

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การออกแบบตัวควบคุมพีไอได้อย่างเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านกับการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขในการเฝ้าติดตามอินพุตและการคุมค่าโหลดด้วยการค้นหาแบบนกกาเหว่า

دنۇفل كآپىئۇنۇ*

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
450 หมู่ 6 ถนนสุพรรณบุรี-ชัยนาท ตำบลย่านยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

รับบทความ 5 ธันวาคม 2560; ตอรับบทความ 8 มิถุนายน 2561

บทคัดย่อ

การหาค่าเหมาะที่สุดเชิงอภิศึกษาสำนึกได้กลายมาเป็นกรอบแนวทางใหม่สำหรับการสังเคราะห์การควบคุม วัตถุประสงค์หลักของการออกแบบการควบคุมคือ การเฝ้าติดตามอินพุต (คำสั่ง) และการคุมค่าโหลด (การรบกวน) งานวิจัยนี้เสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอได้อย่างเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านกับการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขในการเฝ้าติดตามอินพุตและการคุมค่าโหลดโดยใช้การค้นหาแบบนกกาเหว่า หนึ่งในเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงอภิศึกษาสำนึกที่มีประสิทธิภาพมากแบบอิงประชากร ค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองได้มาจากผลรวมของค่าผลต่างกำลังสองระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุต ของระบบเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อทำให้มีค่าน้อยที่สุด ช่วงเวลาขึ้นค่าพุ่งเกินสูงสุด ช่วงเวลาเข้าที่ และค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวจะถูกกำหนดแบบมีเงื่อนไขสมการสำหรับการเฝ้าติดตามอินพุต ในขณะที่ช่วงเวลาคุมค่าโหลดและค่าพุ่งเกินสูงสุดของการคุมค่าโหลดจะถูกกำหนดแบบมีเงื่อนไขสมการสำหรับการคุมค่าโหลด ผลที่ได้รับจากการค้นหาแบบนกกาเหว่าจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากการหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงนกและจินเนติกอัลกอริทึม จากผลการจำลองพบว่า ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบนกกาเหว่าจะให้ค่าที่เหมาะสมกว่าการหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงนกและจินเนติกอัลกอริทึมสำหรับระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านแบบมีเงื่อนไขในการเฝ้าติดตามอินพุตและการคุมค่าโหลดเป็นที่น่าสนใจนอกจากนี้ ผลการจำลองได้รับการยืนยันจากผลการทดสอบระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านในห้องปฏิบัติการจริง

คำสำคัญ : ตัวควบคุมพีไอดี; มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน; การค้นหาแบบนกกาเหว่า; อภิศึกษาสำนึก

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1850 3236, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: kdanupon@yahoo.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Optimal PID Controller Design for BLDC Motor Speed Control System with Input Tracking and Load Regulating Constrained Optimization by Cuckoo Search

Danupon Kumpanya*

Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
450 Moo 6, Suphanburi-Chainat Road, Yanyaw, Samchook, Suphanburi, 72130

Received 5 December 2017; Accepted 8 June 2018

Abstract

Metaheuristic optimization approach has become the new framework for control synthesis. The main purposes of the control design are input (command) tracking and load (disturbance) regulating. This research proposes an optimal proportional-integral-derivative (PID) controller design for the brushless dc (BLDC) motor speed control system with input tracking and load regulating constrained optimization by using the cuckoo search (CuS), one of the most efficient population-based metaheuristic optimization techniques. The sum-squared error between the referent input and the controlled output is set as the objective function to be minimized. The rise time, the maximum overshoot, settling time and steady-state error are set as inequality constraints for tracking purpose, while the regulating time and the maximum overshoot of load regulation are set as inequality constraints for regulating purpose. Results obtained by the CuS will be compared with those obtained by the particle swarm optimization (PSO) and genetic algorithm (GA). From simulation results, it was found that the parameters of CuS were optimal than both PSO and GA for BLDC motor speed control system satisfying the preset input tracking and load regulating constraints. In addition, the simulation results are confirmed by the experimental ones from the BLDC motor speed control system developed in the laboratory.

Keywords : PID Controllers; Brushless DC Motor; Cuckoo Search; Metaheuristic

* Corresponding Author. Tel.: +668 1850 3236, E-mail Address: kdanupon@yahoo.com

1. บทนำ

ในบริบทการควบคุม มีวัตถุประสงค์หลักของการออกแบบระบบควบคุมอยู่สองส่วนคือ ส่วนแรกเรียกว่าการเฝ้าติดตามอินพุต (Input Tracking) หรือการตามรอยคำสั่ง (Command Following) ในขณะที่ส่วนที่สองเรียกว่าการคุมค่าโหลด (Load Regulating) หรือ การกำจัดกรบกวน (Disturbance Rejection) [1],[2] การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอดี (Proportional-Integral-Derivative) หรือ (PID) ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1922 [3] โดยปัจจุบันตัวควบคุม PID ได้รับการนำไปใช้แก้ปัญหามากมายแพร่หลายสำหรับการควบคุมให้มีประสิทธิภาพและมากกว่าครึ่งหนึ่งของอุตสาหกรรมอัตโนมัติจะเป็นตัวควบคุมแบบ PID ไม่เพียงใช้งานง่ายและทำให้เป็นจริงได้ง่ายแล้ว ตัวควบคุม PID ยังสามารถบรรลุวัตถุประสงค์หลักสองส่วนของการควบคุมดังกล่าวข้างต้น การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ยังเป็นงานที่ท้าทายอีกด้วย วิธีการออกแบบตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สามารถทำได้ง่ายโดยใช้วิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์หรือใช้กฎการปรับแต่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์แบบจำลองของพลานต์ (Plant) [4] ในขณะที่ใช้กฎการปรับแต่งจะได้จากผลตอบสนองของกระบวนการ (Process) อย่างไรก็ตาม วิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์และกฎการปรับแต่งก็มีเงื่อนไขบางประการที่เกี่ยวกับแบบจำลองของพลานต์ เช่น เวลาไร้ผลสนอง (Dead Time) หรือการเคลื่อนย้ายล่าช้า (Transport Lag) โพล (Poles) ที่ทำให้เร็วและช้า โพลและซีโร (Zeros) ที่มีค่าจริงและค่าเชิงซ้อนสังยุค (Complex Conjugate) รวมทั้งโพลที่ไม่เสถียร (Unstable) อื่นๆ เงื่อนไขต่างๆ เหล่านี้ ทำให้วิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์และกฎการปรับแต่งใช้ไม่ได้ทั่วไป เมื่อก้าวสู่ยุคใหม่ของการออกแบบการควบคุมชาญฉลาดได้เปลี่ยนจากกรอบงานเดิมไปเป็นแบบใหม่บนพื้นฐานการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสมัยใหม่ [5] ด้วยการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ของตัวควบคุม PID ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสมัยใหม่ได้เลือกใช้เทคนิคของอภิศึกษาสำนึก (Metaheuristic) ที่มีประสิทธิภาพในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้รับการยอมรับและนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดออกแบบตัวควบคุม PID ตัวอย่างที่นิยมเช่นการประยุกต์ใช้อภิศึกษาสำนึกออกแบบตัวควบคุม PID ด้วยจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) หรือ (GA) [6] และการออกแบบตัวควบคุม PID ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization) หรือ (PSO) [7],[8] แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกือบทั้งหมด จะพิจารณาเฉพาะวัตถุประสงค์การเฝ้าติดตามอินพุตของการออกแบบระบบควบคุม

