

การประยุกต์การค้นหาแบบค้างคาวเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วนสำหรับระบบประวิงเวลา Application of Bat Search to Design Fractional Order PID Controller for Time Delay System

ชนิดา แก้วเพชร¹ สัตถาภูมิ ไทยพานิช¹ บารมี โอสธีกรกุล¹ ชาญณรงค์ อ่างทอง² และ คนพล คำปัญญา^{2*}

¹สาขาวิชาระบบสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
chanida.k@rmutsb.ac.th sattarpoom.t@rmutsb.ac.th baramee.o@rmutsb.ac.th

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
channarong.at.tae@gmail.com danupon.k@rmutsb.ac.th*

บทคัดย่อ

การค้นหาแบบค้างคาวเป็นหนึ่งในเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติกที่มีประสิทธิภาพ บทความนี้นำเสนอการประยุกต์การค้นหาแบบค้างคาวเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วนสำหรับระบบประวิงเวลา การประวิงเวลาสามารถแทนด้วยการประมาณแบบพาเด ผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วนสำหรับระบบประวิงเวลาด้วยวิธีการค้นหาแบบค้างคาวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอันดับจำนวนเต็ม จากผลการจำลองพบว่าตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วนที่ออกแบบด้วยการค้นหาแบบค้างคาวสามารถควบคุมระบบประวิงเวลาได้อย่างน่าพอใจ ให้ผลตอบสนองดีกว่าตัวควบคุมพีไอดีอันดับจำนวนเต็ม ทั้งการติดตามคำสั่งอินพุตและการกำจัดสัญญาณรบกวน

คำสำคัญ: การค้นหาแบบค้างคาว ตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วน ระบบประวิงเวลา การหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติก

Abstract

One of most efficient meta-heuristic optimization search techniques is Bat Search (BS). This paper proposes application of the BS to design fractional order PID (FOPID) controllers for time delay system. The time delay occurred in the system can be substituted by Pade's approximation. The results obtained by the BS to design the FOPID controller for the time delay system will be compared with those obtained by the integer order PID (IOPID) controller. From the simulation results, it was found that the optimal the FOPID controller designed by the BS can provide yielded more satisfactory results than the IOPID controller in both input command tracking and disturbance rejection responses.

Keywords: Bat Search (BS), Fractional Order PID Controller, Time Delay System, Meta-heuristic Optimization Search

1. บทนำ

ตัวควบคุมพีไอดีอันดับจำนวนเต็ม (Integer-order PID Controller (IOPID) หรือ PID Controller) [1] ถูกยอมรับและใช้งานอย่างกว้างขวาง

ในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสร้างง่ายและมีโครงสร้างอย่างง่าย โดยทั่วไปตัวควบคุม IOPID สามารถปรับแต่งได้ด้วยวิธีของซีเกลอร์และนิโคลส์ (Ziegler and Nichols หรือ ZN) [2] ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม IOPID อย่างเหมาะสมสำหรับระบบเชิงเส้นและเสถียรเท่านั้น นอกจากนี้ยังเกิดการแกว่งและมีค่าเกินพิกัดสูงมากข้อเสียของวิธีนี้คือ ถูกจำกัดการทำงานไว้เพียงบางส่วน และมีคุณสมบัติการออกแบบความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงที่ไม่น่าพอใจมากนัก

บนพื้นฐานตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วน (Fractional-order PID หรือ (FOPID) Controller) ได้รับการนำเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ. 1994 โดย Prof. Igor Podlubny [3] ที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของแคลคูลัสเชิงเศษส่วน (Fractional Calculus) ที่ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์จำนวน 5 ตัว คือ K_p เป็นอัตราขยายเชิงปรับสัดส่วน (Proportional Gain) K_i เป็นอัตราขยายเชิงปริพันธ์ (Integral Gain) K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative Gain) λ เป็นอันดับเชิงปริพันธ์ (Integral Order) และ μ เป็นอันดับเชิงอนุพันธ์ (Derivative Order) โดยที่ λ และ μ จะมีค่าไม่เป็นเลขจำนวนเต็ม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม IOPID ที่ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์จำนวน 3 ตัว คือ K_p เป็นอัตราขยายเชิงปรับสัดส่วน (Proportional Gain) K_i เป็นอัตราขยายเชิงปริพันธ์ (Integral Gain) และ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative Gain) ทำให้ตัวควบคุม FOPID มีประสิทธิภาพการควบคุมครอบคลุมและดีกว่าตัวควบคุม IOPID จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ตัวควบคุม FOPID ได้ถูกใช้กับการควบคุมกระบวนการ (Process) หรือพลานต์ (Plant) ที่หลากหลาย อาทิเช่น การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ การควบคุมอิเล็กทรอนิกส์กำลังในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น

