

การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ TID ที่ออกแบบด้วยการค้นหาแบบนกกาเหว่า สำหรับการควบคุมความถี่โหลด

Performance Comparison of PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and TID Controllers Designed by Cuckoo Search for Load Frequency Control

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

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ TID สำหรับการควบคุมความถี่โหลด (load frequency control: LFC) ที่ออกแบบด้วยการค้นหาแบบนกกาเหว่า (cuckoo search: CS) ซึ่งเป็นเทคนิคการค้นหาแบบอภิศักขานที่ทรงประสิทธิภาพ ตัวควบคุม $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ TID ถูกพิจารณาให้อยู่ในกลุ่มของตัวควบคุมเชิงเศษส่วน ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าความถี่เอาต์พุตที่เบี่ยงเบนของระบบ LFC เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการทำให้มีค่าน้อยที่สุดด้วยขั้นตอนวิธี CS ตามบริบทของการหาค่าเหมาะที่สุดแบบใหม่ จากผลการเปรียบเทียบ พบว่า ตัวควบคุม TID สามารถควบคุมระบบ LFC ให้มีผลตอบสนองที่รวดเร็วและปรากฏการสั่นไหวที่น้อยกว่าตัวควบคุม $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ PID ตามลำดับ

คำสำคัญ: ตัวควบคุม PID ตัวควบคุม $PI^{\lambda}D^{\mu}$ ตัวควบคุม TID ระบบควบคุมความถี่โหลด การค้นหาแบบนกกาเหว่า

Abstract

This paper presents a performance comparison of PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$, and TID controllers for load frequency control (LFC) designed by the cuckoo search (CS), which is one of the most powerful metaheuristic searching techniques. The $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and TID controllers are classified into the class of the fractional controller. In this work, the objective function is defined as the deviated frequency output of the LFC system to be minimized by CS. As comparative results based on modern optimization contexts, it was found that the TID controller demonstrates superior performance by providing faster response and reduced oscillations once compared to the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and PID controllers, respectively.

Keywords: PID Controller, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controller, TID Controller, Load Frequency Control System, Cuckoo Search

1. บทนำ

ตัวควบคุม PID (proportional-integral-derivative controller) ได้รับการนำเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ.1922 โดย Minorsky [1] ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบ-P (P-element) หรือองค์ประกอบเชิงสัดส่วน (proportional element), องค์ประกอบ-I (I-element) หรือองค์ประกอบเชิงปริพันธ์ (integral element) และองค์ประกอบ-D (D-element) หรือองค์ประกอบเชิงอนุพันธ์ (derivative element) ที่สามารถปรับจูนได้อย่างอิสระต่อกัน และได้รับการพิจารณาให้เป็นตัวควบคุมเชิงจำนวนเต็ม (integer controller) เนื่องจากอันดับของ s ในพจน์ปริพันธ์และพจน์อนุพันธ์นั้นมีค่าเป็นจำนวนเต็ม ตัวควบคุม PID ได้รับการยอมรับและถูกนำมาประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางในฐานะหัวใจหลักของวิศวกรรมควบคุมอัตโนมัติ [2-3]

ต่อมาในปี ค.ศ.1994 Podlubny ได้นำเสนอ ตัวควบคุม $PI^{\lambda}D^{\mu}$ หรือตัวควบคุม PID เชิงเศษส่วน (fractional PID controller) [4-5] ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบ-P, องค์ประกอบ-I และองค์ประกอบ-D เช่นเดียวกับตัวควบคุม PID แต่ในองค์ประกอบ-I และองค์ประกอบ-D ของตัวควบคุม $PI^{\lambda}D^{\mu}$ นั้น อันดับของ s ในพจน์ปริพันธ์และพจน์อนุพันธ์จะมีค่าเป็นจำนวนจริง (real number) บนพื้นฐานของแคลคูลัสเชิงเศษส่วน (fractional calculus) ตัวควบคุม $PI^{\lambda}D^{\mu}$ จึงได้รับการพิจารณาให้เป็นตัวควบคุมเชิงเศษส่วน (fractional controller) และได้รับการยืนยันว่าสามารถควบคุมระบบได้ดีกว่าตัวควบคุม PID [4-5]

