

การออกแบบตัวควบคุม I-PD และ I-TD อย่างเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบไร้แปรงถ่านโดยใช้ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้เชิงดัดแปร

Optimal I-PD and I-TD Controller Design for Brushless DC Motor Speed Control System using Modified Flower Pollination Algorithm

กิตติศักดิ์ ฤกษ์¹ อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร¹ ทิพา จิตหวัง² ไซโย ธรรมรัตน์³ และ เดชา พวงดาวเรือง^{3*}

¹สาขาการบริหารงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น kitisak.lu@western.ac.th, auttarat.na@western.ac.th

²นักวิชาการอิสระ, 68/112 ถ.บางบัวทอง-สุพรรณบุรี ต.บางแม่นาง อ.บางใหญ่, นนทบุรี, ประเทศไทย thiwa@thipphaya-tip.com

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ chaiyot@sau.ac.th, deachap@sau.ac.th*

บทคัดย่อ

ตัวควบคุม PID และ TID ได้รับการนำเสนอในฐานะตัวควบคุมหลักของระบบควบคุมอัตโนมัติ ปัญหาหลักของตัวควบคุม PID และ TID คือเมื่อรับสัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PID และ TID จะปรากฏพฤติกรรมที่เรียกว่า set-point kick อันส่งผลทำให้ประสบปัญหาในการอนุวัตตัวควบคุมเพื่อใช้งานจริง การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถกระทำได้โดยการใช้ตัวควบคุม I-PD และ I-TD บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม I-PD และ I-TD อย่างเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (มอเตอร์ BLDC) โดยใช้ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้เชิงดัดแปร (modified flower pollination algorithm: MoFPA) จากผลการออกแบบ ตัวควบคุม I-PD และ I-TD สามารถลดปรากฏการณ์ set-point kick ได้อย่างน่าพึงพอใจ ยิ่งกว่านั้น ตัวควบคุม I-TD สามารถให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและปรากฏการณ์สั่นไหวที่น้อยกว่าตัวควบคุม I-PD

คำสำคัญ: ตัวควบคุม I-PD ตัวควบคุม I-TD การควบคุมความเร็วมอเตอร์ BLDC ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้เชิงดัดแปร

Abstract

PID and TID controllers have been proposed as the main controllers of the automatic control systems. A major drawback of both PID and TID controllers arises when they encounter a sudden change in the input signal—the control signal exhibits a phenomenon known as the set-point kick. This behavior poses significant challenges in the practical implementation of these controllers. Such a problem can be solved by using I-PD and I-TD controllers. This paper presents the optimal design of I-PD and I-TD controllers for a brushless DC (BLDC) motor speed control system, utilizing the modified flower pollination algorithm (MoFPA). The results demonstrate that both I-PD and I-TD controllers effectively mitigate the set-point kick phenomenon.

Moreover, the I-TD controller exhibits faster response time and less oscillation once compared to the I-PD controller.

Keywords: I-PD Controller, I-TD Controller, BLDC Motor Speed Control, Modified Flower Pollination Algorithm

1. บทนำ

นับเวลากว่า 1 ศตวรรษ ที่ตัวควบคุม PID (proportional-integral-derivative controller) ได้รับการนำเสนอครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1922 โดย Minorsky [1] จนถึงปัจจุบัน ตัวควบคุม PID ได้รับการยอมรับและถูกประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางในฐานะหัวใจหลักของการควบคุมอัตโนมัติ [2] ตัวควบคุม PID ประกอบด้วยองค์ประกอบ-P (P-element) หรือองค์ประกอบเชิงสัดส่วน (proportional element), องค์ประกอบ-I (I-element) หรือองค์ประกอบเชิงปริพันธ์ (integral element) และองค์ประกอบ-D (D-element) หรือองค์ประกอบเชิงอนุพันธ์ (derivative element) ที่สามารถปรับจูนได้อย่างอิสระต่อกัน

ในปี ค.ศ.1994 Lurie ได้นำเสนอ ตัวควบคุม TID (tilt-integral-derivative controller) [3] ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบ-T (T-element) หรือองค์ประกอบเชิงเออน (tilt element), องค์ประกอบ-I และองค์ประกอบ-D ซึ่งในองค์ประกอบ-T นั้นจะมีพฤติกรรมอยู่ระหว่างองค์ประกอบ-P และองค์ประกอบ-I ที่สามารถปรับให้เออนเอียงไปทางด้านใดด้านหนึ่งเชิงเศษส่วนได้ ตัวควบคุม TID จึงได้รับการพิจารณาให้เป็นตัวควบคุมเชิงเศษส่วน (fractional controller) และได้รับการยืนยันว่าสามารถควบคุมระบบได้นุ่มนวลกว่าตัวควบคุม PID [3-4]

อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่สำคัญของตัวควบคุม PID และ TID คือผลกระทบจากองค์ประกอบ P และ D ของตัวควบคุม PID และผลกระทบจากองค์ประกอบ T และ D ของตัวควบคุม TID ที่วางตัวอยู่ในวิถีป้อนไปหน้า (forward path) ซึ่งเมื่อได้รับสัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด เช่น สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได (step input) สัญญาณควบคุม (control signal) ของตัวควบคุม PID และ TID จะมีขนาดสูงมาก ปรากฏการณ์ดังกล่าวรู้จักกันในนาม set-point kick ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดปัญหาในการอนุวัตตัวควบคุมเพื่อใช้งานจริง ปัญหาดังกล่าวสามารถ

*ผู้ประพันธ์บทความ

แก้ไขโดยการใช้ตัวควบคุม I-PD หรือ I-TD ที่มีการวางองค์ประกอบ I ไว้ในวิถีป้อนไปหน้า และย้ายองค์ประกอบ P และ D (ของตัวควบคุม PID) และองค์ประกอบ T และ D (ของตัวควบคุม TID) มาไว้ในวิถีป้อนกลับ (feedback path) [5] จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ได้มีการนำเทคนิคการค้นหาแบบอภิศักศึกษาสำนึกมาทำการออกแบบตัวควบคุม I-PD อย่างเหมาะสม เช่น การหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) [6] และการค้นหาแบบนกกาเหว่า (cuckoo search: CS) [7] เป็นต้น และการออกแบบตัวควบคุม I-TD อย่างเหมาะสม เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm: GA) [8], ขั้นตอนวิธีแบบหิ่งห้อย (firefly algorithm: FA) [9], การหาค่าเหมาะที่สุดแบบหมาป่าสีเทา (grey-wolf optimization: GWO) [9] และขั้นตอนวิธีแบบตั๊กแตน (grass-hopper algorithm: GHA) [9] เป็นต้น

บทความวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้เชิงดัดแปร (modified flower pollination algorithm: MoFPA) [10] ซึ่งพัฒนามาจากขั้นตอนวิธี FPA แบบดั้งเดิม [11] เพื่อออกแบบตัวควบคุม I-PD และ I-TD อย่างเหมาะสม สำหรับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ BLDC และเปรียบเทียบผลกับตัวควบคุม PID และ TID ในหัวข้อต่อไปจะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุม PID, TID, I-PD และ I-TD, การก่อรูปปัญหาการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ BLDC โดยขั้นตอนวิธี MoFPA, ผลการออกแบบและการอภิปราย และสรุปผล ตามลำดับ

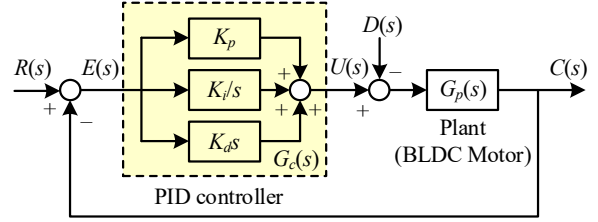
2. ตัวควบคุม PID, TID, I-PD และ I-TD

2.1 ตัวควบคุม PID

ตัวควบคุม PID [1-2] มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโดเมนเวลาดังแสดงในสมการที่ (1) เมื่อ $e(t)$ คือสัญญาณความคลาดเคลื่อน (error signal) ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม, $u(t)$ คือสัญญาณควบคุม (control signal) ซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม, K_p คืออัตราขยายเชิงสัดส่วน (proportional gain), K_i คืออัตราขยายเชิงปริพันธ์ (integral gain) และ K_d คืออัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (derivative gain) จากสมการที่ (1) จะพบว่า ตัวควบคุม PID มีค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับจูนจำนวน 3 ตัว ได้แก่ K_p , K_i และ K_d ตัวควบคุม PID จะวางตัวอยู่ในวิถีป้อนไปหน้าของวงควบคุม (control loop) ดังแสดงในรูปที่ 1 ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบในรูปที่ 1 แสดงในสมการที่ (2) จากรูปที่ 1 จะพบว่า ตัวควบคุม PID มีโครงสร้างขนาน โดยองค์ประกอบ P, I และ D จะวางตัวอยู่ในวิถีป้อนไปหน้า เมื่อได้รับสัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ set-point kick ในสัญญาณควบคุม

$$u(t)|_{PID} = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G_p(s)}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G_p(s)} \quad (2)$$



