

การออกแบบตัวควบคุมไอ-พีดีอย่างเหมาะสม
เพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมด้วยขั้นตอนวิธีการถ่ายละอองเรณูดอกไม้
สำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
Optimal I-PD Controller Design to Reduce Set-Point Kick
by Flower Pollination Algorithm for DC Motor Speed Control

สัตถาภูมิ ไทยพานิช¹ ไพศาล แห้วเพชร² ดนุพล คำปัญญา^{3*}

Sattarpoom Thaipanit¹ Paisan Haewpecht² Danupon Kumpanya^{3*}

¹ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹ Faculty of Business Administration and Information Technology,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

² วิทยาลัยชุมชนอุทัยธานี สถาบันวิทยาลัยชุมชน

² Uthai Thani Community College, Institute of Community Colleges

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

³ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

*Corresponding author's e-mail: danupon.k@rmutsb.ac.th

Received: July 15, 2025

Revised: September 03, 2025

Accepted: September 05, 2025

บทคัดย่อ

ตัวควบคุมพีไอดีได้รับการนำเสนอในฐานะตัวควบคุมหลักของระบบควบคุมป้อนกลับ ปัญหาหลักของตัวควบคุมพีไอดีคือ เมื่อรับสัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมพีไอดีจะมีพฤติกรรมที่เรียกว่า การขยายตัวของสัญญาณควบคุม ซึ่งส่งผลกระทบต่อชุดขับเคลื่อนเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นนั้น จึงเลือกใช้รูปแบบที่ดัดแปรของตัวควบคุมพีไอดี นั่นคือ ตัวควบคุมไอ-พีดี ในงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอการออกแบบหาตัวควบคุมไอ-พีดีอย่างเหมาะสม เพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมด้วยขั้นตอนวิธีการถ่ายละอองเรณูดอกไม้ สำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากผลที่ได้รับ พบว่า ตัวควบคุมไอ-พีดีสามารถลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลการจำลองยังได้รับการยืนยันจากผลการทดสอบการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกพัฒนาขึ้นจริงในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: ตัวควบคุมไอ-พีดี; ตัวควบคุมพีไอดี; การขยายตัวของสัญญาณควบคุม; ขั้นตอนวิธีการถ่ายละอองเรณูดอกไม้; มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Abstract

The proportional–integral–derivative (PID) controller is widely used as the main controller in feedback control systems. However, a major drawback of the conventional PID controller is its sensitivity to sudden changes in the reference input, which leads to control signal amplification, commonly known as *set-point kick*. This phenomenon can adversely affect actuators in practical applications. To address this issue, the PID controller is modified into an I–PD controller, in which the proportional and derivative actions are applied only to the process variable rather than the reference signal.

This research presents the design of an optimal I–PD controller aimed at reducing the set-point kick phenomenon. The controller parameters are optimized using the Flower Pollination Algorithm (FPA) and applied to a DC motor speed control system. The results demonstrate that the proposed I–PD controller significantly reduces control signal amplification compared to the conventional PID controller. Furthermore, the simulation results are validated through experimental implementation on a laboratory-scale DC motor speed control system, confirming the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: I-PD Controller; PID Controller; Set-point Kick; Flower Pollination Algorithm; DC Motor

บทนำ

ตัวควบคุมพีไอดี (proportional-integral-derivative: PID) ถูกนำเสนอครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1922 Minorsky N. (1922) และได้ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกในภาคอุตสาหกรรมเมื่อปี ค.ศ. 1939 Dwyer A. (2003) เนื่องจากใช้งานง่ายและทำได้จริง ตัวควบคุม PID จึงได้ถูกนำไปใช้งานเพิ่มมากขึ้นในระบบควบคุมป้อนกลับ (feedback control system) มากกว่าหลายทศวรรษ โดยทั่วไป ตัวควบคุม PID จะวางตัวอยู่บนทางเดินป้อนไปหน้า (forward path) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณควบคุม (control signal) กล่าวคือ องค์ประกอบของ P และ D ในตัวควบคุม PID มีหน้าที่ปรับค่าแบบสัดส่วน (proportional) และค่าอนุพันธ์ (derivative) ของสัญญาณอินพุต ขณะที่ สัญญาณอินพุต มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันก่อให้เกิดสัญญาณควบคุมมีค่าที่สูงมาก ในระบบควบคุมป้อนกลับจะเรียกว่า การขยายตัวของสัญญาณควบคุม (proportional and derivative kick หรือ set-point kick) ที่ส่งผลกระทบต่อชุดขับเคลื่อน (actuator devices) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นนั้น จึงเลือกใช้รูปแบบที่ดัดแปรของตัวควบคุม PID นั่นคือ ตัวควบคุมไอ-พีดี (I-PD) Sato T. and Inoue A. (2004) องค์ประกอบของค่าปริพันธ์ (integral: I) วางอยู่บนทางเดินป้อนไปหน้า และ องค์ประกอบของค่าแบบสัดส่วน P และค่าอนุพันธ์ D จะถูกย้ายไปยังทางเดินป้อนกลับ (feedback path)

ของวงรอบการควบคุม

ปัจจุบันการควบคุมปรับเปลี่ยนกระบวนการที่ใหม่ Glover F. and Kochenberger G. A. (2003) เทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติก (meta-heuristic optimization search techniques) Yang X. S. (2010) ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการออกแบบตัวควบคุม I-PD จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ได้มีการนำเทคนิคแบบเมตา-ฮิวริสติกมาออกแบบตัวควบคุม I-PD อย่างเหมาะสม อาทิเช่น การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) Prasad S. J. S. et.al (2012a) ได้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุม I-PD สำหรับแบบจำลองอันดับหนึ่งที่มีเวลาหน่วงโดยใช้ PSO Prasad S. J. S. et.al (2012b) ได้นำเสนอตัวควบคุม I-PD อย่างเหมาะสมด้วย PSO สำหรับระบบหน่วงเวลา อันดับสอง การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบแบคทีเรีย (bacterial foraging optimization: BFO) Rajinikanth V. and Latha K. (2012) ได้นำเสนอการปรับแต่งตัวควบคุม I-PD สำหรับระบบไม่เสถียรโดยใช้อัลกอริทึมแบบแบคทีเรียและการค้นหาแบบนกกาเหว่า (cuckoo search: CS) Puangdownreong D. et. al (2016) ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม I-PD สำหรับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วย CS เป็นต้น ที่ผ่านมามีเทคนิคแบบเมตา-ฮิวริสติก ที่มีการพัฒนาขึ้นมาตามลำดับ คือ ขั้นตอนวิธีการถ่ายละอองเรณูดอกไม้ (flower pollination algorithm: FPA) นับได้ว่าเป็นเมตา-ฮิวริสติกที่ทรงพลังและมีประสิทธิภาพมาก ได้รับการนำเสนอครั้งแรกโดย Yang เมื่อปี ค.ศ. 2012 Yang X. S. (2012) โดยใช้หลักการถ่ายละอองเรณูดอกไม้ จากดอกหนึ่งไปสู่ดอกหนึ่งผสานวิถีการบินแบบเลวี (Lévy flight) Pavlyukevich I. (2007) ซึ่งเป็นรูปแบบวิถีการบินของนกหรือแมลงในรูปแบบหนึ่ง ด้วยความที่เป็นขั้นตอนวิธีที่ไม่ซับซ้อน FPA จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น ระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบควบคุม และระบบปัญญาประดิษฐ์ งานวิจัยนี้ จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุม I-PD อย่างเหมาะสมเพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมด้วย FPA สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง Yadav S. P. and Tripathi V. K. (2006) ซึ่งเหมาะกับระบบควบคุมที่ไม่ต้องการความรวดเร็วมากนัก แต่เหมาะกับระบบควบคุมที่ต้องการความแม่นยำ และลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมที่ส่งผลกระทบต่อชุดขับเคลื่อนสำหรับระบบอินพุตเดี่ยวเอาต์พุตเดี่ยว (single input single output: SISO) ผลที่ได้รับจากตัวควบคุม I-PD ถูกนำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (มอเตอร์ DC) นอกจากนี้ ผลการจำลองได้รับการยืนยันจากผลการทดสอบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ DC ที่ถูกพัฒนาขึ้นจริงในห้องปฏิบัติการ ในหัวข้อต่อไปนี้จะนำเสนอขั้นตอนวิธีของ FPA ปัญหาการออกแบบตัวควบคุม แบบจำลองมอเตอร์ DC การออกแบบตัวควบคุม I-PD ด้วย FPA ผลการทดสอบและการอภิปรายผล และบทสรุป ตามลำดับ