การควบคุมพลานต์ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ เครื่องปฏิกรณ์เคมี และเครื่องฟอกอากาศ สามารถนำเสนอโดยใช้แบบจำลองที่มีการประวิงเวลา (Time Delay) [4] และมากกว่า 90% ของระบบกายภาพ การควบคุมพลานต์ที่มีการประวิงเวลาแบบจำลองสามารถประมาณด้วยพลานต์อันดับหนึ่งที่มีการประวิงเวลา (First Order Plus Time Delay หรือ FOPTD) อยู่ที่ประมาณ 60% และพลานต์อันดับสองที่มีการประวิงเวลา (Second Order Plus Time Delay หรือ SOPTD) อยู่ที่ประมาณ 30% ซึ่งโดยทั่วไปของพลานต์เหล่านี้ก็คือ พลานต์ที่มีการประวิงเวลาจะส่งผลกระทบต่อผลการออกแบบตัวควบคุม

ปัญหาการออกแบบตัวควบคุม FOPID สามารถพิจารณาเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไข (Constraint) ที่สามารถค้นหาผลเฉลยด้วยเมตา-ฮิวริสติก (Meta-heuristic) ที่มีประสิทธิภาพ [5] จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การค้นหาแบบค้างคาว (Bat Search หรือ BS) ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Yang เมื่อปี ค.ศ. 2010 [6] โดยได้แนวคิดจากพฤติกรรมการปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงของค้างคาว (Sonar) เพื่อใช้ในการนำทางและค้นหาอาหารในที่มืด (Echolocation) บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ BS เพื่อออกแบบตัวควบคุม FOPID สำหรับระบบประวิงเวลา โดยที่ การประวิงเวลาสามารถแทนด้วยการประมาณแบบพาเด (Pade's Approximation) อันดับหนึ่ง [4] ผลที่ได้รับจาก FOPID สำหรับระบบประวิงเวลาดำเนินการด้วยวิธี BS ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจาก IOPID ทั้งการติดตามคำสั่งอินพุต (Input Command Tracking) และการกำจัดสัญญาณรบกวน (Disturbance Rejection)

2. การค้นหาแบบค้างคาว

การค้นหาแบบค้างคาว [6] จะอาศัยกลไกที่สำคัญ 3 ข้อ คือ

1) ค้างคาวเคลื่อนที่ขณะบินเข้าหาเหยื่อ ตามเสียงสะท้อนที่ถูกปล่อยออกมาด้วยคลื่นเสียงที่มีความถี่สูง (Sonar) อย่างเป็นจังหวะและสม่ำเสมอ (Echolocation)

2) ค้างคาวบินแบบสุ่มด้วยความเร็ว v_i ที่ตำแหน่ง x_i โดยมีความถี่ $f_{\min}$ ความยาวคลื่น λ และความดังของเสียง A_0 ที่แตกต่างกันเพื่อค้นหาเหยื่อและปรับความยาวคลื่น (ความถี่) ของพัลส์ที่ปล่อยออกมาได้โดยอัตโนมัติและปรับอัตราการปล่อยพัลส์ (Pulse Emission หรือ r) โดยที่ $r \in [0, 1]$ จะขึ้นอยู่กับระยะของเป้าหมาย

3) ความดังของเสียงสามารถเปลี่ยนแปลงได้หลายรูปแบบ ความดังของเสียงจะเปลี่ยนแปลงจากความดังของเสียงสูงที่สุด A_0 ไปยังค่าคงที่ต่ำที่สุด $A_{\min}$ นั่นคือ ความดังจะลดไปเรื่อยๆ เมื่อค้างคาวเข้าใกล้เหยื่อเพิ่มมากขึ้น

จากขั้นตอนวิธีของ BS สามารถแสดงได้ด้วยรหัสจำลอง (Pseudo Code) ดังรูปที่ 1 เมื่อ TC คือ เกณฑ์ยุติการค้นหา

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 (1) - (3)
- 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** ($\text{rand} < A_i$ & $f(x_i) < f(x_{\text{best}})$)
- Accept the new solutions
- Increase r_i and reduce A_i
- end if**
- Rank the bats and find the current best x_{best}
- End while**
- Report the best solution found