ในปี ค.ศ.1994 เช่นเดียวกันนั้น Lurie ได้นำเสนอ ตัวควบคุม TID (tilt-integral-derivative controller) [6] ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบ-T (T-element) หรือองค์ประกอบเชิงเอียง (tilt element), องค์ประกอบ-I และองค์ประกอบ-D ซึ่งในองค์ประกอบ-T นั้นจะมีพฤติกรรมอยู่ระหว่างองค์ประกอบ-P และองค์ประกอบ-I ที่สามารถปรับให้เอียงเอนไปทางด้านใดด้านหนึ่งเชิงเศษส่วนได้ ตัวควบคุม TID จึงได้รับการพิจารณาให้เป็นตัวควบคุมเชิงเศษส่วน และได้รับการยืนยันว่าสามารถควบคุมระบบได้แม่นยำกว่าตัวควบคุม PID [6-8]

บทความวิจัยนี้จึงนำเสนอการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ TID สำหรับระบบควบคุมความถี่โหลด (load

frequency control: LFC) ที่ได้รับการออกแบบด้วยการค้นหาแบบนกกาเหว่า (cuckoo search: CS) [9] ซึ่งเป็นเทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอภิศาสตร์ที่ทรงประสิทธิภาพ ตามบริบทของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแนวใหม่ (modern optimization) ในหัวข้อต่อไปจะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุม PID, PI^λD^μ และ TID, การก่อรูปปัญหาการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบ LFC โดยขั้นตอนวิธี CS, ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระบบ และสรุปผล ตามลำดับ

2. ตัวควบคุม PID, PI^λD^μ และ TID

2.1 ตัวควบคุม PID

ตัวควบคุม PID [1-3] มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโดเมนเวลาดังแสดงในสมการที่ (1) เมื่อ $e(t)$ คือสัญญาณความคลาดเคลื่อน (error signal) ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม และ $u(t)$ คือสัญญาณควบคุม (control signal) ซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อทำการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (1) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุม PID ในโดเมน s ดังแสดงในสมการที่ (2) เมื่อ K_p คืออัตราขยายเชิงสัดส่วน (proportional gain), K_i คืออัตราขยายเชิงปริพันธ์ (integral gain) และ K_d คืออัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (derivative gain) จากสมการที่ (1)-(2) จะพบว่า ตัวควบคุม PID มีค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับจูนจำนวน 3 ตัว ได้แก่ K_p , K_i และ K_d

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

$$G_c(s)|_{PID} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

2.2 ตัวควบคุม PI^λD^μ

ตัวควบคุม PI^λD^μ [4-5] จะอาศัยตัวดำเนินการมูลฐานอันดับไม่เป็นจำนวนเต็ม (non-integer order fundamental operator) ${}_a\mathcal{D}_t^\alpha$ ดังแสดงในสมการที่ (3) เมื่อ α และ t คือขอบเขตของการดำเนินการ ส่วน α คืออันดับเชิงเศษส่วน (fractional order) ของการดำเนินการ โดยที่ $\alpha \in \mathbb{R}$ เมื่อ $\mathbb{R}$ คือจำนวนจริง

$${}_a\mathcal{D}_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha}, & \mathbb{R}(\alpha) > 0 \\ 1, & \mathbb{R}(\alpha) = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-\alpha}, & \mathbb{R}(\alpha) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุม PI^λD^μ ในโดเมนเวลาดังแสดงในสมการที่ (4) และเมื่อทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ (4) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุม PI^λD^μ ในโดเมน s ดังแสดงในสมการที่ (5) เมื่อ λ คืออันดับของการหาปริพันธ์เชิงเศษส่วน (order of fractional integration) และ μ คืออันดับของการหาอนุพันธ์เชิงเศษส่วน (order of fractional differentiation) จากสมการที่ (4)-(5)

จะพบว่า ตัวควบคุม PI^λD^μ มีค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับจูนจำนวน 5 ตัว ได้แก่ K_p , K_i , K_d , λ และ μ

