

# การออกแบบตัวควบคุม PIDA ที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึม ที่ได้รับแรงบันดาลใจจากค้างคาว สำหรับควบคุมอุณหภูมิของระบบเตาไฟฟ้า

จุฬารณย์ ม่วงดิษฐ์<sup>1</sup> กิตติศักดิ์ ฤาแรง<sup>2\*</sup>

<sup>1,2\*</sup> คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น, กาญจนบุรี, ประเทศไทย

\*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : kitiskak.l@western.ac.th

รับต้นฉบับ : 20 กันยายน 2566; รับบทความฉบับแก้ไข : 26 ตุลาคม 2566; ตอรับบทความ : 15 พฤศจิกายน 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 28 มิถุนายน 2567

## บทคัดย่อ

ระบบควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมไฟฟ้าเป็นระบบอันดับสองที่มีการประวิงเวลา (Second-Order System Plus Time Delay: SOSPD) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรม โดยปกติจะดำเนินการภายใต้รูปแบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID แต่อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุม PIDA ยังให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุม PID สำหรับโรงงานที่มีลำดับสูงกว่า ในวิจัยนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PIDA ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า เกี่ยวกับบริบทการเพิ่มประสิทธิภาพที่ทันสมัย ด้วยอัลกอริทึมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากค้างคาว (BA) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพเมตาฮิวริสติก ตามประชากรที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดถูกนำไปใช้เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ของ PIDA ที่เหมาะสม เปรียบเทียบในการออกแบบ PIDA ที่ออกแบบโดย BA ที่เสนอถือเป็นปัญหาการปรับให้เหมาะสมที่มีข้อจำกัด การตอบสนองของระบบที่ได้รับจากคอนโทรลเลอร์ PIDA ที่ออกแบบโดย BA จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ การตอบสนองที่ได้รับจากคอนโทรลเลอร์ PIDA ด้วย จากผลการวิจัยพบว่า PIDA ที่ออกแบบด้วย BA สามารถติดตามและควบคุมการตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิเตาไฟฟ้าที่เหนือกว่า PIDA ได้อย่างน่าพอใจอย่างมาก

**คำสำคัญ :** การควบคุมอุณหภูมิเตาไฟฟ้า การเพิ่มประสิทธิภาพเมตาฮิวริสติก ตัวควบคุมพีไอดีเอ



# Optimized PIDA Controller Design with Bat-inspired Algorithm for Temperature Control of Electric Furnace System

Chulaphorn Muangdit<sup>1</sup> Kittisak Lurang<sup>2\*</sup>

<sup>1,2\*</sup>*Faculty of Liberal Arts and Science, Western University, Kanchanaburi, Thailand*

\*Corresponding Author. E-mail address: kitisak.lu@western.ac.th

Received: 20 September 2023; Revised: 26 October 2023; Accepted: 15 November 2023

Published online: 28 June 2024

## **Abstract**

The electric furnace temperature control system is one of the real-world second-order systems plus time delay (SOSPD) widely used as the process control in industries. It is normally operated under the PID feedback control loop. The PIDA controller, however, performed better response than the PID controller for higher order plant. In this paper, an optimal PIDA controller design for the electric furnace temperature control system is presented. Regarding to modern optimization context, the Bat-inspired Algorithm (BA) which is one of the most efficient population-based metaheuristic optimization techniques is applied to search for the appropriate PIDA's parameters. The proposed BA-based PIDA design framework is considered as the constrained optimization problem. System responses obtained by the PIDA controller designed by the BA will be compared with those obtained by the PIDA controller also designed by the BA. As results, it was found that the PIDA can provides the very satisfactory tracking and regulating responses of the electric furnace temperature control system superior to the PIDA, significantly.

