหน่งของวัตถุโดยใช้เสียงสะท้อนกลับ เพื่อรับรู้ถึงระยะทางความแตกต่างระหว่างอาหาร (เหยื่อ) และสิ่งกีดขวาง กำหนดให้ปริภูมิการค้นหาเป็น d มิติ และค้างคาวตัวที่ i สามารถแทนด้วย x_i ความเร็วของค้างคาวตัวที่ i สามารถแทนด้วย v_i ความถี่พัลส์ของค้างคาวตัวที่ i สามารถแทนด้วย f_i ตำแหน่ง (ผลเฉลย) ใหม่ x_i^t และความเร็วใหม่ v_i^t ในช่วงเวลา t การปรับปรุงความถี่พัลส์จะอาศัยสมการที่ (14) ถึง สมการที่ (16) เมื่อ $\beta \in [0,1]$ คือ เวกเตอร์จากการสุ่ม (Random Vector) จากการแจกแจงแบบปกติ (Uniform Distribution) x_* คือ ผลเฉลยงกว้าง (Global Solution) ในรอบปัจจุบัน เมื่อเทียบกับผลเฉลยทั้งหมดของค้างคาว n ตัว และ t คือ รอบการค้นหาปัจจุบัน การค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) ผลเฉลยใหม่จะถูกสร้างขึ้นจากผลเฉลยงกว้างที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบันดังสมการที่ (17) เมื่อ $\varepsilon \in [0,1]$ คือ จำนวนการสุ่ม (Random Number) โดยที่ $A^t = (A_i^t)$ คือ ความดังเสียงเฉลี่ยทั้งหมดที่ช่วงเวลานั้น

$$f_i = f_{\min} + \beta(f_{\max} - f_{\min}) \quad (14)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + f_i(x_i^{t-1} - x_*) \quad (15)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (16)$$

$$x_{\text{new}} = x_{\text{old}} + \varepsilon A^t \quad (17)$$

2) ค้างคาวมีทิศทางบินสุ่ม (Randomly) ด้วยความเร็ว v_i ในตำแหน่ง x_i ด้วยความถี่คงที่ $f_{\min}$ โดยเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น λ และความดังของเสียง A_0 เพื่อค้นหาอาหาร (เหยื่อ) และสามารถปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นของพัลส์ที่ปล่อยมาและปรับอัตราการปล่อยพัลส์ (Pulse Emission: r) โดยที่ $r \in [0,1]$ โดยปกติขึ้นอยู่กับระยะห่างเป้าหมาย การปล่อยพัลส์จะเริ่มจากศูนย์และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อค้างคาวบินเข้าใกล้อาหาร (เหยื่อ) เพิ่มมากขึ้น อัตราการปล่อยพัลส์ของค้างคาวจะถูกปรับเปลี่ยนไปตามสมการที่ (18)

$$r_i^{t+1} = r_i^0(1 - e^{(-rt)}) \quad (18)$$

3) ความดังเสียงค้างคาวสามารถเปลี่ยนแปลงได้หลายรูปแบบ ความดังเสียงจะเปลี่ยนแปลงจากความดังเสียงสูงที่สุด A_0 ไปยังค่าคงที่ต่ำที่สุด $A_{\min}$ และความดังจะลดเรื่อย ๆ เมื่อค้างคาวบินเข้าใกล้อาหาร (เหยื่อ) เพิ่มมากขึ้น ความดังเสียงจะถูกปรับเปลี่ยนตามสมการที่ (19)

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (19)$$

จากกลไกที่สำคัญ 3 ข้อ ข้างต้น เขียนรหัสจำลองแสดงขั้นตอนวิธี (Pseudo Codes) ของการค้นหาแบบค้างคาว (BS) ดังแสดงในรูปที่ 4

Initialized:

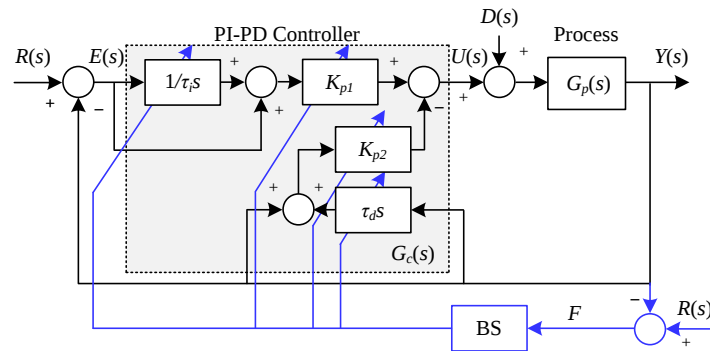
- Objective function $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$
- Initialize the bat population $x_i = (i = 1, 2, \dots, n)$ and v_i
- Define pulse frequency f_i at x_i
- Initialize pulse rate r_i and the loudness A_i
- while** ($t < \text{Max_Gen}$) or (Termination Criteria: TC)
 - Generate new solutions by adjusting frequency
 - Update velocities and locations/solutions by using (14) - (16)
 - if** ($\text{rand} > r_i$)
 - Select as solution among the best solutions
 - Generate a local solution around the selected best solution
 - else if**
 - Generate a new solution by flying randomly
 - if** ($\text{rand} < A_i \ \& \ f(x_i) < f(x_*)$)
 - Accept the new solutions
 - Increase r_i and reduce A_i
 - end if**
 - Rank the bats and find the current best x_*
- End while**
- Report the best solution found