ขั้นตอนวิธีของ FPA

ขั้นตอนวิธีของ FPA Yang X. S. (2012) เลียนแบบกระบวนการถ่ายละอองเรณูดอกไม้ของไม้ดอก ตามธรรมชาติผสานกับพฤติกรรมวิถีการบินของนกหรือแมลงรูปแบบหนึ่ง (pollinator) ในฐานะตัวถ่ายละออง

เรณูดอกไม้โดยอาศัยกระบวนการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเลวี (Lévy distribution) Pavlyukevich I. (2007) กระบวนการถ่ายละอองเรณูดอกไม้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การถ่ายละอองเรณูดอกไม้ด้วยตัวเอง (self-pollination) และการถ่ายละอองเรณูดอกไม้แบบไขว้ (cross-pollination) การถ่ายละอองเรณูดอกไม้ด้วยตัวเอง คือ การถ่ายละอองภายในต้นเดียวกันจากดอกเดียวกัน (autogamy) หรือจากดอกอื่นที่อยู่ต้นเดียวกัน (geitonogamy) Willmer P. (2011), Chittka L. et al. (1999) โดยที่ การถ่ายละอองเรณูดอกไม้ด้วยตัวเองจะเกิดขึ้นในไม้ดอกที่มีทั้งเรณูตัวผู้และเรณูตัวเมีย ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในระยะทางไกล ๆ โดยไม่อาศัยตัวพาหะเรียกว่าเป็นการถ่ายละอองเรณูเฉพาะที่ (local pollination) ส่วนการถ่ายละอองเรณูดอกไม้แบบไขว้ คือ การถ่ายละอองข้ามต้นที่ต้องอาศัยตัวพาหะ กระบวนการถ่ายละอองเรณูดอกไม้แบบไขว้ที่อาศัยพาหะที่มีชีวิต (alogamy) เช่น แมลง หรือผึ้ง ซึ่งเกิดขึ้นในระยะทางไกลๆ เรียกว่าเป็นการถ่ายละอองเรณูวงกว้าง (global pollination) ขั้นตอนวิธีของ FPA ที่นำเสนอโดย Yang อาศัยหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

หลักเกณฑ์ที่ 1 การถ่ายละอองเรณูดอกไม้แบบไขว้ที่ใช้สิ่งมีชีวิตเป็นพาหะถือเป็นการถ่ายละอองเรณูวงกว้าง ซึ่งใช้หลักการสร้างผลเฉลี่ยโดยอาศัยกระบวนการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเลวีดังแสดงในสมการที่ (1) เมื่อ $x_i^{(t+1)}$ คือ ผลเฉลี่ยในรอบถัดไป $x_i^{(t)}$ คือ ผลเฉลี่ยในรอบปัจจุบัน L คือ การสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเลวีดังแสดงในสมการที่ (2) เมื่อ $\Gamma(\lambda)$ คือ ฟังก์ชันแกมมามาตรฐาน (standard gamma function) และ g^* คือ ผลเฉลี่ยที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน

หลักเกณฑ์ที่ 2 การถ่ายละอองเรณูดอกไม้ด้วยตัวเองใช้สิ่งไม่มีชีวิตเป็นพาหะ ถือเป็นการถ่ายละอองเรณูเฉพาะที่ ซึ่งใช้หลักการในการสร้างผลเฉลี่ยโดยอาศัยกระบวนการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป (uniform distribution) ดังแสดงในสมการที่ (3) เมื่อ ε คือ การสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป $[0, 1]$

หลักเกณฑ์ที่ 3 ความคงตัวของดอกไม้ (flower constancy) จะถูกพิจารณาเป็นค่าความน่าจะเป็นในการถ่ายละอองเรณูเพื่อขยายพันธุ์ ซึ่งมีค่าเป็นสัดส่วนที่เหมือนกันระหว่างดอกไม้สองดอกที่เกี่ยวข้องกัน

หลักเกณฑ์ที่ 4 การถ่ายละอองเรณูเฉพาะที่ (local pollination) และการถ่ายละอองเรณูวงกว้าง (global pollination) ถูกควบคุมด้วยค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยน (switch probability) $p \in [0, 1]$

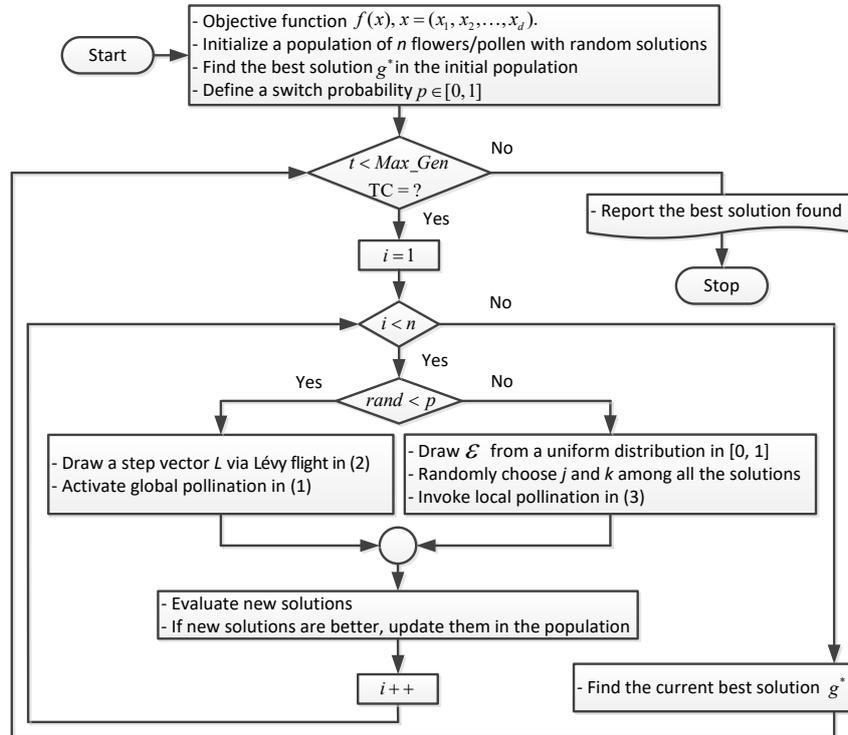
$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + L(x_i^{(t)} - g^*) \quad (1)$$