**Keywords:** Electric furnace temperature control, Metaheuristic optimization, PIDA controller

## 1) บทนำ

ระบบควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมไฟฟ้าเป็นระบบอันดับสองที่มีการประวิงเวลา (Second-Order System Plus Time Delay: SOSPD) [1], ซึ่งเป็นปัญหาจริงที่ถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม [2], เตาหลอมไฟฟ้าใช้พลังงานหลักจากแหล่งกำเนิดเพื่อผลิตความร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนดเพื่อการใช้งานเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า หรืออุตสาหกรรมผลิตกระเบื้อง เป็นต้นจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า อุณหภูมิของระบบเตาหลอมไฟฟ้าสามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ตัวควบคุม PID (proportional-integral-derivative controller) [3], ภายใต้ระบบควบคุมวงปิด นอกจากนี้ยังมีการใช้งานตัวควบคุมฟัซซี [4], ตัวควบคุมฟัซซี-PID [5] อย่างไรก็ตาม การควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม PID เป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมและมีรูปแบบง่ายที่สุด

ในบริบทของการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่ ปัญหาการออกแบบตัวควบคุม PID สำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้าสามารถพิจารณาให้เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไข (constrained optimization problem) ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้วิธีการเมตาฮิวริสติกจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ได้มีการประยุกต์วิธีการเมตาฮิวริสติกเพื่อการออกแบบ PID สำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้า เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [6], และขั้นตอนวิธีแบบค้างคาว (Bat Algorithm: BA) [7]

ในปี ค.ศ. 1996 Jung และ Dorf [8] ได้เสนอให้ตัวควบคุม PIDA (proportional-integral-derivative-accelerated controller) สำหรับพลาสมาอันดับสามโดยเฉพาะ ตัวควบคุม PIDA ประกอบด้วย ศูนย์ (zero) จำนวนสามตัว และขั้ว (pole) ที่จุดกำเนิดจำนวนหนึ่งตัว ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่าประสิทธิภาพเหนือกว่า ตัวควบคุม PID ภายหลังจากที่ตัวควบคุม PIDA ได้รับการนำเสนอ ได้มีการนำเอาเทคนิคการค้นหาแบบเมตาฮิวริสติกมาประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบอย่างแพร่หลาย เช่น การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วย GA [9], การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [10], การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วยการค้นหาแบบกระแสน้ำ (Current Search: CuR) [11], เป็นต้น

วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary algorithm) [6], [7], [12] เป็นวิธีที่ใช้กลุ่มประชากรเป็นฐานเพื่อใช้สำหรับค้นหาผลลัพธ์

ของปัญหาที่มีความซับซ้อน วิธีการเชิงวิวัฒนาการจะใช้กลไกการคำนวณที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากการวิวัฒนาการทางชีววิทยา ได้แก่ การสืบพันธุ์ การกลายพันธุ์และการแลกเปลี่ยนยีน เป็นการคัดเลือกโดยใช้คำตอบที่ได้ในการแก้ไขปัญหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด เช่น การคำนวณสัดส่วนของสารเคมีเพื่อให้ได้องค์ประกอบของสารที่มีประสิทธิภาพ การบริหารทรัพยากรในการผลิตให้มีประสิทธิภาพ วิธีการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ใช้การคำนวณเชิงวิวัฒนาการทั้งสิ้น

วิธีการเชิงวิวัฒนาการมีหลายแบบวิธี และวิธีที่ใช้กันแพร่หลายคือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [6] และวิธีนี้ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพและมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด

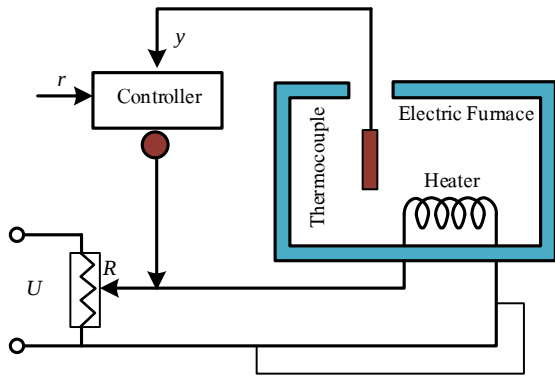
ในปี ค.ศ. 2010 ขั้นตอนวิธีแบบค้างคาว (Bat Algorithm: BA) [13] ได้รับการนำเสนอเป็นครั้งแรกจาก Yang โดยวิธีการเมตาฮิวริสติกแบบอิงประชากร (population-based metaheuristics) ขั้นตอนวิธี BA เลียนแบบพฤติกรรมการระบุตำแหน่งด้วยเสียงสะท้อน (echolocation) ของค้างคาวขนาดเล็ก ซึ่งทำให้สามารถค้นหาเหยื่อและระบุความแตกต่างของเหยื่อและวัตถุอื่นได้ในความมืด จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า BA ได้รับการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น การออกแบบคันเชื่อม [14], การออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง [15], การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าอย่างประหยัด [16] และการออกแบบระบบควบคุม [17]