ในปี ค.ศ. 2009 การค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search) หรือ (CuS) ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Yang และ Deb [9] ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงอภิศึกษาสำนึกแบบอิงประชากร (Population-based Metaheuristic Optimization) ที่มีประสิทธิภาพมาก อัลกอริทึมของ CuS (Algorithm of Cuckoo Search) จะเป็นการเลียนแบบพฤติกรรมของการวางไข่ของนกกาเหว่าในรังนกชนิดอื่น (Host Birds) ผสมกับการบินแบบเลวี (Lévy Flight) ซึ่งเป็นรูปแบบการบินของแมลงบางชนิด เช่น แมลงวันหรือผีเสื้อ [10] นำมาออกแบบเป็นอัลกอริทึม โดยที่สมรรถนะของ CuS ได้รับการประเมินเปรียบเทียบกับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดกับค่ามาตรฐานจำนวนมาก ทั้งแบบไม่มีเงื่อนไข (Unconstraint) แบบมีเงื่อนไข (Constraint) การกำหนด (Deterministic) การสุ่ม (Stochastic) วัตถุประสงค์เดียว (Single-objective) และหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective) [11],[12] นอกจากนี้ CuS ยังได้รับความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้งานกับปัญหาด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบคานเหล็ก (Beam) [11],[12] และการออกแบบจานห้ามล้อ (Disc Brake) [12] รวมทั้ง วิธีของ CuS ยังได้ถูกนำไปออกแบบตัวควบคุม

PID อย่างเหมาะสมสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) และนำไปออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID สำหรับการจำลองกระบวนการมาตรฐาน เป็นต้น

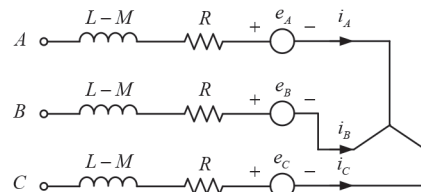
โดยวรรณกรรมเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคนิคของอภิศึกษาสำนักในการออกแบบตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสมดังที่ได้กล่าวมา ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) หรือค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างอินพุตอ้างอิงและเอาต์พุตที่ถูกควบคุม ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยที่สุดกับเงื่อนไขในการเฝ้าติดตามอินพุต ด้วยวิธีการดังกล่าว การเฝ้าติดตามคำสั่ง (Command Tracking) และผลตอบสนองที่สถานะอยู่ตัว (Steady-state) ของระบบที่ถูกควบคุมจะยังคงดูแลรักษาเอาไว้ แต่ผลตอบสนองในการกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบที่ถูกควบคุมไม่อาจคาดการณ์ได้ แรงจูงใจของงานวิจัยนี้คือ การเสนอการออกแบบทั่วไปสำหรับตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสมการเฝ้าติดตามคำสั่งและผลตอบสนองในการกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบควบคุมจะถูกพิจารณาไปพร้อมกัน ในงานวิจัยนี้ CuS ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) หรือ (BLDC Motor) [13],[14] บนพื้นฐานของการหาค่าเหมาะที่สุดสมัยใหม่กับเงื่อนไขในการเฝ้าติดตามอินพุตและการคุมค่าโหลด ค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Sum-squared Error) หรือ (SSE) ได้มาจากผลรวมของค่าผลต่างกำลังสองระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าน้อยที่สุด t_r คือช่วงเวลาดำเนิน (Rise Time) M_p คือค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Overshoot) t_s คือช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) และ e_{ss} คือค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady-state Error) จะถูกกำหนดแบบมีเงื่อนไขสำหรับการเฝ้าติดตามอินพุต ในขณะที่ t_{reg} คือช่วงเวลาคุมค่าโหลด (Regulating Time)

และ M_d คือค่าพุ่งเกินสูงสุดของการคุมค่าโหลด (Maximum Overshoot of Load Regulation) จะถูกกำหนดแบบมีเงื่อนไขสำหรับการคุมค่าโหลด ผลที่ได้รับจากวิธีของ CuS จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากวิธีของ PSO และ GA

2. วิธีการทดลอง

2.1 แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC

โดยปกติ แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC [15] สามารถเทียบเคียงได้จากแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สิ่งที่แตกต่างจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ มอเตอร์ BLDC จะมีเฟสเพิ่มขึ้นทั้งหมด 3 เฟส โดยที่จำนวนเฟสทั้งหมด เป็นผลรวมของแบบจำลองมอเตอร์ BLDC แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ BLDC

จากรูปที่ 1 สามารถเขียนสมการของแรงดันที่ใช้เฟสรวมกันได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} u_{AB} &= 2Ri_A + 2(L-M)\frac{di_A}{dt} + (e_A - e_B) \\ u_{BC} &= 2Ri_B + 2(L-M)\frac{di_B}{dt} + (e_B - e_C) \\ u_{CA} &= 2Ri_C + 2(L-M)\frac{di_C}{dt} + (e_C - e_A) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

โดยที่

R : ค่าความต้านทานของชุดขดลวด, โอห์ม

L : ค่าความเหนี่ยวนำของชุดขดลวด, เฮนรี่

M : ค่าความเหนี่ยวนำร่วมกัน

e_A, e_B, e_C : แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับ, โวลต์
 i_A, i_B, i_C : กระแสไฟฟ้าแต่ละเฟสของมอเตอร์,
 แอมแปร์

u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} : แรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสของมอเตอร์,
 โวลต์ สมการในแต่ละเฟส คือ

$$u_A = Ri_A + (L-M)\frac{di_A}{dt} + e_A \quad (2)$$

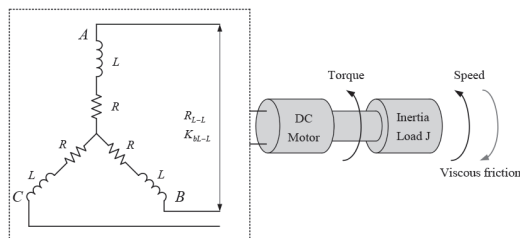
จากนั้น สมการแรงดันเฟสของมอเตอร์ BLDC
 สามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

และสมการแรงดันไฟฟ้าสามารถคำนวณหาได้จาก
 สมการแรงดันเฟส คือ

$$\begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -R & 0 \\ 0 & R & -R \\ -R & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & M-L & 0 \\ 0 & L-M & M-L \\ M-L & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A - e_B \\ e_B - e_C \\ e_C - e_A \end{bmatrix} \quad (4)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ BLDC ชนิด 3 เฟส
 ถูกควบคุมด้วยวงจรขับเคลื่อนแบบฟูลบริดจ์ (Full
 Bridge) แบบ 2 เฟส กลไกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
 ป้อนกลับ (Back Electromotive Force) หรือ
 (Back EMF) และแรงบิดของสนามแม่เหล็กทั้งหมด
 สามารถเทียบเคียงได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ
 มีแปรงถ่านชนิดดั้งเดิม ดังนั้น วิธีวิเคราะห์จึงสามารถ
 นำมาใช้กันได้ โดยที่มอเตอร์ BLDC มีผังการทำงาน
 แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผังการทำงานของมอเตอร์ BLDC