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

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \varepsilon(x_j^{(t)} - x_k^{(t)}) \quad (3)$$

เพื่อเป็นคำแนะนำสำหรับการใช้ค่าพารามิเตอร์ของ FPA ในเริ่มต้นจะกำหนดจำนวนเรณูดอกไม้ $n = 20 \rightarrow 50$ ค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยนระหว่างการถ่ายละอองเรณูวงกว้าง $p = 0.8$ ในขณะที่การถ่ายละอองเรณูเฉพาะที่ $\lambda = 1.5$ ทั้งนี้ ผู้ใช้งานสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของ FPA ตามความเหมาะสมจากคำแนะนำของ Yang ขั้นตอนวิธีของ FPA แสดงได้ด้วยแผนภูมิของ FPA แสดงได้ดังรูปที่ 1 เมื่อ จำนวนรุ่น

การค้นหาค่าสูงสุด (Max_Gen) ถูกใช้เป็นเกณฑ์ยุติการค้นหา (termination criteria: TC)

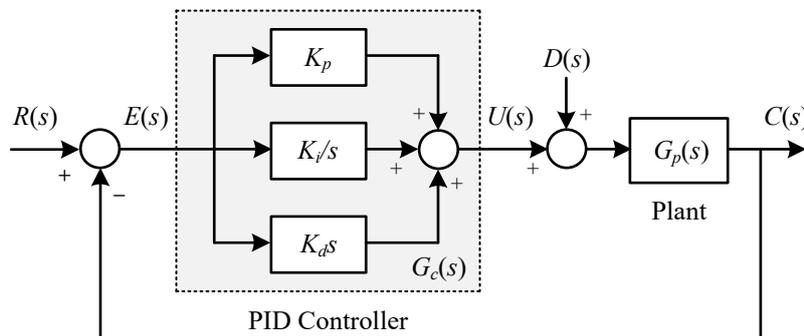


รูปที่ 1 แผนภูมิของ FPA Yang X. S. (2012)

ปัญหาการออกแบบตัวควบคุม

1) ตัวควบคุม PID

ตัวควบคุม PID มีโครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 2 ตัวควบคุม $G_c(s)$ จะรับสัญญาณคลาดเคลื่อน $E(s)$ มาผลิตสัญญาณควบคุม $U(s)$ เพื่อส่งไปควบคุมพลานต์ $G_p(s)$ ให้มีผลตอบสนองด้านเอาต์พุต $C(s)$ สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ พร้อมทั้งกำจัดสัญญาณรบกวนจากภายนอก $D(s)$ ไปพร้อมกัน



รูปที่ 2 โครงสร้างของตัวควบคุม PID

จากรูปที่ 2 ฟังก์ชันโดเมนเวลา (time-domain) และโดเมนเอส (s-domain) ของตัวควบคุม PID แสดงได้ดังสมการที่ (4) และสมการที่ (5) ถึงสมการที่ (6) ตามลำดับ โดยที่ K_p คือ อัตราขยายเชิงสัดส่วน (proportional gain) K_i คือ อัตราขยายเชิงปริพันธ์ (integral gain) และ K_d คือ อัตราขยายเชิงอนุพันธ์

(derivative gain)

$$u(t)|_{PID} = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

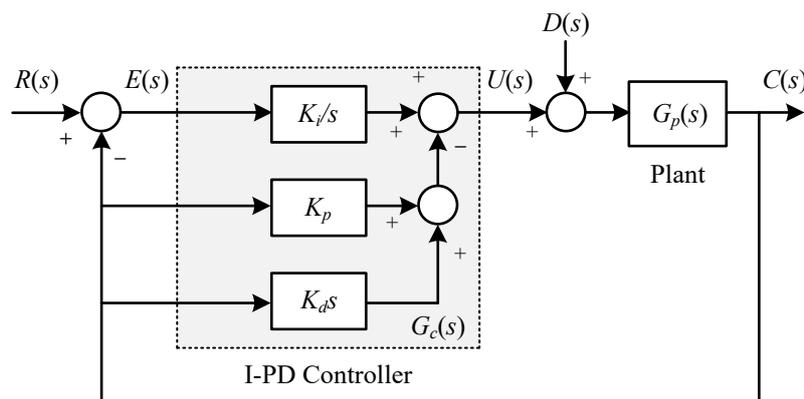
$$G_c(s)|_{PID} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (5)$$

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

เป้าหมายของการควบคุม คือ ผลตอบสนองด้านเอาต์พุต $C(s)$ สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ ด้วยเหตุนี้ ตัวควบคุมจะต้องปรับค่าสัญญาณควบคุม $U(s)$ อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สัญญาณคลาดเคลื่อน $E(s)$ มีค่าเป็นศูนย์ และกำจัดสัญญาณรบกวนจากภายนอก $D(s)$ ไปพร้อมกัน ตัวควบคุม PID เมื่อสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ทำให้สัญญาณควบคุม $U(s)$ มีค่าที่สูงมาก เรียกว่า การขยายตัวของสัญญาณควบคุม ส่งผลกระทบท่อชุดขับเร้าของระบบเกิดการอิ่มตัว (saturated) ผลตอบสนองด้านเอาต์พุต $C(s)$ จึงไม่สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$

2) ตัวควบคุม I-PD

ตัวควบคุม I-PD Sato T. and Inoue A. (2004) จะเป็นการดัดแปรโครงสร้างของตัวควบคุม PID เพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันและลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุม ดังนั้น ตัวควบคุม I-PD จะมีโครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยองค์ประกอบของ I จะอยู่บนทางเดินป้อนไปหน้า ส่วนองค์ประกอบของ P และ D จะอยู่บนทางเดินป้อนกลับในวงรอบการควบคุม



รูปที่ 3 โครงสร้างของตัวควบคุม I-PD

จากรูปที่ 3 อัตราขยายเชิงปริพันธ์ K_i จะมีผลตอบสนองต่อสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน $E(s)$ การเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจากการป้อนสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ จะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราขยายเชิง

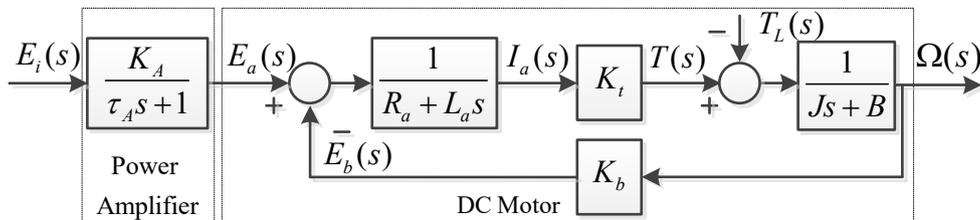
สัดส่วน K_p และอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ K_d เพราะถูกควบคุมจากเอาต์พุต $C(s)$ ของระบบควบคุม ดังนั้นฟังก์ชันโดเมนเวลาและโดเมนเอสของตัวควบคุม I-PD แสดงได้ดังสมการที่ (7) และสมการที่ (8)

$$u(t)|_{I-PD} = K_i \int e(t) dt - \left(K_p c(t) + K_d \frac{dc(t)}{dt} \right) \quad (7)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} \Big|_{I-PD} = \frac{\left(\frac{K_i}{s} \right) G_p(s)}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G_p(s)} \quad (8)$$