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PIDA อย่างเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมไฟฟ้าด้วย BA เนื่องจาก BA เป็นหนึ่งในอัลกอริทึม (algorithm) ที่ยังใหม่ และฟังก์ชันไม่คอยซับซ้อน สามารถนำมาพัฒนาต่อได้ ผู้วิจัยจึงนำ BA มาทำงานวิจัยในครั้งนี้ และงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลกับตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA ตัวควบคุม PIDA และตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมไฟฟ้า กรอบงานการออกแบบ ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA การอภิปรายผลการออกแบบ และสรุป

## 2) ระบบเตาหลอมไฟฟ้า

ระบบเตาหลอมไฟฟ้าในรูปที่ 1 [18], [19] ประกอบด้วยเตาหลอมไฟฟ้าตัวควบคุมเทอร์โมคัปเปิลและเครื่องทำความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเตาไฟฟ้า  $r$  คือแรงดันไฟฟ้าขาเข้า,  $U$  คือ

แรงดันไฟฟ้าขาออกแรงดันไฟฟ้าจากตัวควบคุม  $y$  คือแรงดันขาออกจากเทอร์โมคัปเปิล และ  $R$  เป็นตัวเหนี่ยวนำความต้านทาน



รูปที่ 1 : กรอบงานการออกแบบระบบเตาหลอมไฟฟ้า

ฟังก์ชันการถ่าย S โอนโดเมนของระบบเตาไฟฟ้า ถูกจัดทำขึ้น [18] ตามที่ระบุในสมการที่ (1) ความหน่วงเวลา (หรือความล่าช้าการส่ง) ในสมการที่ (1) เป็นค่าประมาณในสมการที่ (2) จากนั้นฟังก์ชันการถ่าย S โอนโดเมนของระบบเตาไฟฟ้าในสมการที่ (1) สามารถเขียนใหม่ได้ตามที่แสดงไว้ในสมการที่ (3) รูปแบบในสมการที่ (3) จะใช้เป็นสมการควบคุมที่แสดงในรูปที่ 1

$$G_p(s) = \frac{0.15e^{-1.5s}}{s^2 + 1.1s + 0.2} \quad (1)$$

$$e^{-1.5s} = \frac{1 - 0.75s}{1 + 0.75s} \quad (2)$$

$$G_p(s) = \frac{-0.1125s + 0.15}{0.75s^3 + 1.825s^2 + 1.25s + 0.2} \quad (3)$$

### 3) การออกแบบตัวควบคุม PIDA

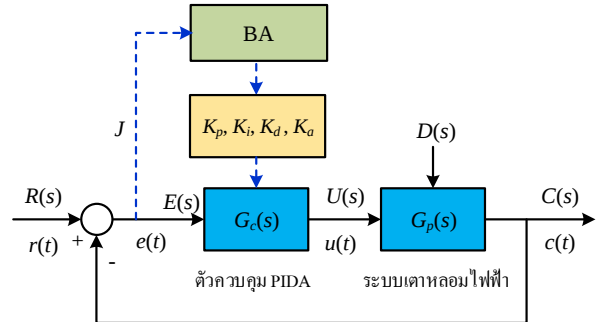
#### 3.1) ตัวควบคุมพีไอดีเอ (PIDA)