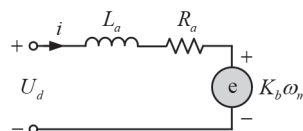
โดยที่

A, B, C : เฟสของมอเตอร์

L : ค่าความเหนี่ยวนำแต่ละเฟส, เฮนรี่

R : ค่าความต้านทานแต่ละเฟส, โอห์ม

จากรูปที่ 1 มอเตอร์ BLDC จะทำงานครึ่งละ
 2 เฟส คือ AB, BC หรือ CA จะถูกกระตุ้นด้วยสวิตซ์
 อิเล็กทรอนิกส์ให้ทำงาน แสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของมอเตอร์

สมมติว่า มอเตอร์ BLDC ชนิด 3 เฟส ถูกควบคุม
 ด้วยวงจรขับเคลื่อนแบบ 2 เฟส ของชุดขับเคลื่อนเฟส A
 และ B ที่มีอยู่ คือ

$$i_A = -i_B = i \quad (5)$$

$$\frac{di_A}{dt} = -\frac{di_B}{dt} = \frac{di}{dt} \quad (6)$$

ดังนั้น แรงดันไฟฟ้า u_{AB} ในสมการที่ (4) เขียนได้เป็น

$$u_{AB} = 2Ri + 2(L-M)\frac{di}{dt} + (e_A - e_B) \quad (7)$$

เนื่องจาก e_A และ e_B มีขนาดเท่ากันและมีทิศทางตรง
 กันข้าม $e_B = -e_A$ สมการที่ (7) แสดงได้เป็น

$$u_{AB} = U_d = 2Ri + 2(L-M)\frac{di}{dt} + 2e_A \quad (8)$$

$$u_{AB} = U_d = R_a i + L_a \frac{di}{dt} + K_b \omega_m \quad (9)$$

ดังนั้น สมการทางคณิตศาสตร์ในส่วนของการ
 เคลื่อนที่หาได้จาก

$$K_T i - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_v \omega_m \quad (10)$$

สมมติให้แรงบิดที่โหลด $T_L = 0$ แสดงดังสมการที่ (11)

$$i = \frac{J}{K_T} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_T} \omega_m \quad (11)$$

แทนค่าสมการที่ (11) ในสมการที่ (9) จะได้

$$U_d = R_a \left(\frac{J}{K_T} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_T} \omega_m \right) + L_a \frac{d}{dt} \left(\frac{J}{K_T} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_T} \omega_m \right) + K_b \omega_m \quad (12)$$

$$= \left(\frac{L_a J}{K_T} \right) \frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + \left(\frac{R_a J + L_a B_v}{K_T} \right) \frac{d\omega_m}{dt} + \left(\frac{R_a B_v + K_b K_T}{K_T} \right) \omega_m \quad (13)$$

ผลการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) ได้ดังนี้

$$G_u(s) = \frac{\Omega(s)}{U_d(s)} = \frac{K_T}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a B_v) s + (R_a B_v + K_b K_T)} \quad (14)$$

สมมติให้แรงบิดที่โหลด $T_L = 0$ โดยกำหนดให้ $T_L(s)$ เป็นอินพุตของระบบ และ $U_d(s) = 0$ แสดงดังสมการที่ (15) และสมการที่ (16) ตามลำดับ

$$\left[-K_b \frac{1}{R_a + L_a s} K_T \Omega(s) - T_L(s) \right] \frac{1}{J s + B_v} = \Omega(s) \quad (15)$$

$$\Omega(s) \left[\frac{(R_a + L_a s)(J s + B_v) + K_b K_T}{(R_a + L_a s)} \right] = -T_L(s) \quad (16)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงบิดที่โหลดและความเร็ว คือ

$$G_L(s) = \frac{\Omega(s)}{T_L(s)} = - \frac{R_a + L_a s}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a B_v) s + (R_a B_v + K_b K_T)} \quad (17)$$

แรงดันไฟฟ้าและแรงบิดที่โหลดจะมีผลต่อความเร็วของมอเตอร์ BLDC แสดงได้ดังสมการที่ (16)

$$\begin{aligned} \Omega(s) &= G_u(s) U_d(s) + G_L(s) T_L(s) \\ &= \frac{K_T U_d(s)}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a B_v) s + (R_a B_v + K_b K_T)} \\ &\quad - \frac{(R_a + L_a s) T_L(s)}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a B_v) s + (R_a B_v + K_b K_T)} \end{aligned} \quad (18)$$

โดยที่

U_d : แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง, โวลต์

i : กระแสไฟฟ้า, แอมแปร์

e_A : แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับ, โวลต์

R_a : ค่าความต้านทานของชุดขดลวด, โอห์ม

L_a : ค่าความเหนี่ยวนำของชุดขดลวด, เฮนรี่

J : ค่าโรเตอร์โมเมนต์ความเฉื่อย, กิโลกรัม-ตารางเมตร

T_L : แรงบิดที่โหลด, นิวตันเมตร

ω_m : ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์, เรเดียน/วินาที

B_v : ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, นิวตันเมตร/ (เรเดียน/วินาที)

K_b : แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับ, โวลต์/ (เรเดียน/วินาที)

K_T : ค่าสัมประสิทธิ์คิกซ์ของแรงบิด, นิวตันเมตร

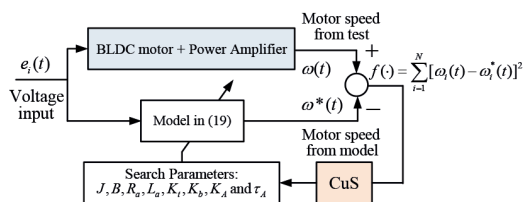
M : ค่าความเหนี่ยวนำร่วมกัน กำหนดให้ $M = 0$

จากสมการที่ (14) พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองมอเตอร์ BLDC เป็นระบบอันดับสองซึ่งประกอบด้วยส่วนทางกล (Mechanical Part) ของมอเตอร์ และเพลา (Shaft) เพื่อให้มีค่าใกล้เคียงกับระบบจริงสามารถทำได้โดยเพิ่มชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC ที่แทนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งเข้าไป เมื่อ K_A คือค่าคงที่อัตราขยายกำลัง (Power Amplifier Constant) และ τ_A คือค่าคงที่อัตราขยายกำลัง (Power Amplifier Time Constant) ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองมอเตอร์ BLDC จะได้

$$G_p(s) = \left(\frac{K_A}{\tau_A s + 1} \right) \left(\frac{K_T}{(L_a J) s^2 + (R_a J + L_a B_v) s + (R_a B_v + K_b K_T)} \right) \quad (19)$$

จากสมการที่ (19) พบว่าค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ BLDC ผนวกกับค่าพารามิเตอร์ของวงจรขยาย (Amplifier) มอเตอร์ BLDC จำนวน 8 ตัว จะถูกหาด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ (Parameter Identification) [16] มอเตอร์ BLDC

ด้วย CuS ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4 พบว่า $f(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในรูปผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (SSE) ซึ่งหาได้จากผลรวมของค่าผลต่างกำลังสองระหว่างข้อมูลความเร็วจริง $\omega(t)$ และข้อมูลความเร็วการจำลอง $\omega^*(t)$ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(\cdot)$ จะถูกป้อนกลับจาก CuS ซึ่งก่อรูปขึ้นเพื่อทำให้ค่าน้อยที่สุดในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดทำให้ได้รับคำตอบที่ดีระหว่างการทดลองจริงกับแบบจำลองของมอเตอร์ BLDC