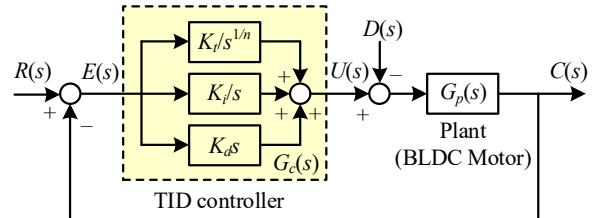
รูปที่ 1 วงควบคุม PID

2.2 ตัวควบคุม TID

ตัวควบคุม TID [3-4] มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโดเมนเวลาดังแสดงในสมการที่ (3) เมื่อ K_t คืออัตราขยายเชิงเอียง (tilt gain) และ n คืออันดับของการหาปริพันธ์แบบเอียงเชิงเศษส่วน (order of fractional tilt integration) จากสมการที่ (3) จะพบว่า ตัวควบคุม TID มีค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับจูนจำนวน 4 ตัว ได้แก่ K_t , K_i , K_d และ n เมื่อ $n \in \mathbb{R}^+$ ตัวควบคุม TID จะวางตัวอยู่ในวิถีป้อนไปหน้าของวงควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2 ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบในรูปที่ 2 แสดงในสมการที่ (4) จากรูปที่ 2 จะพบว่า ตัวควบคุม TID มีโครงสร้างขนาน โดยองค์ประกอบ T, I และ D จะวางตัวอยู่ในวิถีป้อนไปหน้า เมื่อได้รับสัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ set-point kick ในสัญญาณควบคุมเช่นเดียวกับตัวควบคุม PID

$$u(t)|_{TID} = K_t \frac{d^{-1/n} e(t)}{dt} + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\left(\frac{K_t}{s^{1/n}} + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G_p(s)}{1 + \left(\frac{K_t}{s^{1/n}} + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G_p(s)} \quad (4)$$



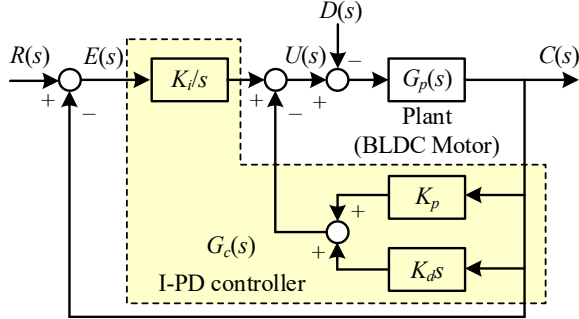
รูปที่ 2 วงควบคุม TID

2.3 ตัวควบคุม I-PD

ตัวควบคุม I-PD [5] มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโดเมนเวลาดังแสดงในสมการที่ (5) เมื่อ $c(t)$ คือสัญญาณเอาต์พุตของระบบ (system output signal) จากสมการที่ (5) จะพบว่า ตัวควบคุม I-PD มีค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับจูนจำนวน 3 ตัว ได้แก่ K_p , K_i และ K_d เช่นเดียวกับตัวควบคุม PID สำหรับตัวควบคุม I-PD นั้น องค์ประกอบ I จะวางตัวอยู่ในวิถีป้อนไปหน้า ส่วนองค์ประกอบ P และ D จะวางตัวอยู่ในวิถีป้อนกลับของวงควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดแสดงดังสมการที่ (6) ด้วยโครงสร้างของวงควบคุมในรูปที่ 3 เมื่อระบบได้รับสัญญาณอินพุตที่เปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ตัวควบคุม I-PD จะสามารถลดปรากฏการณ์ set-point kick ที่เกิดขึ้นในสัญญาณควบคุมได้

$$u(t)|_{I-PD} = K_i \int e(t)dt - \left[K_p c(t) + K_d \frac{dc(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

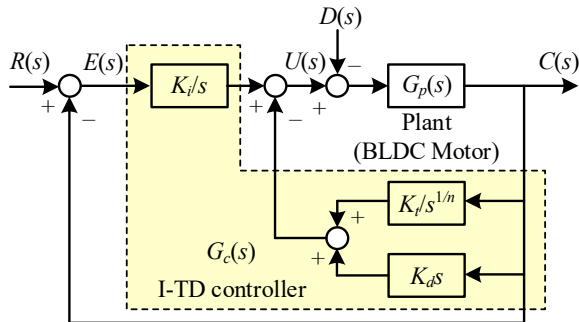
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\left(\frac{K_i}{s} \right) G_p(s)}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G_p(s)} \quad (6)$$