การออกแบบตัวควบคุม PIDA สำหรับควบคุมระบบเตาหลอมไฟฟ้า ที่ออกแบบด้วย BA แสดงดังรูปที่ 2 โดยมีตัวควบคุม PIDA แสดงดังสมการที่ (4) และการค้นหาค่า  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  และ  $K_a$  ภายในปริภูมิการค้นที่กำหนดในสมการที่ (6) ด้วยการทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $J$  ในสมการที่ (5) มีค่าน้อยที่สุด

$$G_c(s)|_{PIDA} = K_c \frac{(s+a)(s+b)(s+z)}{s} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_a s^2 \quad (4)$$

$$\text{Minimize } J = \sum_{i=1}^N (r_i - c_i)^2 \quad (5)$$

$$\text{Subject to } \left. \begin{aligned} t_r &\leq t_{r\_max}, & M_p &\leq M_{p\_max}, \\ t_s &\leq t_{s\_max}, & E_{ss} &\leq E_{ss\_max}, \\ K_{p\_min} &\leq K_p \leq K_{p\_max}, \\ K_{i\_min} &\leq K_i \leq K_{i\_max}, \\ K_{d\_min} &\leq K_d \leq K_{d\_max}, \\ K_{a\_min} &\leq K_a \leq K_{a\_max}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$



รูปที่ 2 : การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วย BA

#### 3.2) ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบค้างคาว

ขั้นตอนวิธีแบบค้างคาว หรือ BA ได้รับการนำเสนอโดย Yang ในปี ค.ศ. 2010 [13], [14] ด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติก ที่ได้รับแรงบันดาลใจจากการหาอาหารของค้างคาว ขั้นตอนวิธี BA ได้ถูกนิยามจากกฎอุดมคติ 3 ข้อต่อไปนี้

1. ค้างคาวทุกตัวใช้หลักการสะท้อนเพื่อตรวจวัดระยะทาง (echolocation) และรับรู้ถึงความแตกต่างระหว่างอาหาร (หรือเหยื่อ) และสิ่งกีดขวาง

2. ค้างคาวจะบินแบบสุ่มที่ความเร็ว  $v_i$  ณ ตำแหน่ง  $x_i$  ด้วยความถี่  $f_{min}$  จากนั้นจะปรับแปรความยาวคลื่น (wavelength)  $\lambda$  และความดัง (loudness)  $A_0$  เพื่อค้นหาเหยื่อ ซึ่งสามารถปรับ  $\lambda$  (หรือความถี่  $f \in [0, f_{max}]$ ) ได้อย่างอัตโนมัติ รวมทั้งยังสามารถปรับอัตราการส่งพัลส์  $r \in [0, 1]$  ที่ขึ้นกับระยะห่างของเหยื่อ ( $r = 0$  คือไม่มีการส่งพัลส์ และ  $r = 1$  คือมีการส่งพัลส์ด้วยอัตราการส่งสูงสุด)

3. ความดังสามารถปรับแปรได้หลายแนวทาง ในขั้นตอนวิธี BA จะกำหนดให้ความดัง  $A_0$  มีค่าเป็นบวกมาก ๆ และลดลงสู่ค่าความดังต่ำสุด  $A_{min}$  เมื่อค้างคาวเคลื่อนที่เข้าหาเหยื่อ

ขั้นตอนวิธีแบบ BA สามารถแสดงด้วยรหัสเทียมดังรูปที่ 3 ค้างคาวแต่ละตัวจะมีความสัมพันธ์กับความเร็ว  $v_i$  และตำแหน่ง  $x_i$  ณ เวลา  $t$  ในปริภูมิการค้นหามิติ  $d$  เมื่อ  $x^*$  คือ ผลเฉลย (ตำแหน่ง) ที่ดีที่สุดปัจจุบัน ในระหว่างการค้นหา ค้างคาวแต่ละ

