

การปรับแต่งตัวควบคุมที่ไอดีอย่างเหมาะสมด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบแบคค้างคาว

Optimal Tuning of TIDA Controller by Bat Optimization

ชนิดา แก้วเพชร¹ สัตถาภูมิ ไทยพานิช¹ บารมี โอสธีกุล¹ ชาญณรงค์ อ่างทอง² และ คนุพล 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

หนึ่งในรุ่นที่ถูกดัดแปลงของตัวควบคุมที่ไอดีคือ ตัวควบคุมที่ไอดีเอ ที่ประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ จำนวน 5 ตัว คือ อัตราขยายเชิงเอียง อันดับของปริพันธ์เชิงเอียงแบบเศษส่วน อัตราขยายเชิงปริพันธ์ อัตราขยายเชิงอนุพันธ์ และอัตราขยายเชิงความเร่ง ในบทความนี้ นำเสนอ การปรับแต่งตัวควบคุมที่ไอดีเออย่างเหมาะสมด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบค้างคาว หนึ่งในวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติกที่ทรงประสิทธิภาพ ค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิง และสัญญาณเอาต์พุตของระบบกำหนดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ให้น้อยที่สุด จากผลที่ได้รับพบว่า ตัวควบคุมที่ไอดีเอที่ถูกปรับแต่งด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบค้างคาวจะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองของตัวควบคุมที่ไอดีเอที่ถูกปรับแต่งด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบค้างคาว ดังรายละเอียดจะได้กล่าวถึงและแสดงไว้ในบทความนี้

คำสำคัญ: ตัวควบคุมที่ไอดีเอ ตัวควบคุมที่ไอดี การหาค่าเหมาะที่สุดแบบค้างคาว การหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติก

Abstract

One of modified versions of the PIDA controller is the TIDA controller. It consists of five parameters, i.e. the tilt gain, order of fractional tilt integral, the integral gain, the derivative gain and the accelerated gain. In this paper, an optimal tuning of TIDA controller by bat optimization (BO) is proposed. The BO is one of the powerful meta-heuristic optimization search methods. The sum squared errors (SSE) between reference input signal and output signal is performed to minimize the objective function (F). As the results, it was found that the TIDA controller designed by the BO can provides better responses once compared to that with the TID controller designed by the BO, of which the details are discussed and shown in the paper.

Keywords: TIDA Controller, TID Controller, Bat Optimization, Meta-heuristic Optimization

1. บทนำ

ตัวควบคุมที่ไอดี (Tilt-Integral-Derivative Controller หรือ TID) [1] ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย B. J. Lurie ในปี ค.ศ. 1994 ซึ่งจัดอยู่ในชนิดของตัวควบคุมที่ไอดีอันดับเชิงเศษส่วน (Fractional-order PID หรือ FOPID) [2] ตัวควบคุม TID จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบของที (T) หรือองค์ประกอบเชิงเอียง (Tilt) องค์ประกอบของไอ (I) และองค์ประกอบของดี (D) ในองค์ประกอบของ T จะมีค่าระหว่าง P และ I ที่สามารถปรับให้เอียงไปด้านใดด้านหนึ่งได้ด้วยอันดับของเลขยกกำลังเชิงเศษส่วน (Order of Fractional) จากวรรณกรรมที่ผ่านมา ตัวควบคุม TID ได้รับการยอมรับว่าให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าตัวควบคุมที่ไอดีอันดับจำนวนเต็ม (Integer-order PID หรือ IOPID) [3]

ในปี ค.ศ. 1996 S. Jung และ R. C. Dorf [4] ได้นำเสนอตัวควบคุมแบบที่ไอดีเอ (Proportional-Integral-Derivative-Accelerated หรือ PIDA) ตัวควบคุม PIDA มีซีโร (Zero) 3 ตัว และมีโพล (Pole) 1 ตัว ที่จุดกำเนิด ซึ่งจะให้ผลตอบสนองเรียบและรวดเร็วสำหรับพลานต์ (Plant) อันดับสูงกว่าตัวควบคุม PID นอกจากนี้ เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่ [5] ที่เรียกว่า “เมตา-ฮิวริสติก” ถูกใช้ในการปรับแต่งตัวควบคุม PIDA เช่น ตัวควบคุม PIDA ที่ถูกออกแบบด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm หรือ GA) และการหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization หรือ PSO) เป็นต้น