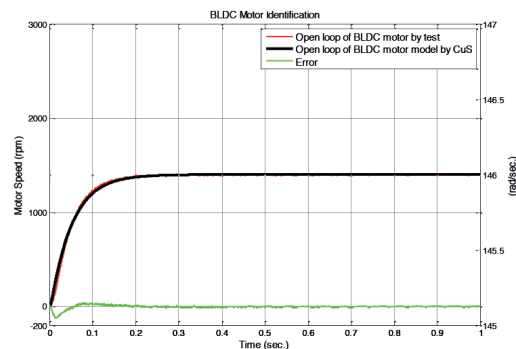
รูปที่ 4 การระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ BLDC โดยใช้ CuS

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของ CuS เบื้องต้นทำได้ดังนี้ จำนวนของรัง $n = 22$ และสัดส่วน $p_a = 0.25$ จำนวนรอบสูงสุด (Max_Gen) = 1000 ถูกกำหนดให้เป็นเกณฑ์ยุติการค้นหา (Termination Criteria) หรือ (TC) ดังนั้น การกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ BLDC จะกำหนดให้สอดคล้องกับปฏิกิริยาการค้นหา (กำหนดจากกรอบการทำงานจริง) ค่าที่ได้เป็นพื้นฐานการกำหนดขอบเขต ดังสมการที่ (20)

$$\begin{aligned} R_a &= [0, 13], L_a = [0, 0.03], K_T = [0, 0.3], K_b = [0, 0.3], \\ J &= [0, 0.0003], B_v = [0, 0.0006], K_A = [0, 20], \tau_A = [0, 0.003] \end{aligned} \quad (20)$$

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ BLDC โดยใช้ CuS

ค่าพารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าที่ได้	หน่วย
ค่าความต้านทานของชุดขดลวด	R_a	10.8308	โอห์ม
ค่าความเหนี่ยวนำของชุดขดลวด	L_a	0.0220	เฮนรี่
ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของแรงบิด	K_T	0.2564	นิวตันเมตร/แอมแปร์
แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับ	K_b	0.1364	โวลต์/(เรเดียน/วินาที)
ค่าโรเตอร์โมเมนต์ความเฉื่อย	J	0.0002	กิโลกรัม-ตารางเมตร
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	B_v	0.0006	นิวตันเมตร/(เรเดียน/วินาที)
ค่าคงที่อัตราขยายกำลัง	K_A	11.1775	—
ค่าเวลาคงที่อัตราขยายกำลัง	τ_A	0.0013	วินาที



รูปที่ 5 การระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ BLDC ด้วย CuS ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที จากตารางที่ 1 ลงในสมการที่ (19) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$G_p(s) = \frac{0.04887}{5.72 \times 10^{-9} s^3 + 7.233 \times 10^{-6} s^2 + 0.002233 s + 0.04147} \quad (21)$$

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ BLDC นำไปออกแบบตัวควบคุม PID เปรียบเทียบผลตอบสนองของการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ด้วย CuS กับ PSO และ GA

2.2 การค้นหาแบบนกกาเหว่า

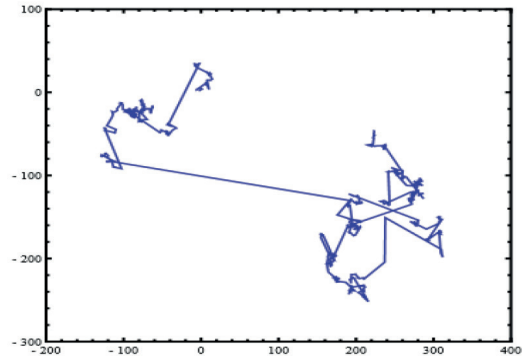
การค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search) หรือ (CuS) เป็นวิธีการเลียนแบบพฤติกรรมการวางไข่ของนกกาเหว่า โดยนกกาเหว่าจะวางไข่ในรังนกชนิดอื่น ถ้านกชนิดอื่นรู้ว่าไข่ที่อยู่ในรังไม่ใช่ของมัน นกชนิดอื่นอาจจะโยนไข่ของนกกาเหว่าทิ้งหรือไม่ก็ทิ้งรังแล้วไปสร้างรังใหม่ที่อื่นได้ โดยทั่วไปไข่ของนกกาเหว่าจะฟักเร็วกว่าไข่ของนกชนิดอื่นเล็กน้อย เมื่อลูกนกกาเหว่าฟักออกมามันจะมีสัญชาตญาณที่จะขับไล่ไข่ของนกชนิดอื่นออกจากรัง เมื่อนกชนิดอื่นไม่อยู่ โดยเป็นการเพิ่มส่วนแบ่งอาหาร เพื่อให้เข้าใจง่ายในการอธิบายการค้นหาแบบนกกาเหว่าจะใช้กฎอุดมคติ 3 ข้อ คือ

ก) นกกาเหว่าจะวางไข่ 1 ฟองต่อครั้ง และจะทิ้งไข่ของมันไว้ในรังที่เลือกสุ่ม

ข) รังที่ดีและไข่ที่มีคุณภาพสูงจะดำเนินไปยังรุ่นถัดไปได้

ค) กำหนดให้จำนวนรังของนกชนิดอื่นที่ใช้ได้ (n) และไข่ที่วางโดยนกกาเหว่าถูกค้นพบโดยนกชนิดอื่น มีความน่าจะเป็น (p_a) อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

จากการศึกษาต่าง ๆ ได้พบว่าพฤติกรรมการบินของสัตว์และแมลงบางชนิด แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนที่แบบเลวีแสดงได้ดังรูปที่ 6 เส้นทางการหาอาหารของนกและแมลงบางชนิดที่มีการบินในวิถีตรงและหักเลี้ยวด้วยมุมตั้งฉาก 90 องศาอย่างทันทีทันใด ผสมกับการเคลื่อนไหวแบบสุ่มอย่างสิ้น ๆ ดังนั้นอัลกอริทึมของ CuS (Algorithm of Cuckoo Search) จึงได้ถูกพัฒนาโดย Yang และ Deb [9] ที่อยู่บนพื้นฐานการเพาะพันธุ์ของนกกาเหว่าและการบินแบบเลวี



รูปที่ 6 ลักษณะการบินแบบเลวี [10]

เมื่อมีการสร้างวิธีแก้ปัญหาใหม่ $x_k^{(t+1)}$ สำหรับนกกาเหว่า k สามารถสร้างขึ้นโดยใช้การบินแบบเลวีแสดงได้ดังสมการที่ (22) โดยที่ $\alpha > 0$ คือขนาดขั้นการค้นหา (Step Size) ส่วนใหญ่ในกรณี $\alpha = 1.0$ สามารถใช้ได้ โดยตัดสินใจได้ว่าสมการที่ (22) จะสามารถพิจารณาสมการเฟ้นสุ่ม (Stochastic Equation) สำหรับการเดินสุ่ม (Random Walk) ที่มีลักษณะเป็นไปตามลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Chain) นั่นคือ ตำแหน่งใหม่จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งเดิม (เทอมแรกของสมการที่ (22)) และความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนตำแหน่ง (เทอมที่สองของสมการที่ (22)) ส่วนสัญลักษณ์ $\otimes$ หมายถึงการคูณแบบแจกแจง (Entry-wise Multiplications) ที่มีความคล้ายกับการปฏิบัติการที่ใช้ในขั้นตอนวิธี PSO ในขณะที่สัญลักษณ์ $Levy(\lambda)$ แสดงถึงเส้นทางการบินแบบเลวี โดยมีเงื่อนไขว่าให้เดินสุ่มกับขั้นตอนการสุ่มที่มีลักษณะการแจกแจงแบบเลวี ซึ่งค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนมีค่าเป็นอนันต์ ดังแสดงในสมการที่ (23)