ตัวจะถูกกำหนดแบบการสุ่มตามความถี่ในช่วง ( $f_{min}, f_{max}$ ) ดังแสดงในสมการที่ (7) เมื่อ  $\beta \in [0, 1]$  คือค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกภาพ ความเร็ว  $v_i$  ของค้างคาวแต่ละตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8) ตำแหน่ง  $x_i$  (หรือผลเฉลย) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) ความดัง  $A_i$  และอัตราการส่งพัลส์  $r$  จะถูกปรับตามที่แสดงในสมการที่ (10) และสมการที่ (11) ซึ่งพบว่าจากคำแนะนำของ Yang [13], [14] ในกรณีทั่วไป  $\alpha = \gamma \in [0.90, 0.98]$

---

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  $x_i$   
Define initial best  $x^*$   
Initialize pulse rates  $r_i$  and the loudness  $A_i$   
**While** ( $t < \text{Max\_Iteration}$ )  
-Generate new solutions by adjusting frequency in (7)  
-Updating velocities in (8) and locations/solutions in (9)  
    **if** ( $\text{rand} > r_i$ )  
    -Select a solution among the best solution  
    -Generate a local solution around the selected best solution  
    **end if**  
-Generate a new solution by flying randomly  
**if** ( $\text{rand} < A_i$  &  $f(x_i) < f(x^*)$ )  
-Accept the new solutions  
-Reduce  $A_i$  in (10) and increase  $r_i$  in (11)  
**end if**  
-**Rank** the bats and find the current best  $x^*$   
**end while**  
Report the best solution found

---

รูปที่ 3 : รหัสเทียมของขั้นตอนวิธี BA

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta \quad (7)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x^*)f_i \quad (8)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (9)$$

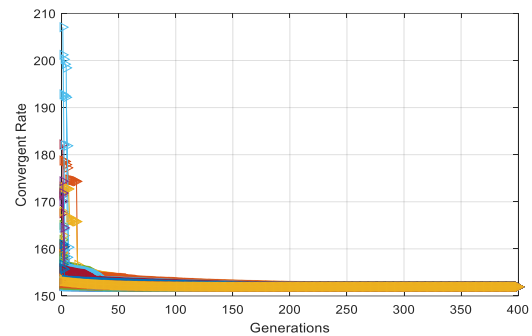
$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (10)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 (1 - e^{-\gamma}), \quad \gamma > 0 \quad (11)$$

#### 4) ผลการทดลองและอภิปรายผล

การออกแบบตัวควบคุม PIDA สำหรับควบคุมระบบเตาหลอมไฟฟ้า ที่ออกแบบด้วย BA แสดงดังรูปที่ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $J$  ถูกกำหนดให้เป็นผลรวมกำลังสองระหว่างสัญญาณเข้า  $r(t)$  และสัญญาณออก  $c(t)$  ดังแสดงในสมการที่ (5) เมื่อ  $N$  คือจำนวนข้อมูล จากรูปที่ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $J$  จะถูกป้อนให้กับ BA เพื่อทำให้มีค่าน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขข้อสมการที่กำหนดจากข้อกำหนดสมรรถนะที่พึงประสงค์ในการออกแบบ ขอบเขตของสัญญาณควบคุมในการออกแบบตัวควบคุม และปริภูมิการค้นหา ดังแสดงในสมการที่ (6)

การออกแบบตัวควบคุม PIDA สำหรับควบคุมระบบเตาหลอมไฟฟ้า ที่ออกแบบด้วย BA ขั้นตอนวิธี BA จะถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมการค้นหาดูด้วยโปรแกรม MATLAB ประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU@2.30GHz, 8GB RAM จากนั้นดำเนินการทดสอบสมรรถนะการค้นหาค่าเฉลยของ BA กับปัญหาการออกแบบตัวควบคุม PIDA สำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้า ด้วยการกำหนดให้  $n = 25$ ,  $\alpha = 0.90$  และ  $\gamma = 0.98$  เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ของ BA ที่เหมาะสมที่สุด ดำเนินการทั้งหมด 50 ครั้ง (trial) ซึ่งในแต่ละครั้งกำหนดให้เกณฑ์ยุติการค้นหา (TC) เมื่อจำนวนรอบการค้นหา (Iter) มีค่าเท่ากับจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด (Max\_Iter = 400) จะได้  $K_p = 5.56$ ,  $K_i = 0.48$ ,  $K_d = 8.11$  และ  $K_o = 3.22$  แสดงอัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยในรูปที่ 4