ในบรรดาเมตา-ฮิวริสติก ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน การหาค่าเหมาะที่สุดแบบค้างคาว (Bat Optimization หรือ BO) [6] ถูกนำเสนอในครั้งแรกโดย X. S. Yang ในปี ค.ศ. 2010 จากพฤติกรรมการปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงของค้างคาว (Sonar of Bat) เพื่อระบุตำแหน่งด้วยเสียงสะท้อน (Echolocation) ซึ่งยอมรับว่าเป็นการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติกที่ทรงประสิทธิภาพ [7] ที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน

บทความนี้ จึงนำเสนอการปรับแต่งตัวควบคุม TIDA อย่างเหมาะสมด้วย BO ที่ประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ จำนวน 5 ตัว คือ อัตราขยายเชิงเอียง (Tilt Gain: K_t) อันดับของปริพันธ์เชิงเอียงแบบเศษส่วน (Order of Fractional Tilt Integral: n) อัตราขยายเชิงปริพันธ์ (Integral Gain: K_i) อัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative Gain: K_d) และอัตราขยายเชิงความเร่ง (Accelerated Gain: K_a) สำหรับแบบจำลองของมอเตอร์ DC ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นพลานต์อันดับ 4 [8] เปรียบเทียบกับตัวควบคุม TID

2. การหาค่าเหมาะที่สุดแบบค้างคาว

ตามที่นำเสนอโดย X. S. Yang [6] อัลกอริทึมของ BO จะขึ้นอยู่กับกฎ 3 ข้อ ดังต่อไปนี้ 1) ค้างคาวทุกตัวใช้เสียงสะท้อน (Echolocation) ที่มีความถี่สูง (Sonar) เพื่อรับรู้ระยะทางและมันยังสามารถรู้ความแตกต่างระหว่างอาหาร (หรือเหยื่อ) และพื้นหลังที่มีสิ่งกีดขวางด้วยวิธีที่น่าอัศจรรย์ 2) ค้างคาวบินแบบสุ่มด้วยความเร็ว v_i ที่ตำแหน่ง x_i โดยมีความถี่ $f_{\max}$ ความยาวคลื่น λ และความดัง A_0 ที่แตกต่างกันเพื่อค้นหาเหยื่อ และมันสามารถปรับความยาวคลื่น (หรือความถี่) ของพัลส์ที่ปล่อยออกมาได้โดยอัตโนมัติ และปรับอัตราการปล่อยพัลส์ (Pulse Emission หรือ r) โดยที่ $r \in [0,1]$ ตามระยะห่างของเป้าหมาย และ 3) ความดังจะเปลี่ยนแปลงได้หลายวิธี แต่สันนิษฐานว่าความดังจะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ A_0 ที่มีค่ามาก (เป็นบวก) ไปจนถึงค่าคงที่ต่ำสุด $A_{\min}$ โดยที่ ความดังจะลดลง เมื่อมันบินเข้าใกล้เหยื่อเพิ่มขึ้น อัลกอริทึมของ BO 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** ($\text{rand} < A_i$ & $f(x_i) < f(x_*)$)
- 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 1 รหัสจำลองแสดงอัลกอริทึมของ BO [6]

ค้างคาวแต่ละตัวจะมีความสัมพันธ์กับความเร็ว v_i^t และตำแหน่ง x_i^t ที่รอบการทำการซ้ำ t ในปริภูมิการค้นหา d มิติ ในจำนวนของค้างคาวทั้งหมด x_* คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน ดังนั้น จากกฎ 3 ข้อ สามารถปรับปรุงตำแหน่ง x_i^t และความเร็ว v_i^t ในสมการที่ (1) ถึง (3)

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

$$v_i^t = v_i^{t-1} + f_i(x_i^{t-1} - x_*) \quad (2)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (3)$$