รูปที่ 3 วงควบคุม I-PD

2.4 ตัวควบคุม I-TD

ตัวควบคุม I-TD [5, 8-9] มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโดเมนเวลา ดังแสดงในสมการที่ (7) ซึ่งพบว่า ตัวควบคุม I-TD มีค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับจูนจำนวน 4 ตัว ได้แก่ K_i , K_t , K_d และ n เมื่อ $n \in \mathbb{R}^+$ เช่นเดียวกับ ตัวควบคุม TID สำหรับตัวควบคุม I-TD นั้น องค์ประกอบ I จะวางตัวอยู่ในวิธีป้อนไปหน้า ส่วนองค์ประกอบ T และ D จะวางตัวอยู่ในวิธีป้อนกลับของวงควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด แสดงดังสมการที่ (8) ด้วยโครงสร้างของวงควบคุมในรูปที่ 4 เมื่อระบบได้รับสัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ตัวควบคุม I-TD จะสามารถลดปรากฏการณ์ set-point kick ที่เกิดขึ้นในสัญญาณควบคุมได้ เช่นเดียวกับตัวควบคุม I-PD



รูปที่ 4 วงควบคุม I-TD

$$u(t)|_{I-TD} = K_i \int e(t)dt - \left[K_t \frac{d^{-1/n} c(t)}{dt} + K_d \frac{dc(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\left(\frac{K_i}{s} \right) G_p(s)}{1 + \left(\frac{K_t}{s^{1/n}} + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G_p(s)} \quad (8)$$

3. การก่อรูปปัญหาการออกแบบ

3.1 มอเตอร์ BLDC

มอเตอร์ BLDC ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นมอเตอร์ของบริษัท Beijing Electrotech รุ่น 072-201105-220 พิกัด 471 W, 220 V, 4 Poles, 23,000 rpm จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ดังกล่าวในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับ-3 ได้รับการระบุเอกลักษณ์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 20,000 rpm ด้วยการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (adaptive tabu search: ATS) ดังแสดงในสมการที่ (9) [12] ดังนั้น แบบจำลอง $G_p(s)$ ในสมการที่ (9) จะถูกใช้เป็นพลานต์ (plant) ของระบบ เพื่อการออกแบบตัวควบคุม PID, TID, I-PD และ I-TD ด้วยขั้นตอนวิธี MoFPA ต่อไป

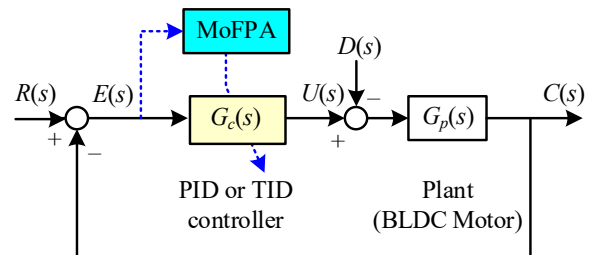
$$G_p(s) = \frac{0.2059 \times 10^8}{0.0597s^3 + 31.2477s^2 + 364.4712s + 1,069.9862} \quad (9)$$

3.2 กรอบงานการออกแบบตัวควบคุม

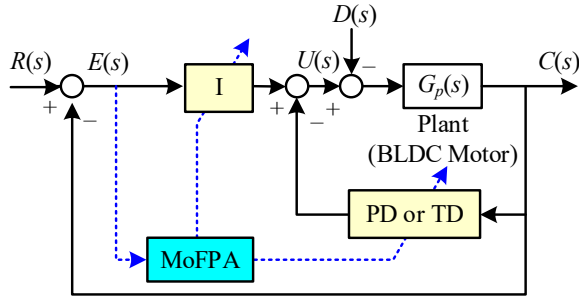
กรอบงานการออกแบบตัวควบคุม PID และ TID สำหรับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ BLDC ด้วยขั้นตอนวิธี MoFPA แสดงในรูปที่ 5 ในขณะที่กรอบงานการออกแบบตัวควบคุม I-PD และ I-TD สำหรับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ BLDC ด้วยขั้นตอนวิธี MoFPA แสดงในรูปที่ 6 เมื่อกำหนดให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) J อยู่ในรูปของผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (sum-squared error: SSE) ระหว่างอินพุตอ้างอิง r และเอาต์พุต c ดังแสดงในสมการที่ (10) เมื่อ N คือจำนวนข้อมูล ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J จะถูกป้อนให้กับขั้นตอนวิธี MoFPA เพื่อทำให้มีค่าน้อยที่สุด ด้วยการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสม ภายในขอบเขต (ปริภูมิการค้นหา) และเงื่อนไขการออกแบบดังแสดงในสมการที่ (11)