รูปที่ 4 : เส้นกราฟอัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของ BA ดำเนินการทั้งหมด 50 ครั้ง

จากรูปที่ 4 เป็นผลการออกแบบตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA เมื่อดำเนินการทั้งหมด 50 ครั้ง อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของ BA พบว่า เส้นกราฟจำนวน 50 เส้นแสดงการลู่เข้าหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยจุดเริ่มต้นของแต่ละเส้นจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าผลเฉลยเริ่มต้น (initial solution) ที่ได้จากการสุ่ม (random process) มีความแตกต่างกัน แต่เมื่อการค้นหาของ BA ดำเนินการไปจนถึงรุ่น (generation) ที่ 400 ซึ่งเป็นเงื่อนไขยุติการค้นหา จะพบว่า BA สามารถค้นหาค่าเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (optimal solution) ได้ทุกครั้ง แสดงให้เห็นถึงความทน (robustness) ของกลไกการค้นหาของ BA ที่มีต่อผลเฉลยเริ่มต้นที่แตกต่างกัน

ตัวควบคุม PIDA ที่เหมาะสมสำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ (12) และตัวควบคุม PIDA ที่เหมาะสมสำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้า ที่ออกแบบด้วย BA แสดงดังสมการที่ (13)

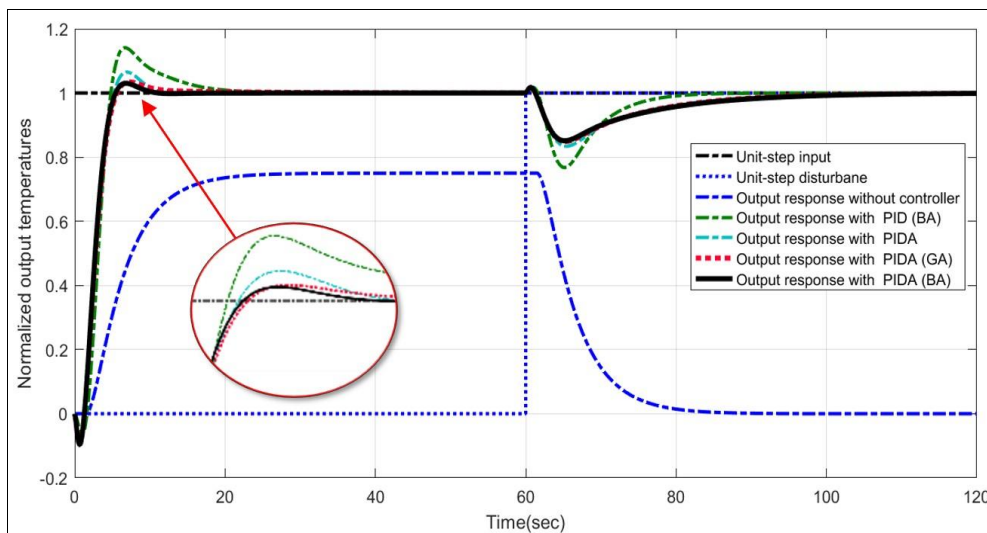
ซึ่งการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อมีตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA, เมื่อมีตัวควบคุม PIDA ในสมการที่ (12) และเมื่อมีตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA ในสมการที่ (13) แสดงดังรูปที่ 5 และสรุปได้ดังตารางที่ 1

$$G_c(s)|_{PIDA} = 5.13 + \frac{0.47}{s} + 6.78s + 3.22s^2 \quad (12)$$

$$G_c(s)|_{PIDA-BA} = 5.65 + \frac{0.48}{s} + 8.11s + 3.22s^2 \quad (13)$$

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 5 พบว่า เมื่อระบบรับสัญญาณอินพุตที่วินาทีที่ 0 ระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อไม่มีตัวควบคุม จะให้ผลตอบสนองที่ค่อนข้างล่าช้า และเมื่อระบบรับสัญญาณรบกวนที่วินาทีที่ 60 ระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อไม่มีตัวควบคุม ไม่สามารถคุมค่าผลตอบสนองให้กลับคืนมาได้ สำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อมีตัวควบคุม PID และ PIDA ผลตอบสนองแบบแปรตามสัญญาณอินพุต ในช่วงวินาทีที่ 0-60 พิจารณาจากค่า