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \mathcal{D}_t^{-\lambda} e(t) + K_d \mathcal{D}_t^\mu e(t), \quad (\mathcal{D}_t^{(*)} \equiv {}_0\mathcal{D}_t^{(*)}) \quad (4)$$

$$G_c(s)|_{PI^\lambda D^\mu} = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu, \quad 0 < \lambda, \mu < 1.0 \quad (5)$$

2.3 ตัวควบคุม TID

ตัวควบคุม TID [6-8] มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโดเมนเวลาดังแสดงในสมการที่ (6) เมื่อทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ (6) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุม TID ในโดเมน s ดังแสดงในสมการที่ (7) เมื่อ K_t คืออัตราขยายเชิงเอน (tilt gain) และ n คืออันดับของการหาปริพันธ์แบบเอนเชิงเศษส่วน (order of fractional tilt integration) จากสมการที่ (6)-(7) จะพบว่า ตัวควบคุม TID มีค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับจูนจำนวน 4 ตัว ได้แก่ K_t , K_i , K_d และ n เมื่อ $n \in \mathbb{R}^+$ หรือ $n > 0$ นั้นเอง (ถ้า $n = 1$ องค์ประกอบ-T จะมีปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกับองค์ประกอบ-I ซึ่งเป็นการหาปริพันธ์อันดับ 1 และถ้า $n \gg 1$ หรือ $n \rightarrow \infty$ องค์ประกอบ-T จะมีปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกับองค์ประกอบ-P)

$$u(t) = K_t \frac{d^{-1/n} e(t)}{dt} + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

$$G_c(s)|_{TID} = \frac{K_t}{s^{1/n}} + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad n \in \mathbb{R}^+ \quad (7)$$

3. การก่อรูปปัญหาการออกแบบ

3.1 ระบบควบคุมความถี่โหลด

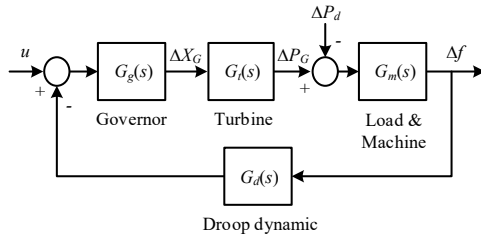
ระบบควบคุมความถี่โหลด หรือระบบ LFC เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการรักษาความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังให้คงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ระบบ LFC จะพยายามรักษาค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ในระบบให้เป็นศูนย์โดยรวดเร็ว [10-11] โดยทั่วไประบบ LFC จะประกอบไปด้วย 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ตัวบังคับ (governor), เทอร์ไบน์ (turbine), เครื่องจักรกล-โหลด (load-machine) และพลวัตรูป (droop dynamic) ดังโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 1 เมื่อ $G_g(s)$, $G_t(s)$, $G_m(s)$ และ $G_d(s)$ คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวบังคับ, เทอร์ไบน์, เครื่องจักรกล-โหลด และพลวัตรูป ซึ่งแสดงดังสมการที่ (8)-(11) ตามลำดับ [12]