เมื่อ $\beta \in [0,1]$ คือ เวกเตอร์การสุ่มจากการแจกแจงแบบปกติ (Uniform Distribution) ในค้างคาวแต่ละตัวจะถูกกำหนดความถี่แบบสุ่มซึ่งมาจากการสุ่ม $[f_{\min}, f_{\max}]$ อย่างสม่ำเสมอ ที่ระยะเวลาของการทำการซ้ำความดัง A_i และอัตราพัลส์ r_i จะถูกปรับตามสมการที่ (4) เพื่อสร้างความสมดุลการสำรวจและการแสวงหาประโยชน์ สำหรับ $0 < \alpha < 1$ และ $\gamma > 0$ พบว่า ความดัง ($A_i^t \rightarrow 0$) และอัตราพัลส์ ($r_i^t \rightarrow r_i^0$) เมื่อ ($t \rightarrow \infty$) โดยที่ X. S. Yang กำหนดให้ค่า $\alpha = \gamma \in [0.9, 0.98]$ [6-7]

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t, \quad r_i^{t+1} = r_i^0(1 - e^{(-\gamma)}) \quad (4)$$

ในเริ่มต้น ผู้ใช้งานสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของ BO ได้ตามความเหมาะสมจากคำแนะนำของ X. S. Yang [6] โดยให้จำนวนของค้างคาว $n = 20$ ถึง 50 ตัว ความถี่ $f_{\min} = 0.0$ และ $f_{\max} = 2.0$ ความดังของเสียง $A_0 = 0.5$ อัตราพัลส์ $r_0 = 0.5$ และ $\alpha = \gamma = 0.9$

3. ระบบควบคุม TIDA

ตัวควบคุม TID [1] ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ จำนวน 4 ตัว คือ K_i เป็นอัตราขยายเชิงเอียง K_i เป็นอัตราขยายเชิงปริพันธ์ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ และ n เป็นอันดับของปริพันธ์เชิงเอียงแบบเศษส่วน โดยที่ $n > 0$ ซึ่งหมายความว่า ถ้า $n = 1$ องค์ประกอบ T จะมีสมการทางคณิตศาสตร์เป็น I ในขณะที่ ถ้า $n > 1$ หรือ $n \rightarrow \infty$ องค์ประกอบ T จะมีสมการทางคณิตศาสตร์เป็น P แสดงได้ดังสมการที่ (5)

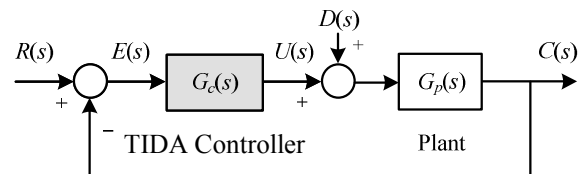
$$G_c(s) \Big|_{TID} = \frac{K_d s^{2+(1/n)} + K_i s^{(1/n)} + K_t s}{s^{1+(1/n)}}, (n > 0) \quad (5)$$

และตัวควบคุม TIDA ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ จำนวน 5 ตัว คือ K_i เป็นอัตราขยายเชิงเอียง K_i เป็นอัตราขยายเชิงปริพันธ์ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ K_a เป็นอัตราขยายเชิงความเร่ง และ n เป็นอันดับของปริพันธ์เชิงเอียงแบบเศษส่วนแสดงได้ดังสมการที่ (6)

$$G_c(s) \Big|_{TIDA} = \frac{K_a s^{3+(1/n)} + K_d s^{2+(1/n)} + K_i s^{(1/n)} + K_t s}{s^{1+(1/n)}}, (n > 0) \quad (6)$$

3.1 โครงสร้างของระบบควบคุม TIDA

ระบบควบคุม TIDA มีโครงสร้างดังรูปที่ 2 ตัวควบคุม $G_c(s)$ รับสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน $E(s)$ สร้างเป็นสัญญาณควบคุม $U(s)$ ส่งไปควบคุมทางเอาต์พุต $C(s)$ ของพลานต์ $G_p(s)$ ในขณะที่ $R(s)$ คือ อินพุตอ้างอิง และ $D(s)$ คือ การรบกวนจากภายนอก



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบควบคุม TIDA

จากสมการที่ (6) ตัวควบคุม $G_c(s)$ ที่ปรากฏอยู่ในวิถีป้อนไปหน้า (Feedforward Path) ต่ออันดับกับพลานต์ $G_p(s)$ ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด $C(s)/R(s)$ ของระบบควบคุม TIDA แสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\left(\frac{K_a s^{3+(1/n)} + K_d s^{2+(1/n)} + K_i s^{(1/n)} + K_t s}{s^{1+(1/n)}} \right) G_p(s)}{1 + \left(\frac{K_a s^{3+(1/n)} + K_d s^{2+(1/n)} + K_i s^{(1/n)} + K_t s}{s^{1+(1/n)}} \right) G_p(s)} \quad (7)$$