แบบจำลองมอเตอร์ DC

มอเตอร์ DC Yadav S. P. and Tripathi V. K. (2006) โดยทั่วไป ชุดขับเคลื่อนของระบบจะถูกแทนที่ด้วยตัวขยายกำลัง (power amplifier) แสดงได้ด้วยบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ DC

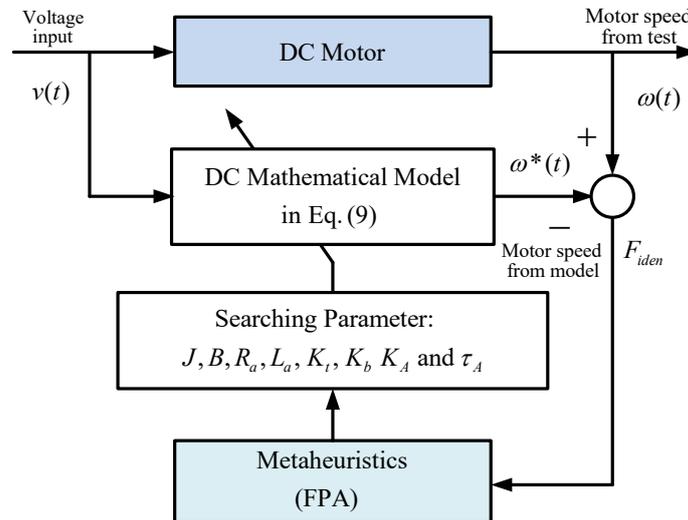
- เมื่อ R_a คือ ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature resistance), (Ω)
 L_a คือ ความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature inductance), (H)
 J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia), ($Kg - m^2$)
 B คือ แรงเสียดสีความฝืด (viscous friction), ($N \cdot m / (rad/sec)$)
 K_t คือ ค่าคงตัวแรงบิด (torque constant), ($N \cdot m$)
 K_b คือ ค่าคงตัวแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (back EMF constant), ($V / (rad/sec)$)
 K_A คือ ค่าคงตัวของตัวขยายกำลัง (amplifier gain)
 τ_A คือ ค่าคงตัวเวลาของตัวขยายกำลัง (amplifier time constant), (sec)
 $E_a(s)$ คือ แรงดันของขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature voltage), (V)
 $E_b(s)$ คือ แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (back EMF voltage), (V)
 $I_a(s)$ คือ กระแสของขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature current), (A)
 $T_L(s)$ คือ แรงบิดของมอเตอร์ (motor torque), ($N \cdot m$)
 $E_i(s)$ คือ แรงดันเข้า (input voltage), (V)
 $\Omega(s)$ คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (angular velocity), (rad/sec)

จากรูปที่ 4 แบบจำลองของมอเตอร์ DC สามารถเขียนในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function)

แสดงได้ดังสมการที่ (9)

$$\frac{\Omega(s)}{E_t(s)} = \left[\frac{K_A}{\tau_A s + 1} \right] \left[\frac{K_t}{JL_a s^2 + (BL_a + JR_a)s + (BR_a + K_t K_b)} \right] \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) พบว่า ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ DC หาได้จากการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ (parameter identification) Vas P. (1993), Eykhoff P. (1974) ของมอเตอร์ DC ด้วย FPA แสดงได้ดังรูปที่ 5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function: F_{iden}) คือ ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (sum-squared error: SSE) ระหว่างความเร็วพลาตันต์มอเตอร์ DC ที่ได้จากการทดสอบจริง $\omega(t)$ และความเร็วที่ได้จากแบบจำลอง $\omega^*(t)$ เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยสัญญาณอินพุตแบบเดียวกัน โดยที่ F_{iden} จะถูกป้อนให้กับ FPA เพื่อทำให้น้อยที่สุด ในการค้นหาพารามิเตอร์ $R_a, L_a, J, B, K_t, K_b, K_A$ และ τ_A ที่เหมาะสม จำนวนทั้งหมด 8 ตัว ภายในขอบเขต (bound) ที่กำหนดแสดงได้ดังสมการที่ (10)



รูปที่ 5 การระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ DC ด้วย FPA

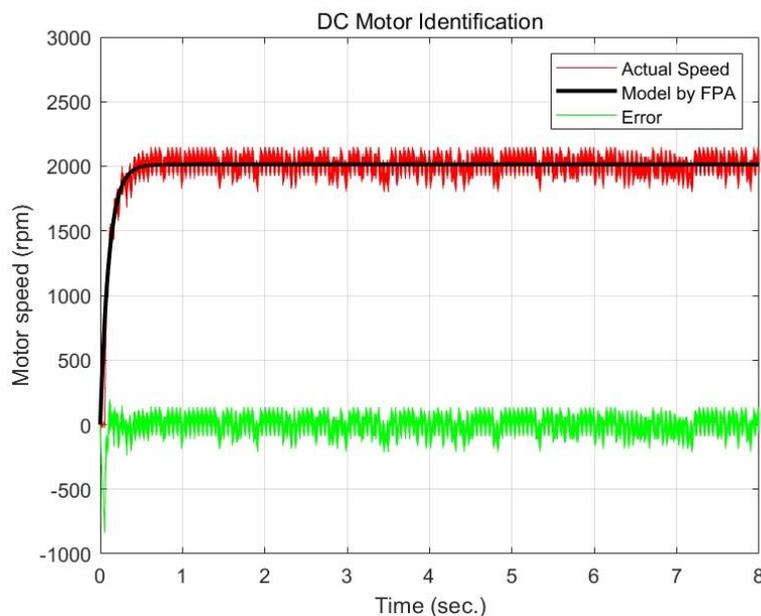
$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & F_{iden} = \sum_{i=1}^N [\omega(i) - \omega^*(i)]^2 \\ \text{subject to} \quad & \left. \begin{aligned} 0.0 \leq J \leq 0.01, \\ 0.0 \leq B \leq 0.01, \\ 0.0 \leq R_a \leq 5.0, \\ 0.0 \leq L_a \leq 0.05, \\ 0.0 \leq K_t \leq 0.5, \\ 0.0 \leq K_b \leq 0.5, \\ 0.0 \leq K_A \leq 0.5, \\ 0.0 \leq \tau_A \leq 0.05 \end{aligned} \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ DC ด้วย FPA ในเบื้องต้นกำหนดให้ $n = 25$ คือ จำนวนของเรณูดอกไม้ $p = 0.8$ คือ ค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยนระหว่างการถ่ายภาพละอองเรณูวงกว้าง และ $\lambda = 1.5$