$$G_g(s) = \frac{1}{T_g s + 1} \quad (8)$$

$$G_t^{\text{reheat}}(s) = \frac{c T_s + 1}{(T_r s + 1)(T_i s + 1)} \quad (9)$$

$$G_m(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} \quad (10)$$

$$G_d(s) = \frac{1}{R} \quad (11)$$

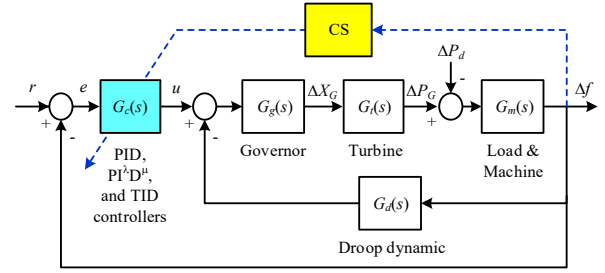


รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบ LFC

จากรูปที่ 1 ΔP_d คือการรบกวนเนื่องจากโหลด (load disturbance), ΔP_g คือเอาต์พุตของเทอร์ไบน์, ΔX_g คือตำแหน่งวาล์วของตัวบังคับ, u คือสัญญาณอินพุตควบคุม (control input signal) และ Δf คือความถี่เอาต์พุตที่เบี่ยงเบน (deviated frequency output) จากสมการที่ (8)-(11) T_g คือค่าคงตัวของตัวบังคับ, T_m คือค่าคงตัวของเครื่องจักรกล-โหลด, K_m คืออัตราขยายของเครื่องจักรกล-โหลด และ R คืออัตราขยายผกผันของรูป [12] สมการที่ (9) แสดงแบบจำลองของเทอร์ไบน์ชนิดนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ (reheated-type turbine) เมื่อ T_r คือค่าคงตัวของเทอร์ไบน์, T_r คือค่าคงตัวของเทอร์ไบน์ชนิดนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ และ c คือค่าสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกระบวนการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ [12]

3.2 กรอบงานการออกแบบตัวควบคุม

กรอบงานการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบ LFC ด้วยขั้นตอนวิธี CS แสดงในรูปที่ 2 เมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิง r มีค่าเท่ากับศูนย์ ($r = 0$) ค่า Δf จะถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ซึ่งจะถูกป้อนให้กับขั้นตอนวิธี CS เพื่อทำให้มีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงในสมการที่ (12) โดยการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID, PI^2D^μ และ TID ที่เหมาะสม ภายในขอบเขต (ปริภูมิการค้นหา) และเงื่อนไขการออกแบบดังแสดงในสมการที่ (13) เมื่อ PO_{reg} คือเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินเนื่องจากการคุมค่า (percent overshoot of regulation) ซึ่งกำหนดให้มีความไม่เกิน PO_{reg_max} , t_{reg} คือเวลาการคุมค่า (regulating time) ซึ่งกำหนดให้มีความไม่เกิน t_{reg_max} และ e_{ss} คือค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (steady-state error) ซึ่งกำหนดให้มีความไม่เกิน e_{ss_max} สำหรับตัวควบคุม PID [K_{p_min} , K_{p_max}] คือปริภูมิการค้นหาของ K_p , [K_{i_min} , K_{i_max}] คือปริภูมิการค้นหาของ K_i และ [K_{d_min} , K_{d_max}] คือปริภูมิการค้นหาของ K_d สำหรับตัวควบคุม PI^2D^μ [K_{p_min} , K_{p_max}] คือปริภูมิการค้นหาของ K_p , [K_{i_min} , K_{i_max}] คือปริภูมิการค้นหาของ K_i , [K_{d_min} , K_{d_max}] คือปริภูมิการค้นหาของ K_d , [λ_{min} , λ_{max}] คือปริภูมิการค้นหาของ λ และ [μ_{min} , μ_{max}] คือปริภูมิการค้นหาของ μ สำหรับตัวควบคุม TID [K_{i_min} , K_{i_max}] คือปริภูมิการค้นหาของ K_i , [K_{d_min} , K_{d_max}] คือปริภูมิการค้นหาของ K_d และ [n_{min} , n_{max}] คือปริภูมิการค้นหาของ n เมื่อพิจารณาจากกรอบงานการออกแบบที่แสดงในรูปที่ 2 โดยกำหนดให้อินพุตอ้างอิง r มีค่าเท่ากับศูนย์ จะพบว่า การควบคุมระบบ LFC คือการควบคุมที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการคุมค่าโหลด (load regulation)