$$\text{Minimize } J = \sum_{i=1}^N (r_i - c_i)^2 \quad (10)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Subject to } \left. \begin{array}{l} t_r \leq t_{r_max}, M_p \leq M_{p_max}, \\ t_s \leq t_{s_max}, e_{ss} \leq e_{ss_max}, \\ K_{p_min} \leq K_p \leq K_{p_max}, \\ K_{i_min} \leq K_i \leq K_{i_max}, \\ K_{d_min} \leq K_d \leq K_{d_max} \end{array} \right\} : \text{PID \& I-PD} \\ \left. \begin{array}{l} K_{t_min} \leq K_t \leq K_{t_max}, \\ K_{i_min} \leq K_i \leq K_{i_max}, \\ K_{d_min} \leq K_d \leq K_{d_max}, \\ n_{min} \leq n \leq n_{max} \end{array} \right\} : \text{TID \& I-TD} \end{array} \right\} \quad (11)$$



รูปที่ 5 กรอบงานการออกแบบตัวควบคุม PID และ TID ด้วย MoFPA



รูปที่ 6 กรอบงานการออกแบบตัวควบคุม I-PD และ I-TD ด้วย MoFPA

จากสมการที่ (11) t_r คือช่วงเวลารับขึ้น (rise time) ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่เกิน t_{r_max} , M_p คือเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูงสุด (maximum percent overshoot) ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่เกิน M_{p_max} , t_s คือช่วงเวลาที่เข้าที่ (settling time) ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่เกิน t_{s_max} และ e_{ss} คือค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (steady-state error) ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่เกิน e_{ss_max} สำหรับตัวควบคุม PID และ I-PD $[K_{p_min}, K_{p_max}]$ คือปริภูมิการค้นหาค่าของ K_p , $[K_{i_min}, K_{i_max}]$ คือปริภูมิการค้นหาค่าของ K_i และ $[K_{d_min}, K_{d_max}]$ คือปริภูมิการค้นหาค่าของ K_d สำหรับตัวควบคุม TID และ I-TD $[K_{t_min}, K_{t_max}]$ คือปริภูมิการค้นหาค่าของ K_t , $[K_{i_min}, K_{i_max}]$ คือปริภูมิการค้นหาค่าของ K_i , $[K_{d_min}, K_{d_max}]$ คือปริภูมิการค้นหาค่าของ K_d และ $[n_{min}, n_{max}]$ คือปริภูมิการค้นหาค่าของ n

3.3 ขั้นตอนวิธี MoFPA

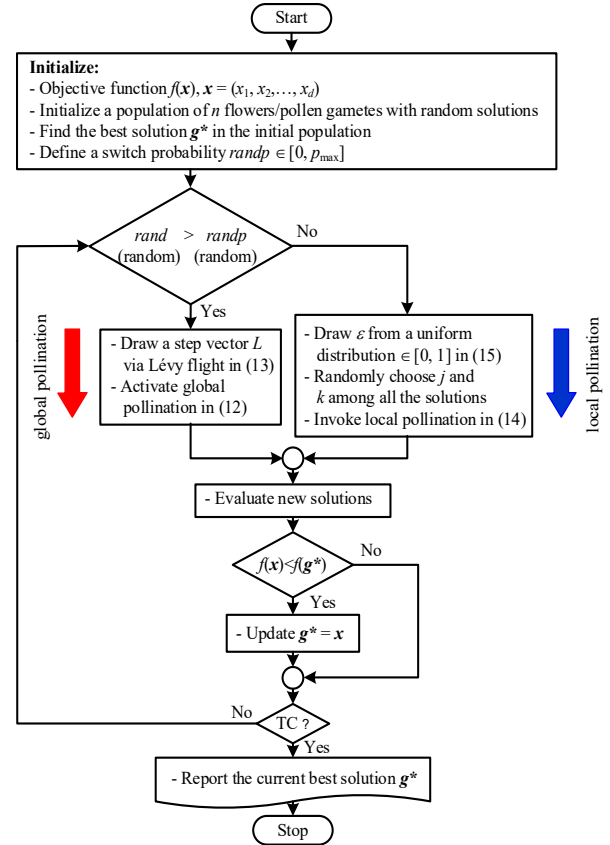
ขั้นตอนวิธี MoFPA ได้รับการนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.2020 [10] ในฐานะเทคนิคการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบอภิศักขาสำนึกที่ทรงประสิทธิภาพ ซึ่งได้รับการพัฒนามาจากขั้นตอนวิธี FPA แบบดั้งเดิม [11] โดยเลียนแบบพฤติกรรมการผสมเกสรของไม้ดอกตามธรรมชาติ ซึ่งแบ่งออกเป็นการผสมเกสรดอกไม้ด้วยตัวเอง (self-pollination) หรือการผสมเกสรเฉพาะที่ (local pollination) และการผสมเกสรดอกไม้แบบไขว้ (cross-pollination) หรือการผสมเกสรวงกว้าง (global pollination) ขั้นตอนวิธี MoFPA สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 7 ซึ่งจะพบเงื่อนไข ถ้า $rand > randp$ (เมื่อ $rand$ และ $randp$ คือค่าสุ่มในช่วง 0 – 1) ขั้นตอนวิธี MoFPA จะเรียกใช้การผสมเกสรวงกว้าง โดยอาศัยการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบ Lévy (Lévy distribution) ดังแสดงในสมการที่ (12) – (13) ไม่เช่นนั้น ขั้นตอนวิธี MoFPA จะเรียกใช้การผสมเกสรเฉพาะที่ โดยอาศัยการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป (uniform distribution) ดังแสดงในสมการที่ (14) – (15)