คือ การถ่ายละอองเรณูเฉพาะที่ จำนวนรอบสูงสุด $Max_Gen = 1000$ รอบ เป็นเกณฑ์ยุติการค้นหา (TC) ดำเนินการค้นหาทั้งหมด 40 ครั้ง โดยให้สอดคล้องกับปริภูมิการค้นหา (search space) ดังสมการที่ (10) หลังจากยุติการค้นหาด้วย FPA จะได้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ DC แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ DC ด้วย FPA

Parameter	Symbol	Value	Unit
Motor Resistance	R_a	2.8000	Ω
Motor Inductance	L_a	0.0001	H
Load Torque Constant	K_t	0.0900	$N \cdot m/A$
Back EMF Constant	K_b	0.0696	$V/(rad/sec)$
Moment of Inertia	J	0.0003	$kg \cdot m^2$
Viscous Friction	B	0.0006	$N \cdot m/(rad/sec)$
Drive Gain	K_A	0.2880	–
Drive Time Constant	τ_A	0.0001	sec



รูปที่ 6 การระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ DC ด้วย FPA

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 6 พบว่า FPA สามารถค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด จำนวนทั้งหมด 8 ตัว ได้แก่ $R_a, L_a, K_t, K_b, J, B, K_A$ และ τ_A ของมอเตอร์ DC ไปพร้อมกันทั้งหมดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อ

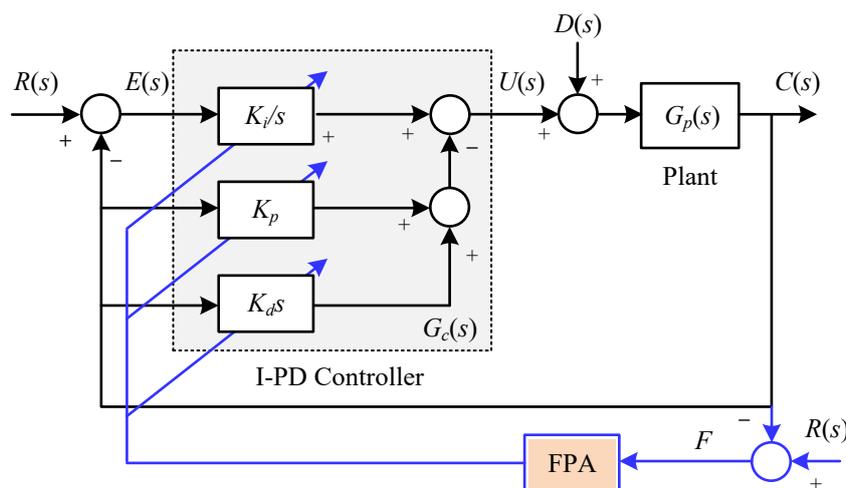
แทนค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ DC ที่ได้รับการระบุเอกลักษณ์ด้วย FPA ในตารางที่ 1 ลงในสมการที่ (9) สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s)$ ของพลานต์มอเตอร์ DC แสดงได้ดังสมการที่ (11)

$$G_p(s) = \left(\frac{0.02592}{1.5 \times 10^{-12} s^3 + 9.9 \times 10^{-8} s^2 + 0.00084s + 0.0079} \right) \quad (11)$$

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่ได้การระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ DC ด้วย FPA เพื่อนำไปออกแบบตัวควบคุม I-PD และตัวควบคุม PID เปรียบเทียบผลตอบสนองของการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ DC ด้วย FPA ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป

การออกแบบตัวควบคุม I-PD ด้วย FPA

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC จำเป็นต้องทราบค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องแม่นยำ ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้แบบจำลองของมอเตอร์ DC ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ DC ด้วย FPA ตามสมการที่ (11) ในฐานะพลานต์ที่ต้องการควบคุม $G_p(s)$ ดังแสดงในรูปที่ 3 ในขณะที่ การออกแบบตัวควบคุม I-PD ด้วย FPA แสดงได้ดังรูปที่ 7 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function: F) กำหนดได้จากผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (SSE) ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ และเอาต์พุต $C(s)$ ของระบบควบคุม แสดงได้ดังสมการที่ (12) ในการค้นหาพารามิเตอร์ K_p , K_i และ K_d จะกำหนดให้สอดคล้องกับปริภูมิการค้นหา (กำหนดจากกรอบการทำงานจริง) การป้อนค่า F ให้กับ FPA เพื่อทำให้น้อยที่สุดและสอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในสมการที่ (12) เมื่อ t_r คือ ช่วงเวลาขึ้น (rise time) คิดที่ 0 ถึง 100% ของค่าสุดท้าย M_p คือ ค่าพุ่งเกินสูงสุด (maximum overshoot) และ e_{ss} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัว (steady-state error)



รูปที่ 7 การออกแบบตัวควบคุม I-PD ด้วย FPA

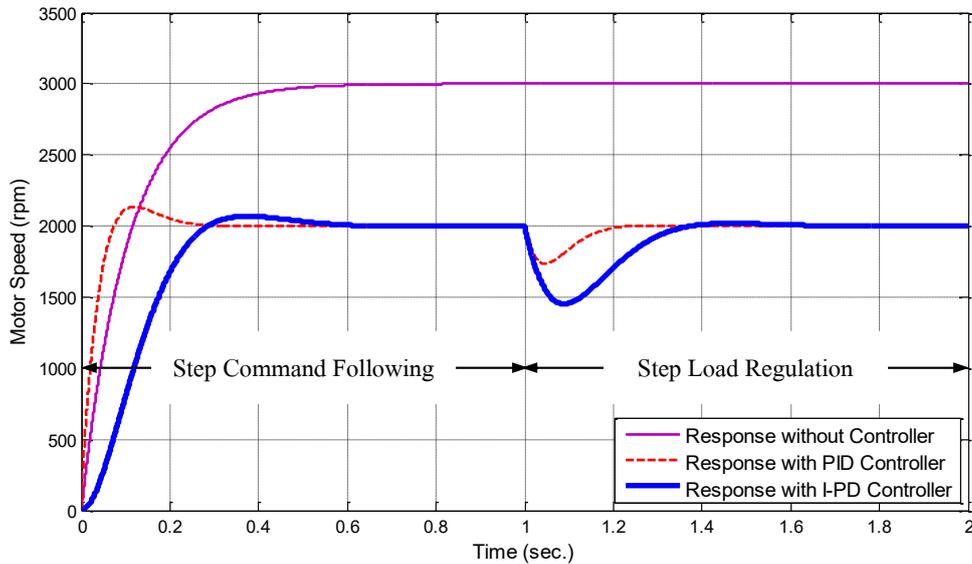
$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } F = \sum_{i=1}^N [r(i) - c(i)]^2 \\
 & \text{subject to } \left. \begin{aligned}
 & M_p \leq 10\%, e_{ss} \leq 0.1\%, \\
 & 0 \leq K_p \leq 1.0, \\
 & 0 \leq K_i \leq 20, \\
 & 0 \leq K_d \leq 0.1
 \end{aligned} \right\} \quad (12)
 \end{aligned}$$

ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

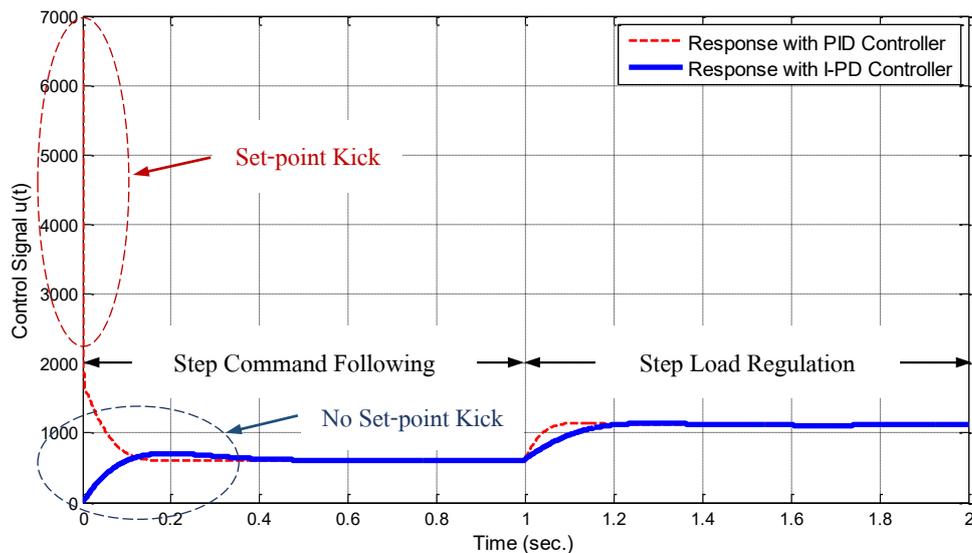
ขั้นตอนวิธีของ FPA ได้รับการพัฒนาด้วยชุดคำสั่ง MATLAB User's Guide – MATLAB/SIMULINK (1998) โดยปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของ FPA ตามคำแนะนำของ Yang ดังนี้ จำนวนละอองเรณูดอกไม้ $n = 25$ ค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยนระหว่างการถ่ายละอองเรณูวงกว้าง $p = 0.8$ และการถ่ายละอองเรณูเฉพาะที่ $\lambda = 1.5$ เมื่อจำนวนรอบของการค้นหาสูงสุด $Max_Gen = 1000$ รอบ ในฐานะของ TC เพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ (12) ดำเนินการค้นหาทั้งหมด 40 ครั้ง เพื่อค้นหาค่าของผลเฉลยที่ดีที่สุด สมรรถนะ และผลตอบสนองของระบบควบคุม PID และ I-PD ด้วย FPA ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เมื่อมีสัญญาณการรบกวน $d(t) = -500$ รอบต่อนาที เข้าที่เวลา 1 วินาที แสดงได้ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 8 ในขณะที่สัญญาณควบคุม $u(t)$ ของระบบควบคุม PID และ I-PD ด้วย FPA แสดงได้ดังรูปที่ 9 เมื่อ t_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) โดยคิดที่ $\pm 2\%$ ของค่าสุดท้าย และ t_d คือ ช่วงเวลากำจัดสัญญาณรบกวนภายนอก (external disturbance rejection) โดยคิดที่ $\pm 2\%$ ของค่าสุดท้าย Kuo B. C. and Golnaraghi F. (2003)

ตารางที่ 2 สมรรถนะของระบบควบคุม PID และ I-PD ด้วย FPA

Control Structures	Parameters			System Responses				
	K_p	K_i	K_d	t_r (sec.)	M_p (%)	t_s (sec.)	e_{ss} (%)	t_d (sec.)
PID	0.9974	17.8635	0.0024	0.0738	6.75	0.5475	0.00	0.4815
I-PD	0.2912	5.0000	0.0010	0.2863	3.45	0.6628	0.00	0.7513

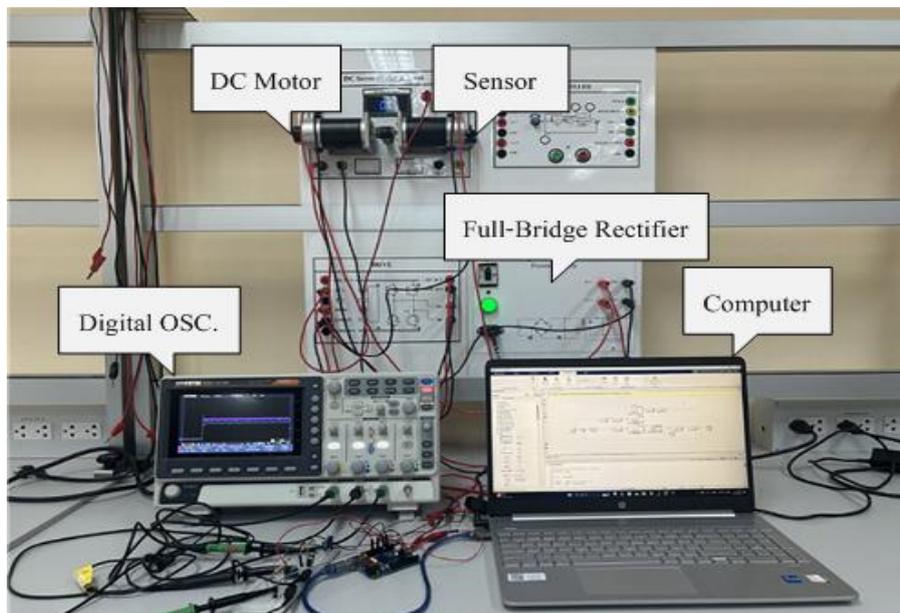


รูปที่ 8 ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID และ I-PD ด้วย FPA



รูปที่ 9 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม PID และ I-PD ด้วย FPA

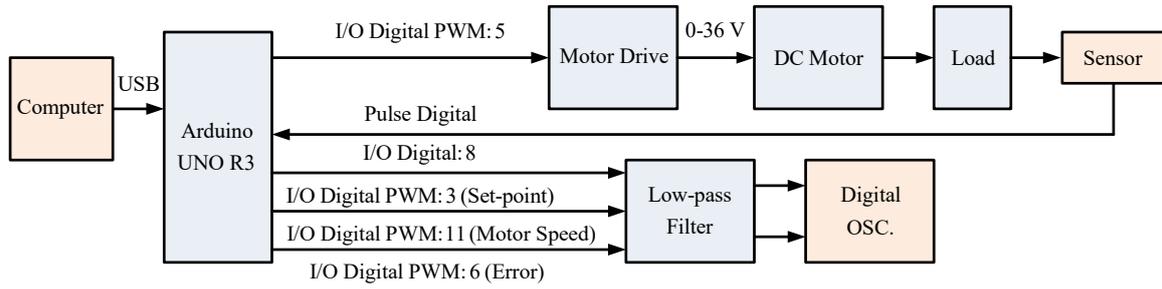
จากตารางที่ 2 พบว่า FPA สามารถค้นหาค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i และ K_d ได้อย่างเหมาะสมให้กับตัวควบคุม PID และตัวควบคุม I-PD สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC สอดคล้องเป็นไปตามสมการที่ (12) นอกจากนี้ ยังพบว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID และตัวควบคุม I-PD ด้วย FPA ดังแสดงในรูปที่ 8 ตัวควบคุม I-PD จะให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมมีค่าพุงเกินสูงสุด M_p ที่มีค่าน้อยกว่าตัวควบคุม PID โดยไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัว e_{ss} ในขณะที่ รูปที่ 9 พบว่า องค์ประกอบของ P และ D ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของตัวควบคุม PID จะมีสัญญาณควบคุมที่มีค่าสูงกว่าตัวควบคุม I-PD ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานอย่างรวดเร็ว เมื่อนำมาใช้ควบคุมระบบจริง