รูปที่ 2 กรอบงานการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบ LFC ด้วย CS

$$\text{Minimize } \Delta f \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{Subject to } & PO_{reg} \leq PO_{reg_max}, \\ & t_{reg} \leq t_{reg_max}, \\ & e_{ss} \leq e_{ss_max}, \\ & \left. \begin{aligned} K_{p_min} &\leq K_p \leq K_{p_max}, \\ K_{i_min} &\leq K_i \leq K_{i_max}, \\ K_{d_min} &\leq K_d \leq K_{d_max} \end{aligned} \right\} : PID \\ & \left. \begin{aligned} K_{p_min} &\leq K_p \leq K_{p_max}, \\ K_{i_min} &\leq K_i \leq K_{i_max}, \\ K_{d_min} &\leq K_d \leq K_{d_max}, \\ \lambda_{min} &\leq \lambda \leq \lambda_{max}, \\ \mu_{min} &\leq \mu \leq \mu_{max} \end{aligned} \right\} : PI^2D^\mu \\ & \left. \begin{aligned} K_{t_min} &\leq K_t \leq K_{t_max}, \\ K_{i_min} &\leq K_i \leq K_{i_max}, \\ K_{d_min} &\leq K_d \leq K_{d_max}, \\ n_{min} &\leq n \leq n_{max} \end{aligned} \right\} : TID \end{aligned} \quad (13)$$

3.3 ขั้นตอนวิธี CS

ขั้นตอนวิธี CS ได้รับการนำเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ.2009 โดย Yang และ Deb [9] ในฐานะอภิศึกษาสำนึกแบบอิงประชากร ที่เลียนแบบพฤติกรรมกราวงไขของนกกาเหว่าในรังของนกชนิดอื่น ผสมผสานกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ในลักษณะการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบ Lévy ผลเฉลยใหม่จะถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยกระบวนการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบ Lévy ดังแสดงในสมการที่ (14) เมื่อ $\alpha > 0$ คือขนาดขั้นการค้นหาจากสมการที่ (14) สัญลักษณ์ $\oplus$ หมายถึง การคูณแบบ entry-wise (entry-wise multiplication) ในขณะที่สัญลักษณ์ Lévy(λ) หมายถึงค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบ Lévy ซึ่งมีค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเป็นอนันต์ ดังแสดงในสมการที่ (15) ขนาดขั้นการค้นหา s สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (16) เมื่อ u และ v คือค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) ดังแสดงในสมการที่ (17) ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของ u และ v แสดงดังสมการที่ (18) เมื่อ Γ คือฟังก์ชันแกมมามาตรฐานที่สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (19) ขั้นตอนวิธี CS แสดงด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 3

$$\mathbf{x}_i^{(t+1)} = \mathbf{x}_i^{(t)} + \alpha \oplus \text{Lévy}(\lambda) \quad (14)$$

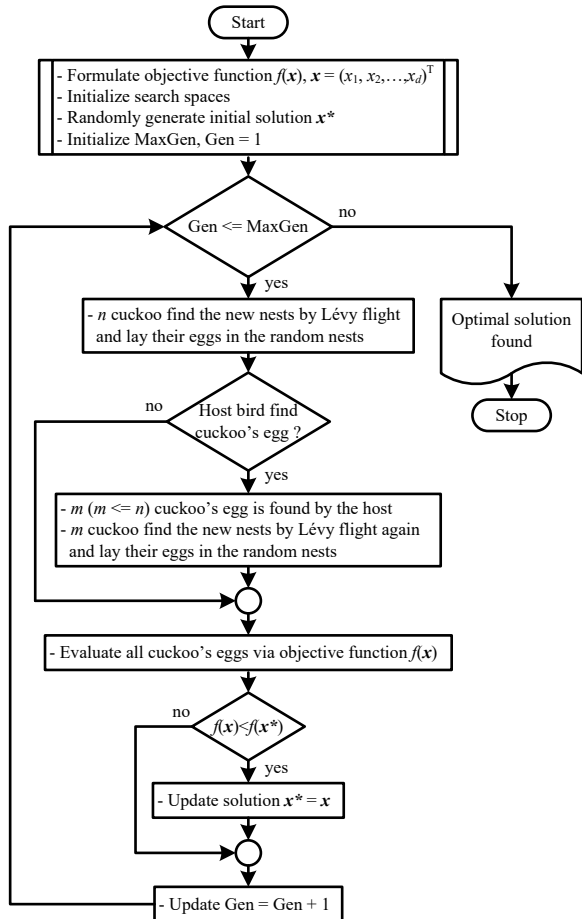
$$\text{Lévy} \approx u = t^{-\lambda}, \quad 1 < \lambda \leq 3 \quad (15)$$

$$s = u/|v|^{1/\beta} \quad (16)$$

$$u \approx N(0, \sigma_u^2), \quad v \approx N(0, \sigma_v^2) \quad (17)$$

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta)\sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2]\beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}, \quad \sigma_v = 1 \quad (18)$$