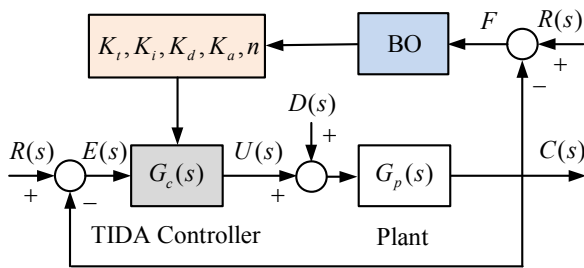
โดยที่ พลานต์ $G_p(s)$ ในสมการที่ (7) เป็นแบบจำลองมอเตอร์ DC ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นพลานต์อันดับ 4 [8] แสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$G_p(s) = \frac{0.0351}{8.56 \times 10^{-10} s^4 + 2.45 \times 10^{-6} s^3 + 7.98 \times 10^{-4} s^2 + 0.011 s} \quad (8)$$

3.2 การปรับแต่งตัวควบคุม TIDA

การปรับแต่งตัวควบคุม TIDA ด้วย BO สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ DC แสดงได้ดังรูปที่ 3 เพื่อประเมินสมรรถนะของตัวควบคุม TIDA ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Sum-squared Error หรือ SSE) หารได้จากผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ และสัญญาณเอาต์พุต $C(s)$ ของระบบกำหนดให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F แสดงได้ดังสมการที่ (9) โดยที่ F จะถูกป้อนให้กับ BO เพื่อหาค่าที่น้อยที่สุด ในการหาค่าพารามิเตอร์ จำนวน 5 ตัวของตัวควบคุม TIDA กำหนดให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของสมการที่ (10) โดยที่ M_p คือ ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Overshoot) และ e_{ss} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัว (Steady-state Error)

$$F|_{SSE} = \sum_{i=1}^n [r(i) - c(i)]^2 \quad (9)$$



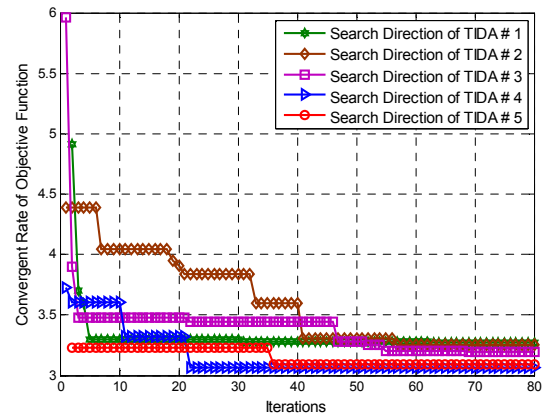
รูปที่ 3 โครงสร้างของระบบควบคุม TIDA ด้วย BO

$$K_i \in [0, 200], K_d \in [0, 20], K_a \in [0, 10], K_n \in [0, 1], n \in [0, 12] \quad (10)$$

และจากรูปที่ 3 สามารถจำลองการทำงานของระบบควบคุม TIDA สำหรับการควบคุมตำแหน่ง (Position Control) และความเร็วโรเตอร์ (Rotor Speed) สำหรับมอเตอร์ DC ด้วย BO โดยอาศัยกล่องเครื่องมือ FOMCON [9-10] ที่บรรจุอยู่ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK [11]