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L(x_i^t - g^*) \quad (12)$$

$$L \approx \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\pi\lambda/2)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}}, \quad (s \gg s_0 > 0) \quad (13)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \varepsilon(x_j^t - x_k^t) \quad (14)$$

$$\varepsilon(\rho) = \begin{cases} 1/(b-a), & a \leq \rho \leq b \\ 0, & \rho < a \text{ or } \rho > b \end{cases} \quad (15)$$



รูปที่ 7 แผนภูมิการทำงานของขั้นตอนวิธี MoFPA

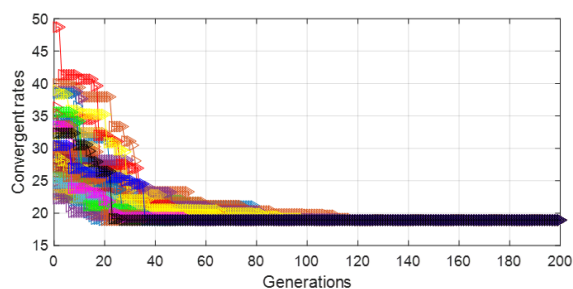
4. ผลการออกแบบและการอภิปราย

ขั้นตอนวิธี MoFPA ได้ถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมการค้นหาค่าเหมาะที่สุดด้วยโปรแกรม MATLAB 2018b (License No.#40637337) และ FOMCON Toolbox [13-14] เพื่อประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i5-3470 CPU@3.60GHz, 4.0GB-RAM ค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธี MoFPA ที่เหมาะสม ได้รับการทดสอบเบื้องต้นโดยการปรับค่าต่าง ๆ ดังนี้ จำนวนดอกไม้ $n = 5, 10, 15, \dots, 50$ และ $randp$ คือค่าสุ่มที่กำหนดให้อยู่ในช่วง 0 – 0.25, 0 – 0.50, และ 0 – 0.75 ซึ่งพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ $n = 30$ และ $randp$ คือค่าสุ่มในช่วง 0 – 0.50 จากนั้น ดำเนินการออกแบบตัวควบคุม PID, TID, I-PD และ I-TD โดยแต่ละตัวควบคุมจะดำเนินการออกแบบจำนวน 50 ครั้ง (trial) แต่ครั้งจะยุติการค้นหาเมื่อจำนวนรอบการค้นหาเท่ากับจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด $Max_Gen = 200$ ขั้นตอนวิธี MoFPA จะค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสม เพื่อให้ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J ในสมการที่ (10) มีค่าน้อยที่สุด และสอดคล้องกับขอบเขตและเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด ดังแสดงในสมการที่ (16)

จากการออกแบบตัวควบคุม PID, TID, I-PD และ I-TD ด้วยขั้นตอนวิธี MoFPA จำนวน 50 ครั้ง อัตราการรู้เข้าหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธี MoFPA ที่กระทำกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J ในสมการที่ (10) ในกรณีการออกแบบตัวควบคุม I-TD แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ขั้นตอนวิธี

MoFPA สามารถออกแบบตัวควบคุม I-TD ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับ อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธี MoFPA ในกรณีการออกแบบ ตัวควบคุม PID, TID และ I-PD จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 8 จึง ไม่ขอเสนอในที่นี้ ขั้นตอนวิธี MoFPA ใช้เวลาค้นหาเฉลี่ยสำหรับการ ออกแบบตัวควบคุม PID และ I-PD เท่ากับ 7.24 วินาที และใช้เวลาค้นหา เฉลี่ยสำหรับการออกแบบตัวควบคุม TID และ I-TD เท่ากับ 8.17 วินาที

$$\begin{aligned} \text{Subject to } & t_r \leq 0.50 \text{ sec}, M_p \leq 15.00\%, \\ & t_s \leq 1.00 \text{ sec}, e_{ss} \leq 0.01\%, \\ & 0 \leq K_p, K_i \leq 50, \\ & 0 \leq K_d \leq 200, \\ & 0 \leq K_i \leq 200, \\ & 0 \leq K_d \leq 2.00, \\ & 0 \leq n \leq 100 \end{aligned} \quad (16)$$