$M_p$  และ  $t_s$  ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA จะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA และตัวควบคุม PIDA ในขณะที่ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA จะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA ตัวควบคุม PIDA และตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA ตามลำดับ ส่วนผลตอบสนองแบบคุมค่าการรบกวน ในช่วงวินาทีที่ 60-120 ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA จะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA ตัวควบคุม PIDA และ ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA จึงสรุปได้ว่า ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA มีประสิทธิภาพในการควบคุมระบบเตาหลอมไฟฟ้า ที่เหนือกว่าตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA, ตัวควบคุม PIDA และ ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA ตามลำดับ



รูปที่ 5 : การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อมีตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA, เมื่อมีตัวควบคุม PIDA และเมื่อมีตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA

ตารางที่ 1 : ผลตอบสนองของระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อมีตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA, เมื่อมีตัวควบคุม PIDA และเมื่อมีตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA

| ตัวควบคุม      | ผลตอบสนอง                      |           |             |              |                            |                   |              |
|----------------|--------------------------------|-----------|-------------|--------------|----------------------------|-------------------|--------------|
|                | ผลตอบสนองแบบแปรตามสัญญาณอินพุต |           |             |              | ผลตอบสนองแบบคุมค่าการรบกวน |                   |              |
|                | $t_r$ (sec)                    | $M_p$ (%) | $t_s$ (sec) | $e_{ss}$ (%) | $t_{reg}$ (sec)            | $M_{p_{reg}}$ (%) | $e_{ss}$ (%) |
| ไม่มีตัวควบคุม | 7.00                           | 0.00      | 26.00       | 0.00         | -ไม่สามารถคุมค่าการรบกวน-  |                   |              |
| PID-BA         | 4.35                           | 14        | 20.1        | 0.00         | 85                         | 23.2              | 0.00         |
| PIDA           | 4.4                            | 6.5       | 16          | 0.00         | 105                        | 16.5              | 0.00         |
| PIDA-GA        | 4.5                            | 3.4       | 15.6        | 0.00         | 105.5                      | 15.35             | 0.00         |
| PIDA-BA        | 4.3                            | 3.01      | 10.5        | 0.00         | 105.5                      | 14.6              | 0.00         |

### 5) สรุปผล

การออกแบบควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA เพื่อควบคุมอุณหภูมิของระบบเตาไฟฟ้า ในบทความนี้ได้นำเสนอปัญหาด้านการเพิ่มประสิทธิภาพที่จำกัดการใช้ขั้นตอนวิธี BA เพื่อลดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ควบคุมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุม PIDA และได้รับการเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA ตัวควบคุม PIDA และตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA จากผลการวิจัยพบว่า PIDA ที่ออกแบบด้วย BA สามารถติดตามและควบคุมการตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิเตาไฟฟ้าที่เหนือกว่า PID\_BA, PIDA และ PIDA\_GA ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการควบคุมระบบเตาหลอมไฟฟ้า

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลงด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น ที่อำนวยความสะดวกห้องวิจัย