$$x_k^{(t+1)} = x_k^{(t)} + \alpha \otimes Levy(\lambda) \quad (22)$$

$$Levy \approx a = t^{-\lambda}, (1 < \lambda \leq 3) \quad (23)$$

โดยที่

$x_k^{(t+1)}$: ตำแหน่งของรังในรอบใหม่

$x_k^{(t)}$: ตำแหน่งของรังในรอบเดิม

k : นกกาเหว่า และ t : เวลา

α : ค่าพารามิเตอร์มีค่ามากกว่า 0

$Le'vy(\lambda)$: ค่าจากตัวแบบสถิติการบินแบบเลวี

$$s = \frac{a}{|b|^{1/\beta}} \quad (24)$$

$$a \approx N(0, \sigma_a^2), \quad b \approx N(0, \sigma_b^2) \quad (25)$$

$$\sigma_a = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta)\sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2]\beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}, \quad \sigma_b = 1 \quad (26)$$

และ

s : ขนาดขั้นการค้นหา

a, b : ค่าจากการแจกแจงแบบปกติ

N : การแจกแจงแบบปกติ

σ_a^2 : ค่าความแปรปรวนของ a

σ_b^2 : ค่าความแปรปรวนของ b

Γ : ค่าฟังก์ชันมาตรฐาน

β : ค่าคงที่อยู่ในช่วง, $(0 \leq \beta \leq 3/2)$

ดังนั้น ขนาดขั้นการค้นหา s สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (24) โดยที่ a และ b คือค่าจากการแจกแจงแบบปกติดังสมการที่ (25) ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ a และ b ดังสมการที่ (26) กับสัดส่วน p_a คือค่าความน่าจะเป็น $(0 \leq p_a \leq 1)$

จากกฎอุดมคติ 3 ข้อ ขั้นตอนพื้นฐานของการค้นหาแบบนกกาเหว่า (CuS) สามารถเขียนสรุปขั้นตอนการทำงานของ CuS ได้ 9 ขั้นตอน และแสดงได้ด้วยแผนภูมิ (Flow Chart) ของ CuS ดังรูปที่ 7 ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$f(x), \quad x = (x_1, \dots, x_d)^T$$

ขั้นตอนที่ 2 สร้างประชากรเริ่มต้นของ n เป็นจำนวนรังนกชนิดอื่นเริ่มต้น $x_i = (i = 1, 2, \dots, n)$

ขั้นตอนที่ 3 ดำเนินการตรวจสอบว่าครบจำนวนรอบที่กำหนด หรือถึงเกณฑ์ยุติการค้นหา (TC) หรือไม่ ถ้าใช่ให้ทำขั้นตอนที่ 9 ถ้าไม่ใช่ให้ทำขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 ประเมินคุณภาพของรังจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F_j หลังจากนั้นสุ่มเลือกรังใหม่มาประเมินคุณภาพรังด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F_j

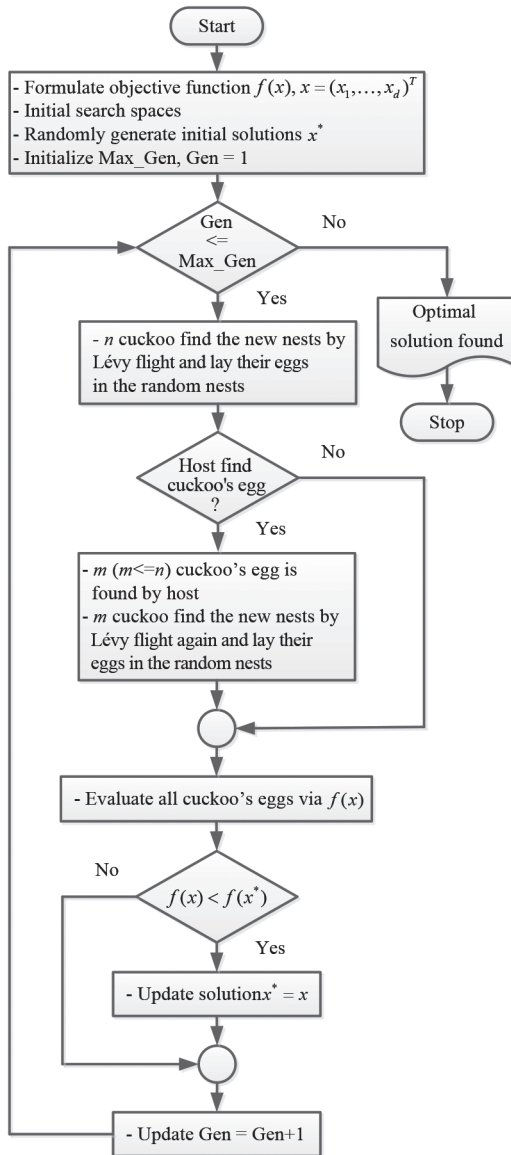
ขั้นตอนที่ 5 นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า F_j มีค่ามากกว่า F_j ให้ทำการแทนที่รัง j เป็นคำตอบใหม่

ขั้นตอนที่ 6 การค้นพบรังใหม่นั้นจะต้องมีค่าความน่าจะเป็นมากกว่าค่า p_a ตามที่กำหนดไว้สำหรับรังที่ไม่ผ่านค่า p_a ให้ทิ้งค่ารังแล้วสุ่มเลือกค่ารังใหม่

ขั้นตอนที่ 7 เก็บคำตอบที่ดีที่สุดหรือคำตอบของรังที่มีคุณภาพ

ขั้นตอนที่ 8 เรียงลำดับคำตอบที่ได้ จากนั้นกลับไปขั้นตอนที่ 3

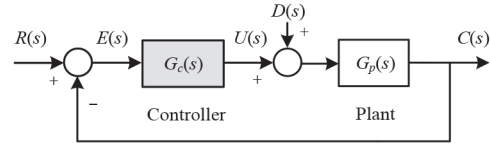
ขั้นตอนที่ 9 คำตอบสุดท้ายเป็นคำตอบที่ดีที่สุดและเป็นรังที่มีคุณภาพ



รูปที่ 7 แผนภูมิแสดงอัลกอริทึมของ CuS

2.3 การออกแบบตัวควบคุม PID

ระบบควบคุมโดยทั่วไป จะมีโครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 8 ตัวควบคุม $G_c(s)$ ได้รับสัญญาณค่าความผิดพลาด $E(s)$ และสร้างเป็นสัญญาณควบคุม $U(s)$ ส่งไปควบคุมทางเอาต์พุต $C(s)$ ของพลานต์ $G_p(s)$ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ และกำจัดสัญญาณรบกวน $D(s)$