รูปที่ 8 อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธี MoFPA ในการออกแบบตัวควบคุม I-TD

ผลตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ BLDC แสดงดังรูปที่ 9 ในขณะที่สัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งพบว่า ตัวควบคุม I-PD และ I-TD จะให้ผลตอบสนองในสถานะชั่วคราวที่ล่าช้ากว่าตัวควบคุม PID

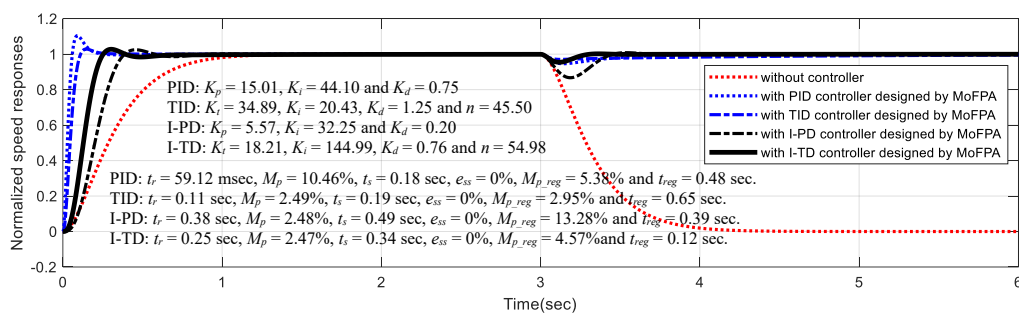
และ TID อยู่เล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาจากสัญญาณควบคุม จะพบว่า ตัวควบคุม I-PD และ I-TD สามารถลดปรากฏการณ์ set-point kick ได้อย่างน่าพึงพอใจ นอกจากนี้ ยังพบว่า ตัวควบคุม I-TD สามารถให้ ผลตอบสนองของระบบที่รวดเร็วและปรากฏการณ์สั่นไหวที่น้อยกว่า ตัวควบคุม I-PD

5. สรุป

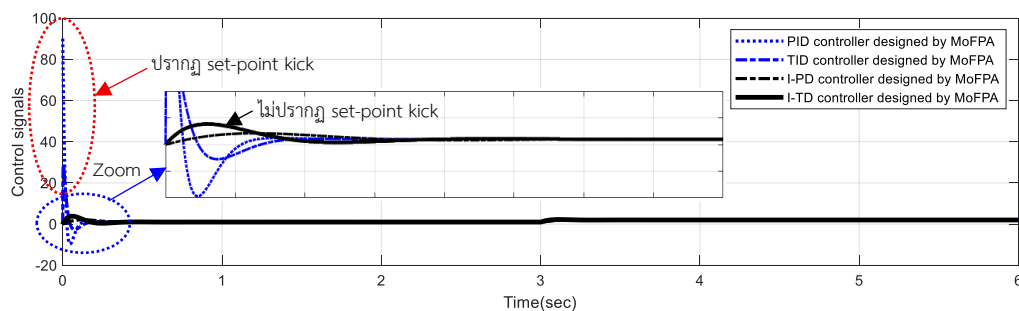
บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม I-PD และ I-TD อย่าง เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ BLDC โดยใช้ขั้นตอนวิธี MoFPA จากผลการออกแบบ พบว่า ขั้นตอนวิธี MoFPA สามารถออกแบบ ตัวควบคุมได้อย่างเหมาะสม และสอดคล้องกับเงื่อนไขการออกแบบ ที่กำหนด และถึงแม้ว่าตัวควบคุม I-PD และ I-TD จะให้ผลตอบสนอง ในสถานะชั่วคราวที่มีคุณภาพต่ำกว่าตัวควบคุม PID และ TID ไปบ้าง แต่สามารถลดปรากฏการณ์ set-point kick ได้อย่างน่าพึงพอใจ ยิ่งกว่านั้น ตัวควบคุม I-TD ยังสามารถให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและปรากฏการณ์ สั่นไหวที่น้อยกว่าตัวควบคุม I-PD อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Minorsky, "Directional stability of automatically steered bodies," *Journal of the American Society of Naval Engineering*, vol. 34, no. 2, 1922, pp. 280-309.
- [2] A. O'Dwyer, *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*, Imperial College Press, 2009.
- [3] B. J. Lurie, "Three-parameter tunable tilt-integral-derivative (TID) controller," *United States Patent, 5-371-670*, USA, 1994.