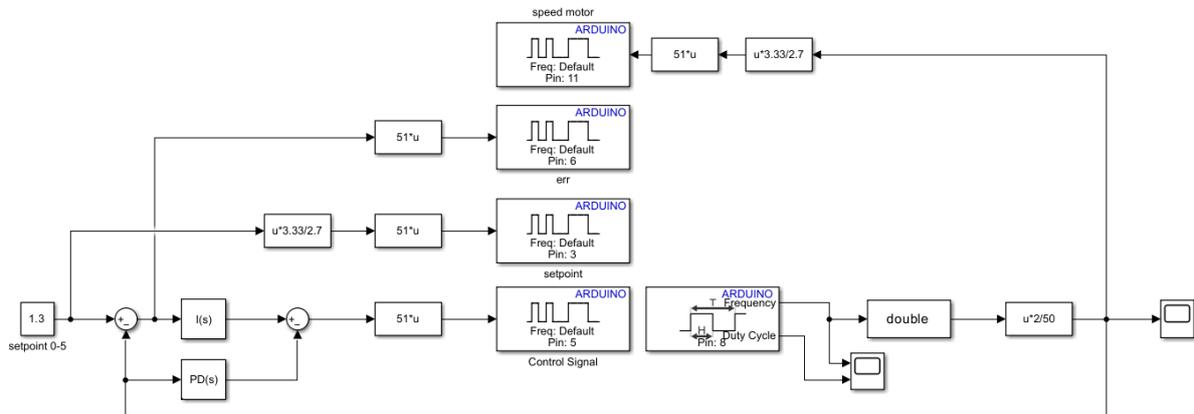
รูปที่ 10 การควบคุมมอเตอร์ DC ทดสอบในห้องปฏิบัติการจริง

จากรูปที่ 10 เพื่อยืนยันผลที่ได้รับจากการจำลอง โดยนำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID และ I-PD ที่ออกแบบด้วย FPA ไปควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ DC ในห้องปฏิบัติการจริง โดยเลือกใช้มอเตอร์ DC ยี่ห้อ MAGMOTOR รุ่น C21-H-175FX พิกัดแรงดัน 36 โวลต์ ที่ความเร็วรอบสูงสุด 3000 รอบต่อนาที หลักการทำงานจะอยู่บนพื้นฐานของบอร์ดประดิษฐ์ ยี่ห้อ อาคิโน โยโน อาร์ 3 (arduino UNO R3 board) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ชนิด ATmega328P ต่อใช้งานร่วมกับ MATLAB/SIMULINK ใช้ตัวตรวจรู้ (sensor) รุ่น HC-020K ซึ่งเป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์ (pulse) เพื่อนำมาคำนวณค่าให้เป็นความเร็วรอบของมอเตอร์ DC ทดสอบในห้องปฏิบัติการจริง ที่คาบเวลาชักตัวอย่าง (sampling period) เท่ากับ 5 มิลลิวินาที

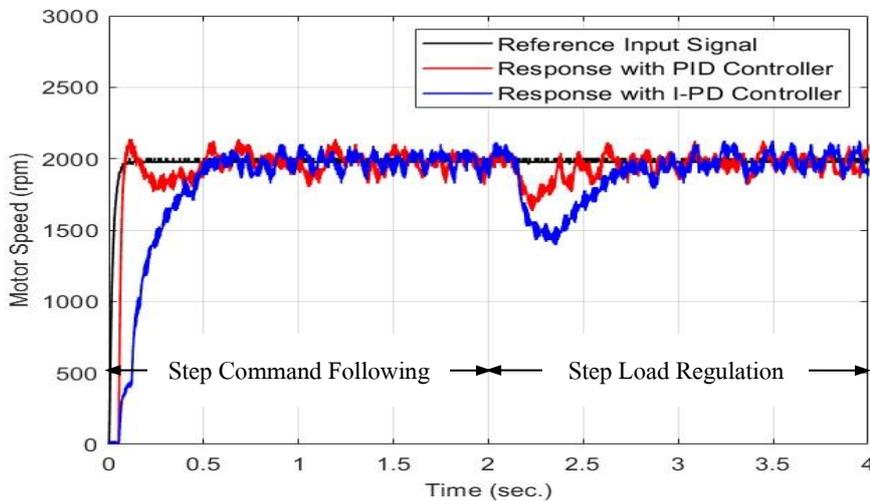
ในงานวิจัยนี้ การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ DC ได้ใช้ตัวตรวจรู้ เป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์ เพื่อคำนวณหาความถี่ให้เป็นความเร็วรอบของมอเตอร์ DC แสดงได้ดังรูปที่ 11 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานเข้าถึงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย MATLAB/SIMULINK สำหรับติดต่อสื่อสารและประยุกต์ใช้งานกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้น การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของระบบควบคุมด้วยการสร้างแผนภาพของ MATLAB/SIMULINK ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ DC แสดงได้ดังรูปที่ 12 เปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุม PID และ I-PD ด้วย FPA ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมจะแปรตามคำสั่งอินพุต (command Following) และจะแปรตามกำจัดสัญญาณรบกวน (disturbance rejection) หรือการคุมค่าโหลด (load regulation) แสดงได้ดังรูปที่ 13 ถึงรูปที่ 14 ตามลำดับ



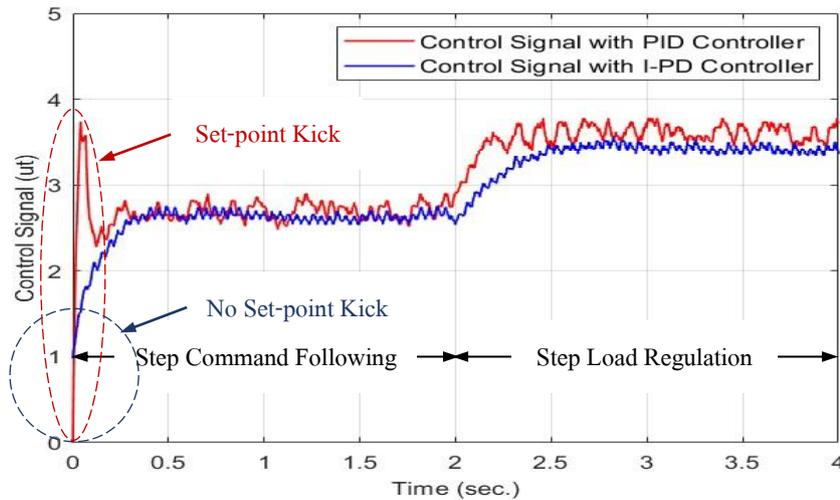
รูปที่ 11 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ DC



รูปที่ 12 แผนภาพของ MATLAB/SIMULINK ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ DC



รูปที่ 13 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจริง (2000 รอบต่อนาที)



รูปที่ 14 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุมจริง (2000 รอบต่อนาที)

เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PID และ I-PD ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เมื่อให้สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได (step input) ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที และการรบกวนด้วยการป้อนโหลดขนาด 0.0716 นิวตันเมตร เข้าที่เวลา 2 วินาที สมรรถนะของระบบควบคุมจริง แสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมรรถนะของระบบควบคุมจริง (2000 รอบต่อนาที)

Control Structures	Parameters			System Responses				
	K_p	K_i	K_d	t_r (sec.)	M_p (%)	t_s (sec.)	e_{ss} (%)	t_d (sec.)
PID	0.9974	17.8635	0.0024	0.037	7.88	0.448	0.00	0.555
I-PD	0.2912	5.0000	0.0010	0.505	3.60	0.970	0.00	0.650

จากตารางที่ 3 และในรูปที่ 13 พบว่า ตัวควบคุม PID ผลตอบสนองของระบบควบคุม มีช่วงเวลาดำเนิน t_r มีช่วงเวลาเข้าที่ t_s และมีช่วงเวลาดำเนินการรบกวนจากภายนอก t_d น้อยกว่าตัวควบคุม I-PD ในขณะที่ตัวควบคุม I-PD มีค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p น้อยกว่าตัวควบคุม PID อย่างไรก็ตาม ในรูปที่ 14 พบว่า สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม PID จะมีสัญญาณควบคุมที่มีค่าสูงกว่าตัวควบคุม I-PD นั่นคือ การขยายตัวของสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PID จะส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม I-PD จะมีสัญญาณควบคุมที่มีค่าต่ำกว่าตัวควบคุม PID การขยายตัวของสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-PD จะไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เมื่อนำมาใช้ควบคุมระบบจริง

บทสรุป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมจากองค์ประกอบของ P และ

D ที่อยู่ในตัวควบคุม PID ในขณะที่ ตัวควบคุม I-PD องค์ประกอบของ I จะอยู่บนทางเดินแบบป้อนไปหน้า ส่วนองค์ประกอบของ P และ D จะอยู่ในทางเดินแบบป้อนกลับของวงรอบการควบคุม ขั้นตอนวิธีของ FPA สามารถค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID และ I-PD ได้อย่างเหมาะสม ผลการจำลองพบว่า ตัวควบคุม I-PD สามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การขยายตัวของสัญญาณควบคุมน้อยกว่า ตัวควบคุม PID โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เพื่อยืนยันผลที่ได้รับจากการจำลอง ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID และ I-PD ที่ใช้สำหรับการควบคุมจริงจะมีค่าเท่ากับการจำลอง ผลที่ได้รับพบว่า ตัวควบคุม PID และ I-PD ให้ผลตอบสนองของการควบคุมจริงสอดคล้องกับการจำลอง การขยายตัวของสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-PD ที่มีค่าต่ำกว่าตัวควบคุม PID โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วต่อชุดขับเร็ว เมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ แนวทางการพัฒนาในอนาคตสามารถใช้ตัวควบคุม PI-PD หรือตัวควบคุม I-TD เพื่อปรับปรุงผลตอบสนองของระบบควบคุม ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะของระบบควบคุมดีขึ้นอย่างโดดเด่น ทั้งในด้านการติดตามคำสั่งอินพุตและการกำจัดสัญญาณรบกวน รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้ตัวควบคุม I-PD กับระบบควบคุมในรูปแบบอื่น ๆ หรือทดสอบกับพลาเน็ตชนิดอื่น ๆ เพื่อพิจารณาผลตอบสนองและสมรรถนะของระบบควบคุมในเชิงเปรียบเทียบ

องค์ความรู้ใหม่

งานวิจัยนี้ ได้รับองค์ความรู้ในการออกแบบตัวควบคุม I-PD อย่างเหมาะสมสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC ด้วย FPA กับระบบอินพุตเดี่ยวเอาต์พุตเดี่ยว (SISO) วิธีของ FPA เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากสำหรับการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดทางวิศวกรรมแบบซับซ้อน โดยศึกษาผลกระทบของตัวควบคุม PID และ I-PD ที่ก่อให้เกิดการขยายตัวของสัญญาณควบคุม วิธีการออกแบบตัวควบคุม I-PD อย่างเหมาะสมสำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์ DC ด้วย FPA และเปรียบเทียบผลจากการออกแบบตัวควบคุม I-PD กับตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย FPA สำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์ DC

เอกสารอ้างอิง

- Chittka L., Thomson J. D. and Waser N. M. (1999). Flower constancy, insect psychology, and plant evolution. *Naturwissenschaften*, 86, 361–377.
<https://www.researchgate.net/publication/227319249>
- Dwyer A. (2003). *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. Imperial College Press, London, U.K..
- Eykhoff P. (1974). *System identification, Parameter and State Estimation*, John Wiley & Sons.
- Glover F. and Kochenberger G. A. (2003). *Handbook of Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

- Kuo B. C. and Golnaraghi F. (2003). *Automatic Control Systems*, 8th ed., John Wiley & Sons.
- Minorsky N. (1922). Directional stability of automatically steered bodies. *American Society of Naval Engineering*, 284.
- Pavlyukevich I. (2007). Cooling down Lévy flights. *Journal of Phys. A: Math, Theor.*, 40, 12299–12313.
- Prasad S. J. S., Varghese S. and Balakrishnan P. A. (2012a). Optimization of I-PD Controller for a FOLIPD Model using Particle Swarm Intelligence. *International Journal of Computer Applications*, 43(9), 23–26. <https://www.researchgate.net/publication/258651381>
- Prasad S. J. S., Varghese S. and Balakrishnan P. A. (2012b). Particle Swarm Optimized I-PD Controller for Second Order Time Delayed System. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2(1), 299–302. <https://www.ijscce.org/wp-content/uploads/papers/v2i1/A0440022112.pdf>
- Puangdownreong D., Nawikavatana A. and Thammarat C. (2016). Optimal Design of I-PD Controller for DC Motor Speed Control System by Cuckoo Search. *International Electrical Engineering Congress iEECON2016*, 2-4 March 2016, Chiang Mai, Thailand, *Procedia Computer Science* 86(2016), 83–86. <https://www.researchgate.net/publication/303508733>
- Rajinikanth V. and Latha K. (2012). I-PD controller tuning for unstable system using bacterial foraging algorithm: a study based on various error criterion. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 1–10. <https://www.researchgate.net/publication/220449071>
- 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. <https://www.researchgate.net/publication/4163821>
- User's Guide – MATLAB/SIMULINK (1998) *The Math Works Inc.*, Natick, MA.
- Vas P. (1993). *Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines*, Oxford University Press.
- Willmer P. (2011). *Pollination and Floral Ecology*. Princeton University Press.
- Yadav S. P. and Tripathi V. K. (2006). A Case Study of DC Motor Speed Control with PID Controller through MATLAB. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 1008–1011.

<https://www.ijarcce.com/upload/2016/may-16/IJARCCE%20246.pdf>

- Yang X. S. (2010). *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*, John Wiley & Sons.
- Yang X. S. (2012). Flower pollination algorithm for global optimization. *Unconventional Computation and Natural Computation*, Lecture Notes in Computer Science, 7445, 240–249. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-32894-7_27