4. การทดสอบและการอภิปรายผล

การปรับแต่งตัวควบคุม TIDA สำหรับแบบจำลองมอเตอร์ DC อัลกอริทึมของ BO ถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมการค้นหาด้วย MATLAB ค่าพารามิเตอร์ของ BO จะถูกกำหนดให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด จากการทดสอบเบื้องต้นกระทำได้นี้ จำนวนของค่าความ $n = 30$ 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 ซึ่งจะกำหนดให้เป็นเกณฑ์ยุติการค้นหา (Termination Criteria หรือ TC) ในการกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม TIDA จะกำหนดให้สอดคล้องกับปริภูมิการค้นหา (Search Space) ดังแสดงในสมการที่ (10) หลังจากยุติการค้นหาด้วยวิธี BO พบว่า ค่า F จำนวนทั้งหมด 5 ตัวอย่างมีเพียงตัวเดียว ที่มีค่าน้อยที่สุด ที่ลดลงจาก 3.7221 ในรอบที่ 1 จนถึง 3.0632 ในรอบการค้นหาที่ 22 จากนั้น BO ได้ดำเนินการค้นหาจนถึง 80 รอบ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า จากรอบการค้นหาที่ 22 ไปจนถึงรอบการค้นหาที่ 80 ค่า F จะคงค่าอยู่ที่ 3.0632 นั่นคือ ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้รับการค้นพบด้วย BO เรียบร้อยแล้ว แสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การลู่เข้าหาผลเฉลยของตัวควบคุม TIDA

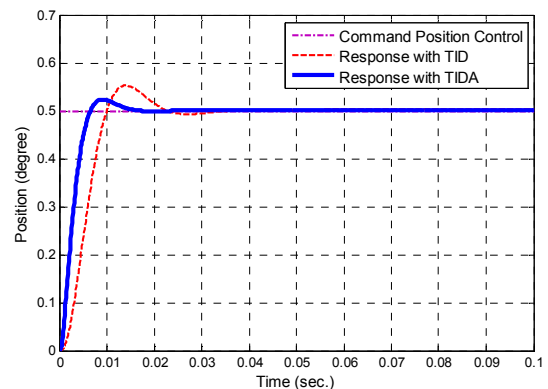
เปรียบเทียบระบบควบคุม TIDA กับ TID ที่ขอบเขตการค้นหาเดียวกัน หลังจากยุติการค้นหาด้วย BO ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม แสดงได้ดังตารางที่ 1 สมรรถนะของระบบควบคุม แสดงได้ดังตารางที่ 2 และผลตอบสนองของระบบควบคุม แสดงได้ดังรูปที่ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

Method	Parameters				
	n	K_i	K_d	K_a	
TID	8.8750	100.3489	12.0230	4.9278	—
TIDA	10.9468	180.9739	10.1790	9.0489	0.0146

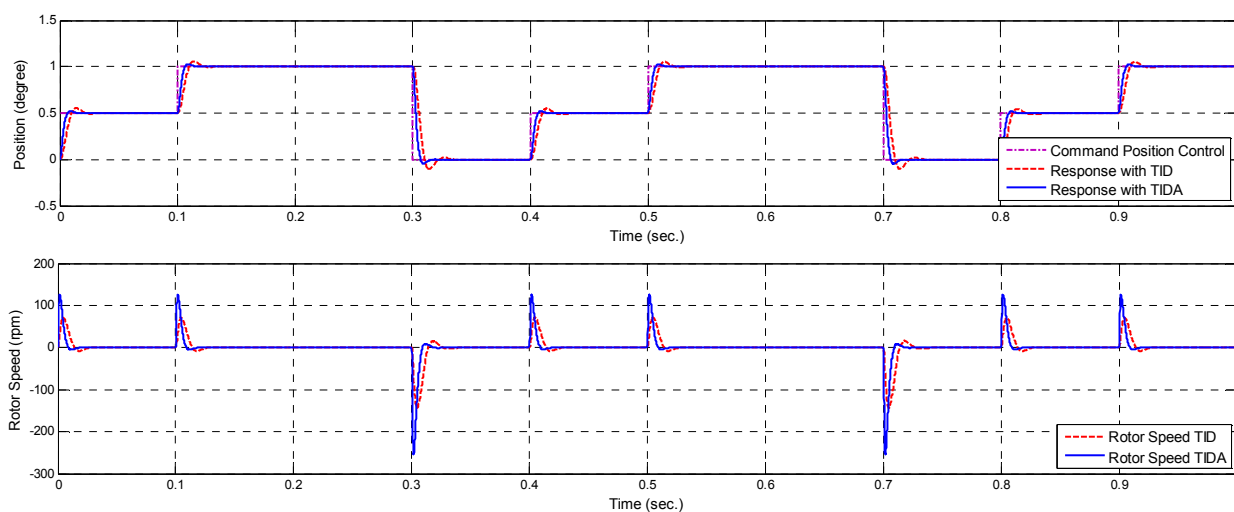
ตารางที่ 2 สมรรถนะของระบบควบคุม

Method	System Responses			
	t_r (sec.)	M_p (%)	t_s (sec.)	e_{ss} (%)
TID	0.0099	10.60	0.0194	0.00
TIDA	0.0065	4.72	0.0106	0.00