รูปที่ 4 รหัสจำลองแสดงขั้นตอนวิธีของ BS Yang X. S. (2010, 2)

5. การออกแบบระบบควบคุมพีไอ-พีดีด้วยการค้นหาแบบค้างคาว

การออกแบบตัวควบคุม PI-PD ด้วย BS แสดงได้ดังรูปที่ 5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function: F) กำหนดได้จากผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Sum-Squared Error: SSE) ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ และสัญญาณเอาต์พุต $Y(s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (20) ค่าพารามิเตอร์ K_{p1} , K_{p2} , K_i และ K_d ที่เหมาะสม สามารถหาจากการป้อนค่า F ให้กับ BS เพื่อให้มีค่าน้อยที่สุดและสอดคล้องกับเงื่อนไขสมการดังแสดงในสมการที่ (20) เมื่อ M_p คือ ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Overshoot) และ e_{ss} คือ ค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (Steady-State Error)

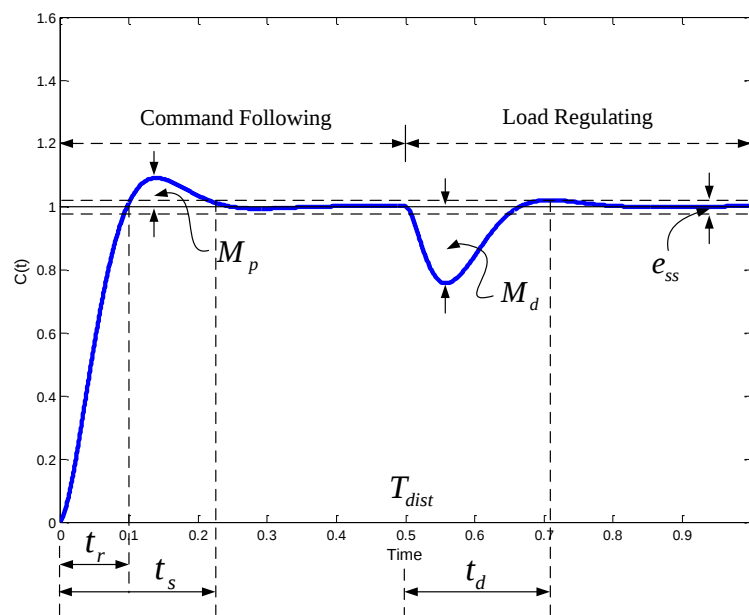
$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} \quad F(K_p(K_{p1}), K_{p2}, K_i, K_d) = \sum_{i=1}^N [r(i) - y(i)]^2 \\
 &\text{subject to} \quad \left. \begin{aligned}
 t_r &\leq 400 \text{ sec}, \\
 M_p &\leq 20\%, \\
 e_{ss} &\leq 0.1\%, \\
 0 &\leq K_p(K_{p1}) \leq 5.0, \\
 0 &\leq K_{p2} \leq 5.0, \\
 0 &\leq K_i \leq 0.5, \\
 30 &\leq K_d \leq 50
 \end{aligned} \right\} \quad (20)
 \end{aligned}$$



รูปที่ 5 การออกแบบระบบควบคุม PI-PD ด้วย BS

6. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

ผลตอบสนองของระบบในโดเมนเวลาสามารถแบ่งออกเป็นผลตอบสนองเชิงแปรตามอินพุต (Command Following) หรือ การเฝ้าติดตามอินพุต (Input Tracking) และผลตอบสนองเชิงคุมค่าโหลด (Load Regulating) หรือ การรบกวน (Disturbance) ดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อ t_r คือ ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) M_p คือ ค่าพุ่งเกินสูงสุด t_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) M_d คือ ขนาดสูงสุดของผลตอบสนองที่เกิดจากการรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงโหลด (Maximum of Disturbance Response or Load Regulation) และ t_d คือ ช่วงเวลาการกำจัดกรรบกวน (Disturbance Rejection) โดยที่ e_{ss} คือ ค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว

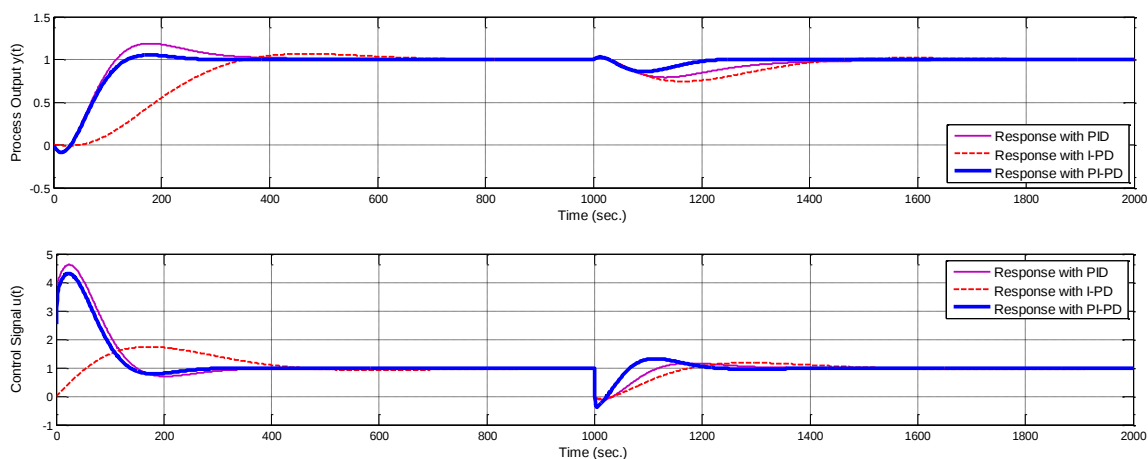


รูปที่ 6 ผลตอบสนองของระบบในโดเมนเวลา

ขั้นตอนวิธีของ BS ได้รับการพัฒนาเป็นโปรแกรมการค้นหา MATLAB/SIMULINK บนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลางขนาด 2 แกน ที่มีสัญญาณนาฬิกา 2 กิกะเฮิรตซ์ และมีหน่วยความจำหลักชนิด DDR3 ความจุ 3 กิกะไบต์ คาบเวลาสุ่ม (Sampling Time) 1 มิลลิวินาที เพื่อออกแบบตัวควบคุม PI-PD อย่างเหมาะสม สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของ กาดัมน้ำไฟฟ้า การหาค่าพารามิเตอร์ของ BS ในเบื้องต้นทำได้ดังนี้ จำนวนของค่าความ $n = 20$ ความถี่ $f_{\min} = 0.0$ และ $f_{\max} = 2.0$ ความดังของเสียง $A_0 = 0.5$ อัตราการปล่อยพัลส์ $r_0 = 0.5$ และ $\alpha = \gamma = 0.9$ จำนวนรอบสูงสุด (Max_Gen) = 1000 ให้เป็นเกณฑ์ยุติการค้นหา (Termination Criteria หรือ TC) การออกแบบจะดำเนินการค้นหาทั้งหมด 40 ตัวอย่าง กับการสุ่มผลเฉลยเริ่มต้นแบบต่าง ๆ เพื่อที่ได้รับผลเฉลยที่ดีที่สุด ดังนั้น ผลการออกแบบตัวควบคุม PI-PD จะได้รับการเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID และ I-PD ที่ออกแบบด้วย BS ภายใต้เงื่อนไขของการกำหนดขอบเขต ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F จากสมการที่ (20) เมื่อยุติการค้นหาจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI-PD อย่างเหมาะสมสำหรับการควบคุมอุณหภูมิของกาดัมน้ำไฟฟ้างแสดงในตารางที่ 1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมดังแสดงในรูปที่ 7 และสมรรถนะของระบบควบคุมดังแสดงในตารางที่ 2 โดยที่ ช่วงเวลาขึ้น t_r คิดที่ 0 ถึง 100% ของค่าสุดท้าย ช่วงเวลาเข้าที่ t_s คิดที่ $\pm 2\%$ ของค่าสุดท้าย และช่วงเวลากำจัดการรบกวน t_d คิดที่ $\pm 2\%$ ของค่าสุดท้าย ในทางปฏิบัติ เวลาไร้ผลสนอง e^{-sL} ใช้การประมาณแบบพาเด อย่างไรก็ตาม การประมาณแบบพาเดทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบปรากฏซีโร (Zero) ทางด้านขวาของระนาบเอส ผลตอบสนองแบบขึ้นบันไดของระบบที่ได้รับการประมาณแบบพาเดมีการพุ่งลงต่ำไปด้านลบ (Negative Undershoot) ที่บริเวณใกล้ ๆ เวลา $t = 0$ ดังปรากฏในรูปที่ 7