รูปที่ 1 รหัสจำลองแสดงขั้นตอนวิธีของ BS [6]

ค้างคาวแต่ละตัวจะมีความสัมพันธ์กับความเร็ว v_i และตำแหน่ง x_i ที่รอบการทำซ้ำ t ในปริภูมิการค้นหา d มิติ ในจำนวนของค้างคาวทั้งหมด x_{best} คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน ดังนั้น จากกลไกที่สำคัญ 3 ข้อ ข้างต้น สามารถปรับปรุงตำแหน่ง x_i และความเร็ว v_i ได้ใหม่ โดยอาศัยสมการที่ (1) ถึงสมการที่ (3)

$$f_i = f_{\min} + \beta(f_{\max} - f_{\min}) \quad (1)$$

$$v_i' = v_i^{t-1} + f_i(x_i^{t-1} - x_{\text{best}}) \quad (2)$$

$$x_i' = x_i^{t-1} + v_i' \quad (3)$$

เมื่อ $\beta \in [0, 1]$ คือ เวกเตอร์การสุ่มจากการแจกแจงแบบปกติ (Uniform Distribution) ในค้างคาวแต่ละตัวจะถูกกำหนดความถี่แบบสุ่มซึ่งมาจากการสุ่ม $[f_{\min}, f_{\max}]$ อย่างสม่ำเสมอ ที่ระยะเวลาของการทำซ้ำความดัง A_i และอัตราพัลส์ r_i จะถูกปรับตามสมการที่ (4) เพื่อสร้างความสมดุลการสำรวจและการแสวงหาประโยชน์ สำหรับ $0 < \alpha < 1$ และ $\gamma > 0$ พบว่า ความดัง ($A_i' \rightarrow 0$) และอัตราพัลส์ ($r_i' \rightarrow r_i^0$) เมื่อ ($t \rightarrow \infty$) โดยที่ Yang กำหนดให้ค่าของ $\alpha = \gamma \in [0.9, 0.98]$

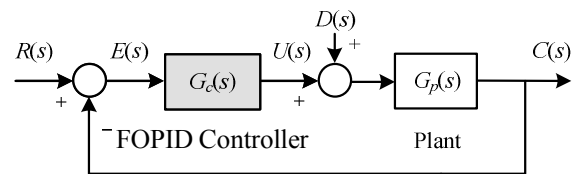
$$A_i^{t+1} = \alpha A_i', \quad r_i^{t+1} = r_i^0(1 - e^{(-\gamma)}) \quad (4)$$

ในเริ่มต้น ผู้ใช้งานสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของ BS ได้ตามความเหมาะสมจากคำแนะนำของ Yang [6] โดยกำหนดให้จำนวนของค้างคาว $n = 20$ ถึง 50 ตัว ความถี่ $f_{\min} = 0.0$ และ $f_{\max} = 2.0$ ความดังของเสียง $A_0 = 0.5$ อัตราปล่อยพัลส์ $r_0 = 0.5$ และ $\alpha = \gamma = 0.9$

3. โครงสร้างของระบบควบคุม

3.1 ตัวควบคุมพีโอไออันดับเชิงเศษส่วน

โครงสร้างของระบบควบคุม FOPID สำหรับระบบประวิงเวลาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 ตัวควบคุม $G_c(s)$ ที่เป็นตัวควบคุม FOPID วางตัวอยู่ในวิถีป้อนไปหน้า (Forward Path) จะได้รับสัญญาณค่าความผิดพลาด $E(s)$ มาคำนวณและสร้างเป็นสัญญาณควบคุม $U(s)$ และส่งไปควบคุมทางเอาต์พุต $C(s)$ ของพลานต์ $G_p(s)$ ที่มีการประวิงเวลา ที่สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ และกำจัดสัญญาณรบกวน $D(s)$ ที่เกิดขึ้นจากภายนอกไปพร้อมกัน



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบควบคุม FOPID

$$G_c(s)_{\text{FOPID}} = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu, \quad (\lambda, \mu \geq 0) \quad (5)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \right) G_p(s)}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \right) G_p(s)} \quad (6)$$

จากสมการที่ (5) พบว่า เมื่อ K_p คือ อัตราขยายเชิงปรับสัดส่วน (Proportional Gain) K_i คือ อัตราขยายเชิงปริพันธ์ (Integral Gain) K_d คือ อัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative Gain) λ คือ อันดับปริพันธ์เชิงเศษส่วน (Fractional Integral Order) และ μ คือ อันดับอนุพันธ์เชิงเศษส่วน (Fractional Derivative Order) ในขณะที่ สมการที่ (6) คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด $C(s)/R(s)$ ของระบบควบคุม FOPID ตามลำดับ