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (19)$$



รูปที่ 3 แผนภูมิการทำงานของขั้นตอนวิธี CS

4. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะ

ระบบ LFC ในงานวิจัยนี้เป็นระบบ LFC ที่ใช้เทอร์โบอินซินไดนามิกความร้อนกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ ดังนี้ $K_m = 120$, $T_m = 20$ sec, $T_i = 0.3$ sec, $T_g = 0.08$ sec, $R = 2.4$, $T_r = 4.20$ sec และ $c = 0.35$ [12] จากรูปที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ LFC ที่ถูกใช้เป็นพลานต์ (plant) ของระบบ แสดงดังสมการที่ (20)

$$G_p(s) = \frac{G_g G_t G_m}{1 + (G_g G_t^{reheated} G_m) / R} = \frac{87.5s + 59.52}{s^4 + 16.12s^3 + 46.24s^2 + 48.65s + 25.3} \quad (20)$$

ขั้นตอนวิธี CS ถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมการค้นหาค่าด้วยโปรแกรม MATLAB 2018b (License No.#40637337) และ FOMCON Toolbox [13-14] เพื่อประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i5-3470 CPU@3.60GHz, 4.0GB-RAM สำหรับออกแบบตัวควบคุม PID, PI^λD^μ และ TID ค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธี CS ที่เหมาะสม ได้รับการทดสอบเบื้องต้นโดยการปรับค่าต่าง ๆ ดังนี้ จำนวนนกกาเหว่า $n = 5, 10, 15, \dots, 50$ และสัดส่วนความสามารถในการค้นพบไข่แปลกปลอม $p_a = 0.1, 0.2, \dots, 0.5$ ซึ่งพบว่า $n = 30$ และ $p_a = 0.2$ เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ และเป็นค่าที่สอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ Yang และ Deb [12] จากนั้น ดำเนินการออกแบบตัวควบคุม PID, PI^λD^μ และ TID สำหรับระบบ LFC โดยแต่ละตัวควบคุมจะดำเนินการออกแบบจำนวน 50 ครั้ง (trial) ซึ่งในแต่ละครั้งจะยุติการค้นหาค่าเมื่อจำนวนรอบการค้นหาค่าเท่ากับจำนวนรอบการค้นหาค่าสูงสุด Max_Gen=200 ขั้นตอนวิธี CS จะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID, PI^λD^μ และ TID ที่เหมาะสม เพื่อให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ Δf ในสมการที่ (12) มีค่าน้อยที่สุด และสอดคล้องกับขอบเขตและเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด ดังแสดงในสมการที่ (21), (22) และ (23) สำหรับตัวควบคุม PID, PI^λD^μ และ TID ตามลำดับ

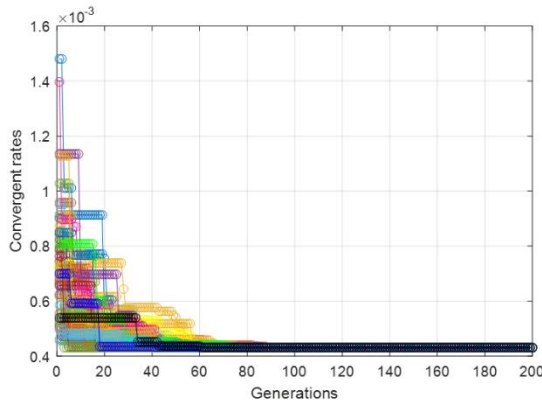
$$\text{Subject to } \left. \begin{array}{l} PO_{reg} \leq 5.00\%, \\ t_{reg} \leq 10 \text{ sec}, \\ e_{ss} \leq 0.01\%, \\ 0 \leq K_p \leq 30, \\ 0 \leq K_i \leq 15, \\ 0 \leq K_d \leq 5 \end{array} \right\} \quad (21)$$