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID I-PD และ PI-PD ที่ถูกออกแบบด้วย BS

Control Structures	Parameters				
	K_{p1}	K_{p2}	K_p	K_i	K_d
PID	—	—	3.8040	0.0225	0.1262
I-PD	—	—	2.2537	0.0179	2.7952
PI-PD	2.5359	4.0112	—	0.0676	49.6566



รูปที่ 7 ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID I-PD และ PI-PD ที่ถูกออกแบบด้วย BS

ตารางที่ 2 สมรรถนะของตัวควบคุม PID I-PD และ PI-PD ที่ถูกออกแบบด้วย BS

Control Structures	System Responses						
	t_r (sec.)	M_p (%)	t_s (sec.)	e_{ss} (%)	M_d (%)	t_d (sec.)	e_{ss} (%)
PID	116.26	18.77	400.02	0.00	20.98	445.50	0.00
I-PD	355.04	6.62	656.05	0.00	25.65	427.36	0.00
PI-PD	137.15	5.24	237.05	0.00	14.21	202.50	0.00

จากตารางที่ 1 ตารางที่ 2 และรูปที่ 7 พบว่า ตัวควบคุม PID ให้ผลตอบสนองชั่วครู่ดีกว่าตัวควบคุม I-PD และ PI-PD อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุม PI-PD ให้ผลตอบสนองเชิงแปรตามอินพุต มีค่าพุงเกินสูงสุด $M_p = 5.24\%$ และช่วงเวลาเข้าที่ $t_s = 237.05$ วินาที น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาการขยายตัวของสัญญาณควบคุมพบว่า ตัวควบคุม PI-PD ลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมได้น้อยกว่าตัวควบคุม PID นอกจากนี้ เมื่อการรบกวนเข้ามาในระบบ $d(t)=1$ เวลา 1000 วินาที ตัวควบคุม PI-PD ให้ผลตอบสนองเชิงการรบกวน มีขนาดสูงสุดของผลตอบสนองที่เกิดจากการรบกวน $M_d = 14.21\%$ และช่วงเวลาจำกัดการรบกวน $t_d = 202.50$ วินาที น้อยที่สุด โดยไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว e_{ss}

7. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุม PI-PD ด้วย BS เพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมสำหรับการควบคุมอุณหภูมิของกาดำน้ำไฟฟ้า จากผลการทดสอบการออกแบบตัวควบคุม PID I-PD และ PI-PD ด้วย BS

พบว่า BS สามารถออกแบบตัวควบคุม PID I-PD และ PI-PD ได้อย่างเหมาะสม ตัวควบคุม PI-PD จะให้ค่าพุ่งเกินสูงสุดและช่วงเวลาเข้าที่น้อยที่สุด และลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมน้อยกว่าตัวควบคุม PID

8. เอกสารอ้างอิง

- Madugu J. S. (2018). Modeling and Simulation of Proportional-Integral-Derivative (PID) Temperature Controller for an Electric Kettle. *International Journal of Engineering, Science and Mathematic* 7(9), 15–20.
- Minorsky, N. (1922). Directional stability of automatically steered bodies. *American Society of Naval Engineering*, 34, 284.
- Pessen, D. W. (1996). A New Look at PID Controller Tuning. *Trans. of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Sept., (116), 553–557.
- Sato T. and Inoue A. (2004). A Design Method of Multirate I-PD Controller based on Multirate Generalized Predictive Control Law. *In Proc. SICE Annual Conference*, 17–22.
- Stphanopoulos, G. (2006). *Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice*. Prentice-Hall of India, New Delhi.
- Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics form Design to Implementation*. John Wiley & Sons.
- Tsai, P. W., Pan, J. S., Liao, B. Y., Tsai, M. J., & Istanda, V. (2011). Bat algorithm inspired algorithm for solving numerical optimization problems. *Applied Mechanics and Materials*, (148–149), 134–137.
- Yang, X. S. (2010, 1). *Engineering Optimization, An Introduction with Metaheuristic Applications*. John Wiley & Sons.
- Yang, X. S. (2010, 2). A new metaheuristic bat-inspired an algorithm. *In: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO2010) (Eds. J. R. Gonzalez et al.) Studies in Computational Intelligence*, Springer Berlin, 284, Springer, 65–74.
- Yang, X. S. (2011). Bat algorithm for multi-objective optimization. *Int. J. Bio-Inspired Computation*. 3(5), 267–274.
- Ziegler J. G. and Nichols N. B. (1942). Optimum Settings for Automatic Controllers. *In Trans. of the ASME*, (64), 759–768.