3.2 แบบจำลองที่มีการประวิงเวลา

ในบทความงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองอันดับหนึ่งที่มีการประวิงเวลา (First Order Plus Time Delay หรือ FOPTD) ดังแสดงในสมการที่ (7) โดยที่ K_m คือ อัตราขยายของพลานต์ (Gain of Plant) T_m คือ ค่าคงตัวทางเวลา (Time Constant) และ τ_d คือ เวลาประวิง (Delay Time) และเทอมเวลาประวิง (Delay Time) อาศัยการประมาณพาเดอันดับหนึ่ง (First Order Pade's Approximation) [4] ดังแสดงในสมการที่ (8)

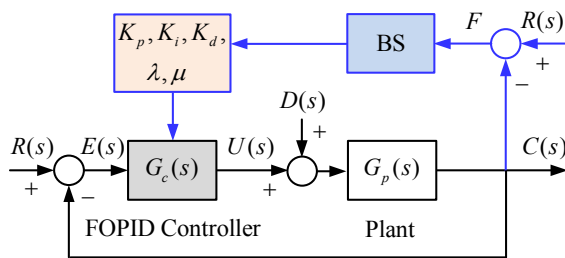
$$G_p(s)|_{FOPTD} = \frac{K_m}{(T_ms + 1)} e^{-\tau_d s}, e^{-\tau_d s} \cong \frac{1 - \tau_d s / 2}{1 + \tau_d s / 2} \quad (7)$$

$$G_p(s) = \frac{(-K_m \tau_d / 2)s + K_m}{(T_m \tau_d / 2)s^2 + (\tau_d / 2 + T_m)s + 1} \quad (8)$$

การจำลองระบบควบคุม กำหนดให้อัตราขยายพลานต์ $K_m = 1.0$ เลือกเวลาประวิง $\tau_d = 1.0$ วินาที และ 10 วินาที โดยให้ค่าคงตัวทางเวลา $T_m = 1.0$ วินาที และสัญญาณรบกวน $d(t)$ ที่เกิดขึ้นจากภายนอกเข้ามาในระบบควบคุม กำหนดให้เข้าที่เวลา 50 วินาที เป็นสัญญาณขั้นบันได (Unit Step Signal) มีค่า $d(t) = 1.0$ ตามลำดับ

4. การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วน

กรอบการออกแบบตัวควบคุม FOPID อย่างเหมาะสมสำหรับระบบประวิงเวลาโดยใช้ BS สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function หรือ F) กำหนดเป็นผลรวมของค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง (Sum Squared Error หรือ SSE) ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ และสัญญาณเอาต์พุต $C(s)$ ดังแสดงในสมการที่ (9) โดยที่ F จะถูกป้อนให้กับ BS ทำให้มีค่าน้อยที่สุด เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID อย่างเหมาะสม นั่นคือ K_p, K_i, K_d, λ และ μ ในขอบเขตปริภูมิการค้นหา (Search Space) ดังแสดงในสมการที่ (10) สอดคล้องกับเงื่อนไขการออกแบบ (Design Constrains) โดยที่ M_p คือ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Overshoot Percentage) และ e_{ss} คือ ค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (Steady-state Error)



รูปที่ 3 โครงสร้างของระบบควบคุม FOPID โดยใช้ BS

$$\text{Minimize } F(K_p, K_i, K_d, \lambda, \mu) = \sum_{i=1}^N [r(i) - c(i)]^2 \quad (9)$$

$$\text{subject to } \left. \begin{aligned} M_p &\leq 20\%, \\ e_{ss} &\leq 0.01\%, \\ 0 &\leq K_p \leq 1.0, \\ 0 &\leq K_i \leq 1.0, \\ 0 &\leq K_d \leq 0.1, \\ 0 &\leq \lambda \leq 1.0, \\ 0 &\leq \mu \leq 1.0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