รูปที่ 8 โครงสร้างของระบบควบคุมทั่วไป

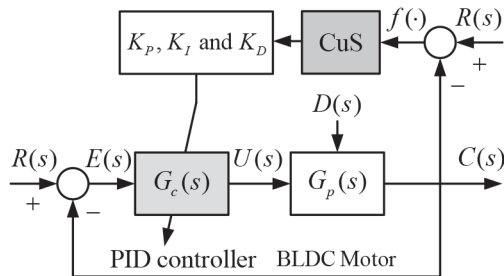
ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PID แสดงได้ดังสมการที่ (27) โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายเชิงปรับสัดส่วน (Proportional Gain) K_i เป็นอัตราขยายเชิงอินทิกรัล (Integral Gain) และ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative Gain) ตามลำดับ ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด (Closed Loop) ของระบบควบคุม PID สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (28)

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (27)$$

$$\left. \frac{C(s)}{R(s)} \right|_{PID} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (28)$$

การออกแบบระบบควบคุม PID โดยใช้ CuS แสดงได้ดังรูปที่ 9 ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(\cdot)$ จะถูกป้อนให้กับ CuS เพื่อทำหน้าที่ค้นหาค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i และ K_d ของตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสม โดยที่ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(\cdot)$ ได้มาจากผลรวมของค่าผลต่างกำลังสองระหว่างความเร็วอ้างอิง $R(s)$ และความเร็วจริง $C(s)$ โดยที่ N คือจำนวนข้อมูลที่นำมาคำนวณในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(\cdot)$ เพื่อให้อยู่ในรูปผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (SSE) แสดงได้ดังสมการที่ (29) ซึ่งกำหนดเป็นฟังก์ชันคอนเวกซ์ (Convex Function) ที่สามารถหาค่าน้อยที่สุดได้ โดยที่ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(\cdot)$ จะถูกป้อนให้กับ CuS เพื่อหาค่าน้อยที่สุดในการหาค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i และ K_d ของตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ BLDC กับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขในการเฝ้าติดตามอินพุตและการคุมค่าโหลดด้วย CuS เพื่อให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองตามต้องการ

ค่า t_r , M_p , t_s และ e_{ss} จะถูกกำหนดแบบมีเงื่อนไขสำหรับการเฝ้าติดตามอินพุต ในขณะที่ t_{reg} และ M_d จะถูกกำหนดแบบมีเงื่อนไขสำหรับการคุมค่าโหลด แสดงได้ดังสมการที่ (29)



รูปที่ 9 ระบบควบคุม PID โดยใช้ CuS

$$\text{Minimize } f(\cdot) = \sum_{i=1}^N [r(i) - c(i)]^2$$

subject to :

$$\left. \begin{array}{l} t_r \leq 0.2 \text{ sec.}, \\ M_p \leq 10\%, \\ t_s \leq 0.5\%, \\ e_{ss} \leq 0.1\% \end{array} \right\} : \text{Input Tracking}$$

$$\left. \begin{array}{l} t_{reg} \leq 0.5 \text{ sec.}, \\ M_d \leq 40\%, \end{array} \right\} : \text{Load Regulating}$$

$$0 \leq K_p \leq 10, 0 \leq K_i \leq 100, 0 \leq K_d \leq 0.1$$

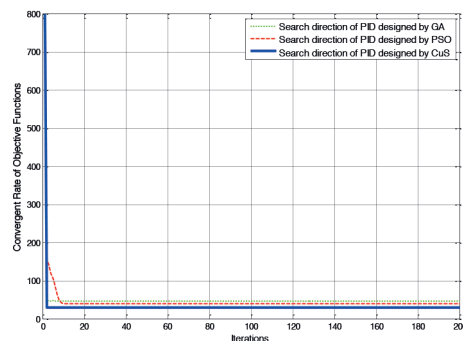
การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของ CuS เบื้องต้นทำได้ดังนี้ จำนวนของรัง $n = 22$ และสัดส่วน $p_a = 0.25$ จำนวนรอบสูงสุด (Max_Gen) = 200 ถูกกำหนดให้เป็นเกณฑ์ยุติการค้นหา (TC) ดังนั้น การกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID จะกำหนดให้สอดคล้องกับปฏิกิริยาการค้นหา ในงานวิจัยนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลการออกแบบตัวควบคุม PID สำหรับมอเตอร์ BLDC ด้วย CuS กับ PSO และ GA โดยกำหนดเงื่อนไขการออกแบบตัวควบคุม PID ภายใต้อินพุตของขอบเขตค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(\cdot)$ เดียวกัน หลังจากยุติการค้นหาจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แสดงได้ดังสมการที่ (30) สมการที่ (31) และสมการที่ (32) ตามลำดับ

$$G_c(s)|_{PID_GA} = 0.6741 + \frac{22.1972}{s} + 0.00101s \quad (30)$$

$$G_c(s)|_{PID_PSO} = 0.9736 + \frac{32.1964}{s} + 0.00001s \quad (31)$$

$$G_c(s)|_{PID_CuS} = 1.3391 + \frac{41.1988}{s} + 0.00001s \quad (32)$$

การรู้เข้าหาคำตอบของปัญหามาตรกของ CuS กับ PSO และ GA จะดำเนินการค้นหาทั้งหมด 40 ตัวอย่าง จำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 200 รอบ ถูกกำหนดให้เป็น TC ค่าเริ่มต้นกำหนดจากขอบเขตการค้นหาตามสมการที่ (29) หลังจากยุติการค้นหา พบว่า CuS สามารถค้นหาคำตอบกว้าง (Global Solution) ได้เร็วกว่าจำนวนรอบการค้นหาน้อยกว่า PSO และ GA โดยที่ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(\cdot)$ ของ CuS รอบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 28.90 ในขณะที่ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(\cdot)$ ของ PSO รอบที่ 10 จะมีค่าเท่ากับ 40.00 และ GA รอบที่ 15 จะมีค่าเท่ากับ 46.00 แสดงได้ดังรูปที่ 10



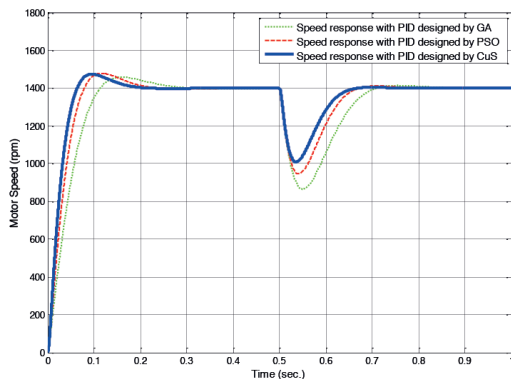
รูปที่ 10 การรู้เข้าหาคำตอบกว้างของตัวควบคุม PID โดยใช้ CuS กับ PSO และ GA

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการจำลอง

ทดสอบระบบควบคุมโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK [17] เปรียบเทียบระบบควบคุม PID สำหรับมอเตอร์ BLDC ด้วย CuS กับ PSO และ GA ที่ความเร็วรอบ 1400

รอบต่อหน้าที่ผลตอบแทนระบบควบคุมเมื่อมีสัญญาณรบกวนคงที่ที่เข้ามาที่อินพุต (Input Disturbance) ของระบบควบคุมมอเตอร์ BLDC ขนาด 2.09 โวลต์ ที่เวลา 0.5 วินาทีแสดงได้ดังรูปที่ 11 และตารางที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 11 ผลตอบสนองระบบควบคุม