### REFERENCES

- [1] A. O' Dwyer, *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*, 3rd ed. London, U.K.: Imperial College Press, 2009.
- [2] B. G. Lipták, *Instrumentation Engineers Handbook Process Control*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1995.
- [3] Y. Han, J. Jinling, C. Guangjian, and C. Xizhen, "Temperature control of electric furnace based on fuzzy PID," in *Proc. Int. Conf. Electron. and Optoelectronics*, Dalian, China, Jul. 2011, pp. V3-41–V3-44.
- [4] F. Teng and H. Li, "Adaptive fuzzy control for the electric furnace," in *Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Comput. and Intell. Syst.*, Shanghai, China, Nov. 2009, pp. 439–443.
- [5] X. Junming, Z. Haiming, J. Lingyun, and Z. Rui, "Based on Fuzzy-PID self-tuning temperature control system of the furnace," in *Proc. Int. Conf. Elect. Inf. and Control Eng.*, Wuhan, China, Apr. 2011, pp. 1203–1206.
- [6] B. Srilakshmi and K. Venkataratnam, "Temperature control of electric furnace using genetic algorithm based PID controller," *Int. J. Adv. Eng. Global Technol.*, vol. 3, no. 11, pp. 1348–1352, Dec. 2015.
- [7] C. Thammarat, K. Lurang, D. Puangdownreong, S. Hlangnamthip, A. Nawikavatan, and S. Suwannarongsri, "Application of bat-Inspired algorithm to optimal PIDA controller design for liquid-level system," in *Proc. Int. Elect. Eng. Congr. (IEECON)*, Krabi, Thailand, Mar. 2018, pp. 556–559.
- [8] S. Jung and R. C. Dorf, "Analytic PIDA controller design technique for a third order system," in *Proc. 35th IEEE Conf. Decis. and Control*, Kobe, Japan, Dec. 1996, pp. 2513–2518.
- [9] S. Sornmuang and S. Sujitjorn, "GA-based PIDA control design optimization with an application to AC motor speed control," *Int. J. Math. Comput. Simul.*, vol. 4, no. 3, pp. 67–80, Jan. 2010.
- [10] D. Puangdownreong and S. Suwannarongsri, "Torsional resonance suppression via PIDA controller designed by the particle swarm optimization," in *Proc. 5th Int. Conf. Elect. Eng./Electron. Comput. Telecommun. Inf. Technol. (ECTI-CON)*, Krabi, Thailand, May 2008, pp. 673–676.
- [11] C. Thammarat, P. Sukseam, D. Puangdown-reong, and S. Suwannarongsri, "Design of PIDA controllers via particle swarm optimization," (in Thai), in *Proc. Int. Annu. Symp. Comput. Sci. and Eng. Symp. (ANSCSE12)*, Ubon Ratchathani, Thailand, Mar. 2008, pp. 393–398.
- [12] X. S. Yang, "A new metaheuristic bat-inspired algorithm," in *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, Heidelberg, Germany: Springer, 2010, pp. 65–74.
- [13] X.-S. Yang, "Bat algorithm for multi-objective optimisation," *Int. J. Bio-Inspired Comput.*, vol. 3, no. 5, pp. 267–274, 2011.
- [14] A. Benaissa, A. Zeblah, A. Belafdal, and A. Chaker, "An efficient bat algorithm for series-parallel power system optimization," *J. Elect. Electron. Syst.*, vol. 5, no. 3, 2016, Art. no. 1000189.
- [15] B. Ramesh, V. C. J. Mohan, and V. C. V Reddy, "Application of bat algorithm for combined economic load and emission dispatch," *Int. J. Elect. Eng. Telecommun.*, vol. 2, no.1, pp. 1–9, Jan. 2013.
- [16] C. Thammarat, K. Lurang, D. Puangdownreong, S. Hlangnamthip, A. Nawikavatan, and S. Suwannarongsri, "Application of Bat-Inspired algorithm to optimal PIDA controller design for liquid-level system," in *Proc. Int. Elect. Eng. Congr. (IEECON)*, Krabi, Thailand, Mar. 2018, pp. 556–559.



- [17] J. Paulusová and M. Dubravská, "Application of design of PID controller for continuous systems," in *Proc. 20th ročník medzinárodnej konferencie: Tech. Comput. Bratislava*, Bratislava, Slovakia, Nov. 2012. pp. 1–6.
- [18] N. Pringsakul, D. Puangdownreong, C. Thammarat, and S. Hlangnamthip, "Obtaining optimal PIDA controller for temperature control of electric furnace system via flower pollination algorithm," *WSEAS Trans. Syst. Control*, vol. 14, pp. 1–7, 2019.