5. การทดสอบและการอภิปรายผล

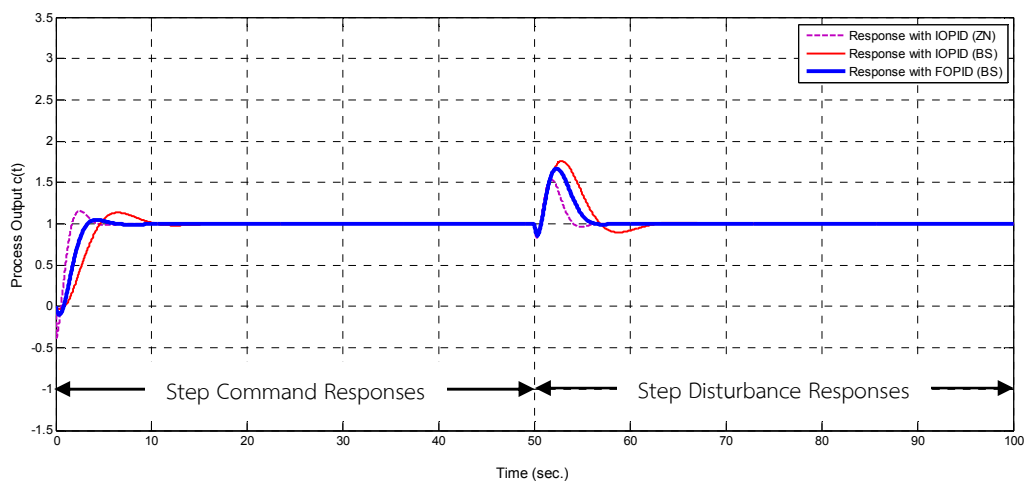
ขั้นตอนวิธีของ BS ได้ถูกพัฒนาเป็นโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่มีหน่วยประมวลผลกลางแบบ 8 แกน มีสัญญาณนาฬิกา 3.2 GHz และมีหน่วยความจำหลักชนิด DDR4 ขนาดความจุ 32 GB ที่คาบเวลาสุ่ม 1 มิลลิวินาที การหาค่าพารามิเตอร์ของ BS เบื้องต้นสามารถทำตามคำแนะนำของ Yang ได้ดังนี้ จำนวนของค้างคาว $n = 30$ ความถี่ $f_{\min} = 0.0$ และ $f_{\max} = 2.0$ ความดังเสียง $A_0 = 0.5$ อัตราการปล่อยพัลส์ $r_0 = 0.5$ และ $\alpha = \gamma = 0.9$ จำนวนรอบสูงสุด (Max_Gen) = 1000 รอบ ซึ่งจะกำหนดให้เป็นเกณฑ์ยุติการค้นหา (Termination Criteria หรือ TC) ในการออกแบบจะดำเนินการค้นหาทั้งหมดจำนวน 40 ครั้ง ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ในสมการที่ (10) หลังจากยุติการค้นหา ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID โดยใช้ BS เพื่อให้ F มีค่าน้อยที่สุด เมื่อ t_r คือ ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) t_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) ในขณะที่ M_d คือ ค่าของขนาดสูงสุดของผลตอบสนองที่เกิดจากการรบกวน (Maximum Disturbance) และ t_d คือ ช่วงเวลาในการกำจัดสัญญาณรบกวน (Disturbance Rejection) โดยผลที่ได้รับจากตัวควบคุม FOPID จะถูกเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากตัวควบคุม IOPID โดยใช้ BS ที่การประวิงเวลา 1.0 วินาที และ 10 วินาที เมื่อยุติการค้นหาได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID อย่างเหมาะสม เมื่อ $\tau_d = 1.0$ วินาที แสดงได้ดังตารางที่ 1 และผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 4 เมื่อ $\tau_d = 10$ วินาที แสดงได้ดังตารางที่ 2 และผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมรรถนะของระบบควบคุม เมื่อ $\tau_d = 1.0$ วินาที