รูปที่ 9 ผลตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ BLDC



รูปที่ 10 สัญญาณควบคุม

- [4] M. Z. Malik, S. Zhang, G. Chen, and M. L. Alghaythi, "Robust tilt-integral-derivative controllers for fractional-order interval systems," *Mathematics*, vol. 11, 2023, pp. 1-14.
- [5] M. A. Johnson, and M. H. Moradi, *Control: New Identification and Design Methods*, Springer, London, UK, 2005.
- [6] S. J. S. Prasad, and P. A. Balakrishnan, "PSO based I-PD controller for barrel temperature control in plastic injection molding system," *European Journal of Scientific Research*, vol. 80, 2012, pp. 351-357.
- [7] D. Puangdownreong, A. Nawikavatan, and C. Thammarat, "Optimal design of I-PD controller for DC motor speed control system by cuckoo search," *Procedia Computer Science*, vol. 86, 2016, pp. 83-86.
- [8] D. Sain, S. K. Swain, and S. K. Mishra, "TID and I-TD controller design for magnetic levitation system using genetic algorithm," *Perspectives in Science*, vol. 8, 2016, pp. 370-373.
- [9] S. K. Bhagat, N. R. Babu, L. C. Sakia, and D. K. Raju, "Maiden application of meta-heuristic techniques with optimized integral minus tilt-derivative controller for AGC of multi-area multi-source system," *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*, vol. 7, no. 28, 2020, pp. 1-9.
- [10] N. Pringsakul, and D. Puangdownreong, "MoFPA-based PIDA controller design optimization for electric furnace temperature control system," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 16, no. 6, 2020, pp. 1863-1876.
- [11] X. S. Yang, "Flower pollination algorithm for global optimization," *Unconventional Computation and Natural Computation, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7445, 2012, pp. 240-249.
- [12] K. Chaicharoenaudomrung, S. Wansungnoen, J. Pakdeeto, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "Parameter identification of BLDC motor by using adaptive tabu search," *Proceedings of the International Conference on Power, Energy and Innovation (ICPEI2021)*, 2021, pp. 5-8.
- [13] A. Tepljakov, F. Petlenkov, and J. Belikov, "FOMCON: a MATLAB toolbox for fractional-order system identification and control," *International Journal of Microelectronics and Computer Science*, vol. 2, no. 2, 2011, pp. 51-62.
- [14] A. Tepljakov, E. Petlenkov and J. Belikov, "FOMCON: Fractional order modeling and control toolbox for

MATLAB," *Proceedings of the 18th international conference of Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES)*, 2011, pp. 684-689.

ประวัติผู้เขียนบทความ



กิตติศักดิ์ ฤกษ์ สำเร็จการศึกษา ปร.ด. สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ พ.ศ.2563 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น งานวิจัยที่สนใจได้แก่ วิศวกรรมระบบควบคุม การจัดการพลังงาน การจัดการงานวิศวกรรม และการประยุกต์เทคนิคการค้นหาลำดับการศึกษาสำหรับแก้ปัญหาทางวิศวกรรม



อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร สำเร็จการศึกษา วศ.ด. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน พ.ศ.2559 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น งานวิจัยที่สนใจได้แก่ วิศวกรรมระบบควบคุม การจัดการพลังงาน การจัดการงานวิศวกรรม และการประยุกต์เทคนิคการค้นหาลำดับการศึกษาสำหรับแก้ปัญหาทางวิศวกรรม



ทิวา จิตหวัง สำเร็จการศึกษา ปร.ด. สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ พ.ศ.2563 ปัจจุบันเป็นนักวิจัยอิสระ งานวิจัยที่สนใจได้แก่ วิศวกรรมระบบควบคุม การจัดการพลังงาน การจัดการงานวิศวกรรม และการประยุกต์เทคนิคการค้นหาลำดับการศึกษาสำหรับแก้ปัญหาทางวิศวกรรม



ไชโย ธรรมรัตน์ สำเร็จการศึกษา ปร.ด. สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ พ.ศ.2565 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ งานวิจัยที่สนใจได้แก่ วิศวกรรมระบบควบคุม และการประยุกต์เทคนิคการค้นหาลำดับการศึกษาสำหรับแก้ปัญหาทางวิศวกรรม



เดชา พงดางเรือง สำเร็จการศึกษา วศ.ด. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันเป็นรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ งานวิจัยที่สนใจได้แก่ วิศวกรรมระบบควบคุม และการประยุกต์เทคนิคการค้นหาลำดับการศึกษาสำหรับแก้ปัญหาทางวิศวกรรม