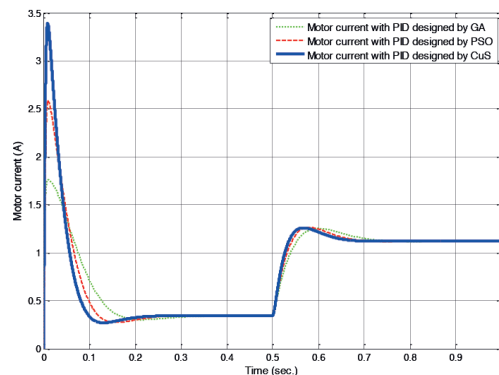
ตารางที่ 2 สมรรถนะของระบบควบคุมของ PID โดยใช้ CuS กับ PSO และ GA

วิธี	ผลตอบสนองของระบบควบคุม					
	t_r (sec.)	M_p (%)	t_s (sec.)	e_{ss} (%)	t_{reg} (sec.)	M_d (%)
GA	0.1138	4.19	0.2271	0.00	0.1858	38.21
PSO	0.0792	5.66	0.1822	0.00	0.1493	32.50
CuS	0.0642	5.30	0.1529	0.00	0.1351	27.85

จากตารางที่ 2 พบว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุม PID ด้วย CuS จะมีช่วงเวลารั้ง t_r (0 ถึง 100% ของค่าสุดท้าย) และมีช่วงเวลารั้งที่ t_s ($\pm 2\%$ ของค่าสุดท้าย) น้อยที่สุด แต่มีค่าพุงเกิน M_p ใกล้เคียงกับวิธี PSO และ GA จากรูปที่ 11 พบว่า ไม่มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดอิทธิพลจากสัญญาณรบกวน โดยมีค่าพุงเกินสูงสุดของการคุมค่าโหลด M_d น้อย และมีช่วงเวลาคูมค่าโหลด t_{reg} ($\pm 2\%$ ของค่าสุดท้าย) เร็วกว่า PSO และ GA

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองกระแสมอเตอร์ของระบบควบคุม PID ด้วย CuS กับ PSO และ GA โดย

ป้อนโหลดให้กับระบบควบคุม PID ที่มีค่าเท่ากับ 0.2 นิวตันเมตร พบว่า ระบบควบคุม PID ที่ใช้ CuS จะให้ผลตอบสนองกระแสมอเตอร์ในช่วงเริ่มต้นมีค่าสูงมาก ส่งผลให้มีแรงบิด (Torque) ในการขับโหลดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ป้อนโหลดให้กับระบบควบคุม PID ที่ใช้ CuS พบว่า มีการตอบสนองต่อกระแสเร็วขึ้นกว่าตัวควบคุมแบบ PSO และ GA แสดงได้ดังรูปที่ 12

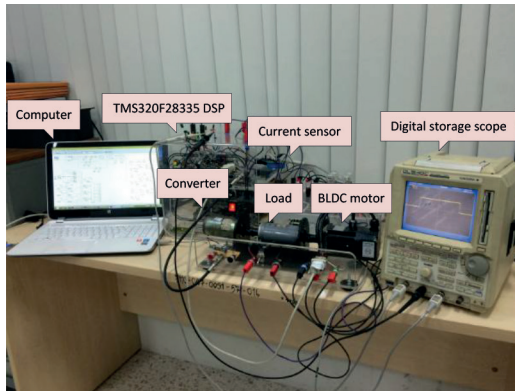


รูปที่ 12 ผลตอบสนองกระแสมอเตอร์ของระบบควบคุม

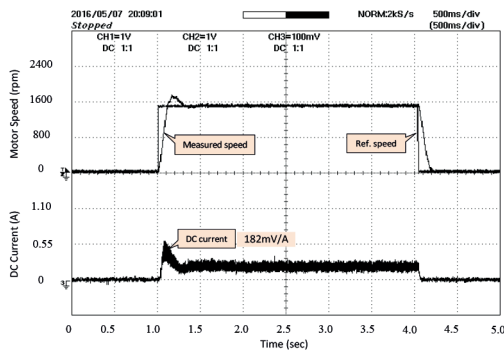
3.2 ผลการทดสอบ

เพื่อยืนยันผลการจำลองนำผลที่ได้ไปควบคุมระบบในห้องปฏิบัติการจริง ซึ่งพลาตต์ที่ทดสอบเป็นมอเตอร์ BLDC ขนาดพิกัด 100 วัตต์ แรงดัน 100 โวลต์ โดยใช้คอนเวอร์เตอร์ (Converter) แบบควบคุมแรงดันผ่านชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processor) หรือ (DSP) รุ่น TMS320F28335 [18] เขียนโปรแกรมด้วย MATLAB/SIMULINK ตรวจสอบตำแหน่งการหมุนของเฟลาโรเตอร์ผ่านตัวตรวจรู้แบบฮอลล์ (Hall Sensor) ของมอเตอร์ BLDC ส่วนประกอบของระบบควบคุมมอเตอร์ BLDC แสดงได้ดังรูปที่ 13 ทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ในขณะปลดโหลด (No Load) กับป้อนโหลดเต็มพิกัด (Full Load) เปรียบเทียบผลการออกแบบตัวควบคุม PID ด้วย CuS กับ PSO และ GA โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมจริงจะมีค่าเท่ากับ

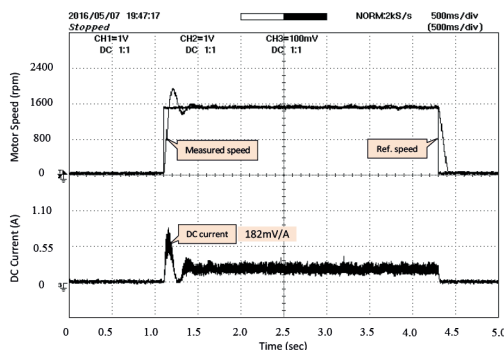
การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ที่คาบเวลาสุ่ม (Sampling Period) เท่ากับ 1 มิลลิวินาที ผลตอบสนองของการเฝ้าติดตามอินพุตและการคุมค่าโหลดของระบบควบคุมจริง แสดงได้ดังรูปที่ 14 และรูปที่ 15