รูปที่ 5 ผลตอบสนองของระบบควบคุม

จากตารางที่ 1 พบว่า BO หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม TIDA และ TID ได้อย่างเหมาะสม และจากตารางที่ 2 พบว่า ระบบควบคุม TIDA ให้ผลตอบสนองของระบบควบคุม มีช่วงเวลาขึ้น t_r มีช่วงเวลาเข้าที่ t_s และมีค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p น้อยกว่าระบบควบคุม TID โดยไม่มีความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัว e_{ss} ผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์ DC แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์ DC

จากรูปที่ 6 พบว่า ระบบควบคุม TIDA ด้วย BO สำหรับมอเตอร์ DC จะให้ผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ DC คือ เพิ่มขึ้นจาก 0 องศา ไปเป็น 0.5 องศา และเพิ่มขึ้นจาก 0.5 องศา ไปเป็น 1 องศา จากนั้น ลดลงจาก 1 องศา ไปเป็น 0 องศา ระบบควบคุม TIDA สามารถปรับได้ตามตำแหน่งที่กำหนด โดยให้ผลตอบสนองของความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์ DC เร็วกว่าระบบควบคุม TID อย่างมีประสิทธิภาพ

5. สรุป

การปรับแต่งตัวควบคุม TIDA อย่างเหมาะสมด้วย BO ที่ได้นำเสนอในบทความนี้ พบว่า วิธีของ BO สามารถหาค่าพารามิเตอร์ จำนวน 5 ตัว ได้อย่างเหมาะสม โดยให้ผลตอบสนองของระบบควบคุม มีช่วงเวลาขึ้น t_r มีช่วงเวลาเข้าที่ t_s และมีค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p น้อยกว่าตัวควบคุม TID แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุม TIDA ให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบควบคุม TID นอกจากนี้ พบว่า ผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ DC ระบบควบคุม TIDA สามารถปรับได้ตามตำแหน่งที่กำหนด

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. J. Lurie, "Three-parameter tunable tilt-integral-derivative (TID) controller," *United States Patent*. 5-371-670, USA, 1994.
- [2] I. Podlubny, "Fractional-Order Systems and Fractional-Order Controller," UEF-03-94, Slovak Academy of Sciences, Kosice, 1994.
- [3] A. Mukhtar, P. M. Tiwari, S. Alotaibi, T. Alzahrani, B. Namomsa, and M. Ahmed, "Optimal design of tilt integral derivative controller for a boost converter based on swarm-inspired algorithms," *Scientific Reports*, pp. 1–21, 2025.
- [4] S. Jung and R. C. Dorf, "Analytic PIDA controller design technique for a third order system," in *Proc. 35th IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, pp. 2513–2518, 1996.
- [5] X. S. Yang, *Engineering Optimization, An Introduction with Metaheuristic Applications*, John Wiley & Sons, 2010.
- [6] X. S. Yang, "A new metaheuristic bat-inspired algorithm," in: *NICSO 2010* (Eds. J. R. Gonzalez et al.), Springer Berlin, 284, Springer, pp. 65–74, 2010.
- [7] X. S. Yang, "Bat algorithm for multi-objective optimization," *Int. J. Bio-Inspired Computation*, Vol. 3 No. 5, pp. 267–274, 2011.
- [8] V. Jambulingam, "Position Control of DC Motor Using PI Controller," *Inter. Journal of Engineering Development and Research*, vol. 4(2), pp. 1342–1345, 2016.
- [9] A. Tepljakov, E. Petlenkov and J. Belikov, "FOMCON: Fractional-Order Modeling and Control Toolbox for MATLAB," *Proceedings of the 18th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, pp. 684–689, 2011.
- [10] A. Tepljakov, E. Petlenkov and J. Belikov, "FOMCON: a MATLAB Toolbox for Fractional-Order Systems Identification and Control," *International Journal of Micro-electronics and Computer Science*, Vol. 2, No. 2, pp. 51–62, 2011.
- [11] MATLAB/SIMULINK User's Guide, The Math Works Inc., Natick, MA, 1998.