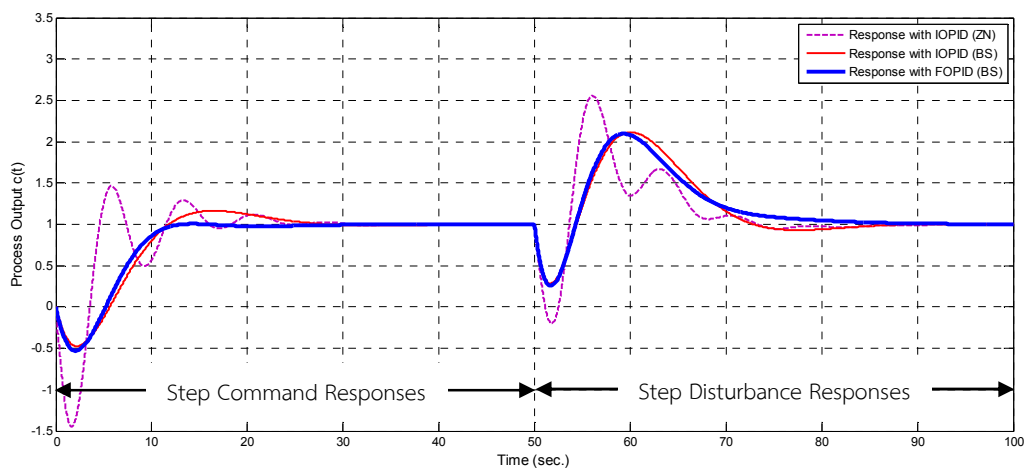
Methods	Parameters					System Responses					
	λ	μ	K_p	K_i	K_d	$t_r(\text{sec.})$	$M_p(\%)$	$t_s(\text{sec.})$	$e_{ss}(\%)$	$t_d(\text{sec.})$	$M_d(\%)$
IOPID (ZN)	-	-	1.228	1.111	0.277	1.675	15.880	4.103	0.00	5.642	54.060
IOPID (BS)	-	-	0.146	0.391	0.004	5.087	9.998	10.386	0.00	12.453	76.670
FOPID (BS)	0.992	0.629	0.580	0.566	0.004	3.321	4.830	5.556	0.00	5.898	67.090

ตารางที่ 2 สมรรถนะของระบบควบคุม เมื่อ $\tau_d = 10$ วินาที

Methods	Parameters					System Responses					
	λ	μ	K_p	K_i	K_d	$t_r(\text{sec.})$	$M_p(\%)$	$t_s(\text{sec.})$	$e_{ss}(\%)$	$t_d(\text{sec.})$	$M_d(\%)$
IOPID (ZN)	-	-	0.720	0.151	0.855	4.566	46.560	29.516	0.00	22.993	155.670
IOPID (BS)	-	-	0.498	0.116	0.001	11.835	16.580	26.275	0.00	35.195	111.350
FOPID (BS)	1.000	0.575	0.573	0.105	0.005	11.805	4.110	17.170	0.00	33.450	111.230



รูปที่ 4 ผลตอบสนองของระบบควบคุม เมื่อ $\tau_d = 1.0$ วินาที



รูปที่ 5 ผลตอบสนองของระบบควบคุม เมื่อ $\tau_d = 10$ วินาที

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 4 กับตารางที่ 2 และรูปที่ 5 พบว่า วิธี BS สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID ที่การประวิงเวลา 1.0 วินาที และ 10 วินาที ได้อย่างเหมาะสม ให้ผลตอบสนองของระบบควบคุม มีช่วงเวลาขึ้น t_r มีช่วงเวลาเข้าที่ t_s มีค่าเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p และมีช่วงเวลาในการกำจัดสัญญาณรบกวน t_d น้อยกว่าตัวควบคุม IOPID โดยไม่มีค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว e_{ss} ในขณะที่ ตัวควบคุม IOPID โดยใช้ ZN มีการแกว่งและมีค่าเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p ที่สูงมาก ทั้งการติดตามคำสั่งอินพุตและการกำจัดสัญญาณรบกวน

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ BS เพื่อออกแบบตัวควบคุม FOPID สำหรับระบบประวิงเวลา วิธี BS สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID ได้อย่างเหมาะสม ตัวควบคุม FOPID โดยใช้ BS สามารถควบคุมระบบ ประวิงเวลาได้อย่างพอใจ ให้ผลตอบสนองดีกว่าตัวควบคุม IOPID โดยใช้ BS ในขณะที่ วิธีของ ZN พบว่า ที่เวลาประวิง 10 วินาที จะมีการแกว่งและมีค่า เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุดที่สูงมาก อาจไม่สามารถอนุวัติได้จริงในทางปฏิบัติ

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. O. Dwyer, Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules, Imperial College Press, 2003.
- [2] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers," *In Trans. of the ASME*, Vol. 64, 1942, pp. 759–768.
- [3] I. Podlubny, "Fractional-Order Systems and Fractional-Order Controller, UEF-03-94," Slovak Academy of Sciences, Kosice, 1994.
- [4] B. C. Kuo and F. Golnaraghi, Automatic Control Systems, 8th ed., John Wiley & Sons, 2003.
- [5] X. S. Yang, Engineering Optimization, An Introduction with Metaheuristic Applications, John Wiley & Sons, 2010.
- [6] X. S. Yang, "A new metaheuristic bat-inspired an algorithm," *in: NICSO 2010* (Eds. J. R. Gonzalez et al.), Springer Berlin, 284, Springer, 2010, pp. 65–74.