$$\text{Subject to } \left. \begin{array}{l} PO_{reg} \leq 5.00\%, \\ t_{reg} \leq 10 \text{ sec}, \\ e_{ss} \leq 0.01\%, \\ 0 \leq K_p \leq 30, \\ 0 \leq K_i \leq 15, \\ 0 \leq K_d \leq 5, \\ 0 \leq \lambda \leq 1.0, \\ 0 \leq \mu \leq 1.0 \end{array} \right\} \quad (22)$$

$$\text{Subject to } \left. \begin{array}{l} PO_{reg} \leq 5.00\%, \\ t_{reg} \leq 10 \text{ sec}, \\ e_{ss} \leq 0.01\%, \\ 0 \leq K_t \leq 30, \\ 0 \leq K_i \leq 15, \\ 0 \leq K_d \leq 5, \\ 0 \leq n \leq 5 \end{array} \right\} \quad (23)$$

จากการออกแบบตัวควบคุม PID, PI^λD^μ และ TID ด้วยขั้นตอนวิธี CS จำนวน 50 ครั้ง อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธี CS ที่กระทำกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ Δf ในสมการที่ (12) ในกรณีการออกแบบตัวควบคุม TID แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ขั้นตอนวิธี CS สามารถออกแบบตัวควบคุม TID ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับอัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธี CS ในกรณีการออกแบบตัวควบคุม PID และ PI^λD^μ

จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4 จึงไม่นำเสนอในที่นี้ ขั้นตอนวิธี CS ใช้เวลาค้นหาเฉลี่ยสำหรับการออกแบบตัวควบคุม PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ TID เท่ากับ 7.53, 9.92 และ 8.24 วินาที ตามลำดับ และตัวควบคุม PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ TID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี CS อย่างเหมาะสม แสดงดังสมการที่ (24), (25) และ (26) ตามลำดับ



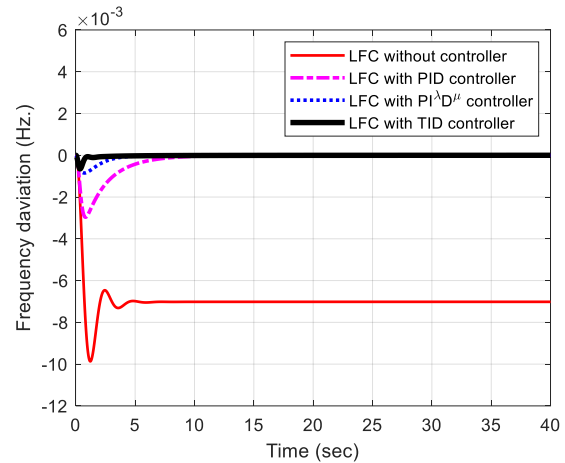
รูปที่ 4 อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธี CS ในการออกแบบตัวควบคุม TID

$$G_c(s)|_{PID} = 2.8133 + \frac{1.2542}{s} + 0.7786s \quad (24)$$

$$G_c(s)|_{PI^{\lambda}D^{\mu}} = 8.8512 + \frac{5.6138}{s^{0.9985}} + 2.9174s^{0.9816} \quad (25)$$

$$G_c(s)|_{TID} = \frac{26.8524}{s^{1/2.8478}} + \frac{12.6137}{s} + 2.7218s \quad (26)$$

ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ TID สำหรับระบบ LFC ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี CS แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงผลตอบสนองแบบคัมค่าโหลดของระบบ LFC เมื่อไม่มีตัวควบคุม, เมื่อมีตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี CS ในสมการที่ (24), เมื่อมีตัวควบคุม $PI^{\lambda}D^{\mu}$ ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี CS ในสมการที่ (25), และเมื่อมีตัวควบคุม TID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี CS ในสมการที่ (26) ผลตอบสนองของระบบ LFC ในรูปที่ 5 สามารถแสดงด้วยค่าเชิงตัวเลขได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า ระบบ LFC ที่ไม่มีตัวควบคุมจะไม่สามารถควบคุมให้ผลตอบสนองกลับมามีค่าเป็นศูนย์ได้ แต่ในขณะที่ใช้ตัวควบคุม PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ TID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี CS ระบบ LFC สามารถควบคุมให้ผลตอบสนองกลับมามีค่าเป็นศูนย์ได้สอดคล้องกับเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดในสมการที่ (21), (22) และ (23) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 และตารางที่ 1 จะพบว่า ตัวควบคุม TID สามารถควบคุมระบบ LFC ให้มีผลตอบสนองกลับมามีค่าเป็นศูนย์ได้อย่างรวดเร็วที่สุด (เมื่อพิจารณาจากค่า t_{reg}) และปรากฏการณ์สั่นไหวที่น้อยที่สุด รองลงมาคือตัวควบคุม $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ PID ตามลำดับ



รูปที่ 5 ผลตอบสนองของระบบ LFC

ตารางที่ 1 ผลตอบสนองแบบคัมค่าโหลดของระบบ LFC

ตัวควบคุม	$PO_{reg}(\%)$	$t_{reg}(\text{sec.})$	$e_{ss}(\%)$
ไม่มี	42.4712	6.7518	0.71
PID-CS	0.2965	7.4204	0.00
$PI^{\lambda}D^{\mu}$ -CS	0.0848 ลดจาก PID = 71.40%	3.6768 ลดจาก PID = 50.45%	0.00
TID-CS	0.0652 ลดจาก PID = 78.01% ลดจาก $PI^{\lambda}D^{\mu}$ = 23.11%	1.2402 ลดจาก PID = 83.29% ลดจาก $PI^{\lambda}D^{\mu}$ = 66.27%	0.00

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ TID สำหรับการควบคุมระบบ LFC ในงานวิจัยนี้ ตัวควบคุม PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ TID ได้รับการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี CS ตามบริบทของการหาค่าเหมาะที่สุดแบบใหม่ จากผลการทดสอบ พบว่า ตัวควบคุม PID, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ TID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี CS สามารถควบคุมระบบ LFC ได้สอดคล้องกับเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมในงานวิจัยนี้ พบว่า ตัวควบคุม TID สามารถควบคุมระบบ LFC ให้มีผลตอบสนองกลับมามีค่าเป็นศูนย์ได้อย่างรวดเร็วที่สุดและปรากฏการณ์สั่นไหวที่น้อยที่สุด รองลงมาคือตัวควบคุม $PI^{\lambda}D^{\mu}$ และ PID ตามลำดับ

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] K. J. Åström, and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1995.
- [3] A. O'Dwyer, *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*, Imperial College Press, 2009.

- [4] I. Podlubny, *Fractional-Order Systems and Fractional-Order Controllers*, UEF-03-94, Slovak Academy of Sciences, Kosice, 1994.
- [5] I. Podlubny, "Fractional-order systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -controllers," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, no. 1, 1999, pp. 208-214.
- [6] B. J. Lurie, "Three-parameter tunable tilt-integral-derivative (TID) controller," *United States Patent*, 5-371-670, USA, 1994.
- [7] 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*, 2025, pp. 1-21.
- [8] 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.
- [9] X. S. Yang and S. Deb, "Cuckoo search via Lévy flights," *Proceedings of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC 2009)*, 2009, pp. 210-214.
- [10] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [11] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar and A. Jalili, "Load frequency control strategies: a state-of-the-art survey for the researcher," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, 2009, pp. 344-353.
- [12] W. Tan, "Unified tuning of PID load frequency controller for power systems via IMC," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, 2010, pp.341-350.
- [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 ฤณรงค์ สำเร็จการศึกษา ปร.ด. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ พ.ศ.2563 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น งานวิจัยที่สนใจได้แก่ วิศวกรรมระบบควบคุม การจัดการพลังงาน การจัดการงานวิศวกรรม และการประยุกต์เทคนิคการค้นหาลำดับการศึกษาสำหรับแก้ปัญหาทางวิศวกรรม



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



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



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



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