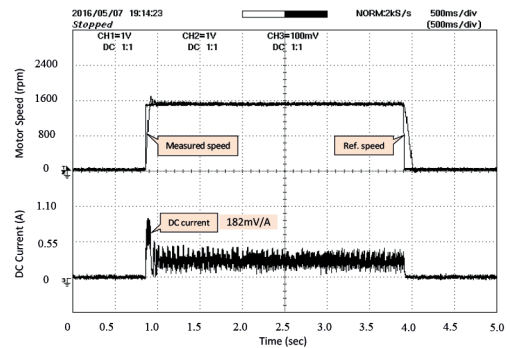
รูปที่ 13 ส่วนประกอบของมอเตอร์ BLDC



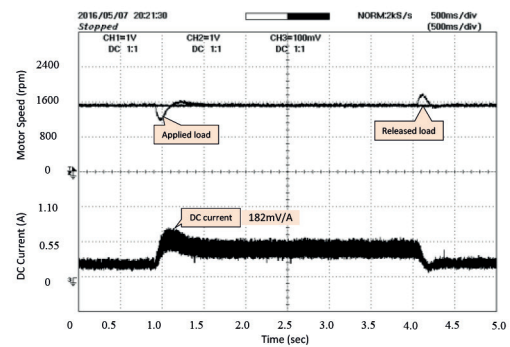
ก) ระบบควบคุมจริงที่ใช้ PID ด้วย GA



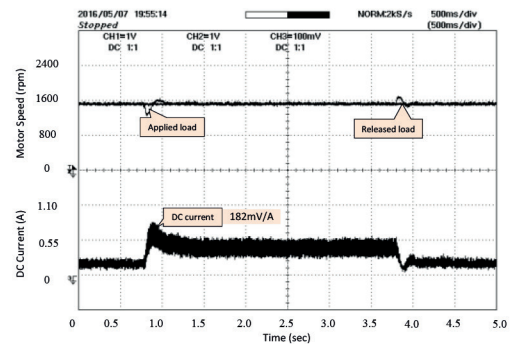
ข) ระบบควบคุมจริงที่ใช้ PID ด้วย PSO



ค) ระบบควบคุมจริงที่ใช้ PID ด้วย CuS
รูปที่ 14 ผลตอบสนองของการเฝ้าติดตามอินพุต

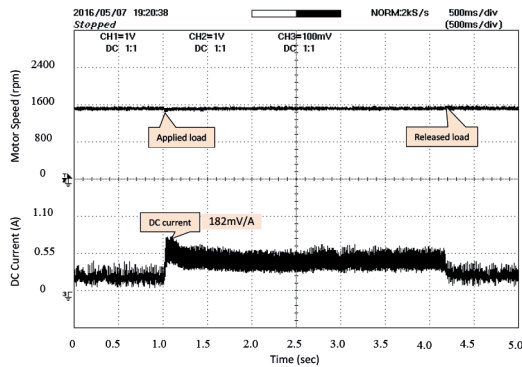


ก) ระบบควบคุมจริงที่ใช้ PID ด้วย GA



ข) ระบบควบคุมจริงที่ใช้ PID ด้วย PSO

รูปที่ 15 ผลตอบสนองของการคุมค่าโหลด



ค) ระบบควบคุมจริงที่ใช้ PID ด้วย CuS

รูปที่ 15 ผลตอบสนองของการคุมค่าโหด (ต่อ)

ตารางที่ 3 สมรรถนะของระบบควบคุมจริงที่ใช้ PID ด้วย CuS กับ PSO และ GA

วิธี	ผลตอบสนองของระบบควบคุม				
	t_r (sec.)	M_p (%)	t_s (sec.)	t_{reg} (sec.)	M_d (%)
GA	0.18	30.00	0.40	0.20	25.00
PSO	0.10	45.00	0.30	0.15	14.28
CuS	0.05	8.00	0.15	0.05	3.57

จากตารางที่ 3 พบว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุมจริงที่ใช้ PID ด้วย CuS ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที มีช่วงเวลาดำเนิน t_r กับมีช่วงเวลาดำเนิน t_s และมีค่าพิกัด M_p น้อยที่สุด นอกจากนี้ เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดอิทธิพลในขณะป้อนโหดให้กับระบบควบคุม PID ด้วย CuS พบว่า ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุม PID ด้วย CuS มีประสิทธิภาพในการกำจัดอิทธิพลในขณะป้อนโหนดได้เร็ว โดยมีค่าพิกัดสูงสุดของการคุมค่าโหนด M_d น้อยมาก และมีช่วงเวลาคุมค่าโหนด t_{reg} น้อยกว่า PSO และ GA

4. สรุป

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอย่างเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ BLDC กับการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขในการเฝ้าติดตาม

อินพุตและการคุมค่าโหนดด้วย CuS หนึ่งในเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงอภิศักศึกษาสำนึกที่มีประสิทธิภาพมากแบบอิงประชากร ค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองได้มาจากผลรวมของค่าผลต่างกำลังสองระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ช่วงเวลาขึ้น ค่าพิกัดสูงสุดช่วงเวลาเข้าที่ และค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว จะถูกกำหนดแบบมีเงื่อนไขสำหรับการเฝ้าติดตามอินพุต ในขณะที่ช่วงเวลาคุมค่าโหนดและค่าพิกัดสูงสุดของการคุมค่าโหนดจะถูกกำหนดแบบมีเงื่อนไขสำหรับการคุมค่าโหนด ผลที่ได้รับจาก CuS ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจาก PSO และ GA จากผลการจำลองพบว่า ค่าพารามิเตอร์ของ CuS จะให้ค่าที่เหมาะสมกว่า PSO และ GA สำหรับระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ BLDC แบบมีเงื่อนไขในการเฝ้าติดตามอินพุตและการคุมค่าโหนดเป็นที่น่าสนใจ นอกจากนี้ ผลการจำลองได้รับการยืนยันจากผลการทดสอบระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ BLDC ในห้องปฏิบัติการจริง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, Prentice-Hall, 2005.
- [2] J. J. Rubio, "Hybrid controller with observer for the estimation and rejection of disturbances," *ISA Transactions*, vol. 65, pp. 445-455, 2016.
- [3] N. Minorsky, "Directional stability of automatically steered bodies," *Naval Engineers Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 284, 1922.
- [4] J. J. Rubio, P. Cruz, L. A. Paramo, J. A. Meda, D. Mujica and R. S. Ortigoza, "PID anti-vibration control of a robotic arm," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 7, pp. 3144-3150, 2016.

- [5] V. Zakian, *Control Systems Design: A New Framework*, London: Springer-Verlag, 2005.
- [6] Y. Mitsukura, T. Yamamoto and M. Kaneda, "A design of self-tuning PID controller using a genetic algorithm," in *Proceeding of the International Conference on American Control Conference*, San Diego, USA, 1999, pp. 1361-1365.
- [7] A. J. Mohammed, "A particle swarm optimization (PSO) based optimum of tuning PID controller for a separately excited DC motor (SEDM)," *Eng. & Tech. Journal*, vol. 29, no. 16, pp. 3322- 3323, 2011.
- [8] C. Kiree, D. Kumpanya, S. Tunyasirirut and D. Puangdownreong, "PSO-Based Optimal PI(D) Controller Design for Brushless DC Motor," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 715-723, 2016.
- [9] X. S. Yang and S. Deb, "Cuckoo search via Lévy flights," *World Congress on NaBIC2009*, pp. 210-214, 2009.
- [10] X. S. Yang, "Firefly Algorithm," *Stochastic Test Functions and Design Optimization, Bio-Inspired Computation*, vol. 2, no. 2, pp. 78-84, 2010.
- [11] X. S. Yang and S. Deb "Engineering Optimisation by Cuckoo Search," *Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, vol. 1, no. 4, pp. 330-343, 2010.
- [12] X. S. Yang, and S. Deb, "Multiobjective cuckoo search for design optimization," *Computers and Operations Research*, vol. 40, no. 6, pp. 1616-1624, 2013.
- [13] P. Yedamale, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals: Model AN885 Microchip Technology Inc., 2003.
- [14] V. K. R. S. Patel and A.K. Pandey, "Modeling and Performance Analysis of PID controlled BLDC Motor and Different Schemes of PWM controlled BLDC motor," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, no. 4, pp. 1-14, Apr. 2013.
- [15] S. A. Mohammed and EL-Samahy A. Adel, "Speed Control of BLDC Motor By Using PID Control and Self-tuning Fuzzy PID Controller," in *15th International/ Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM)*, Elgouna, Egypt, 2014, pp. 1-9.
- [16] C. Kiree, D. Kumpanya, S. Tunyasirirut and D. Puangdownreong, "Application of Particle Swarm Optimization to Identify Model Parameters of BLDC Motor," in *Proceeding of the 19th International Annual Symposium on Computational/ Science and Engineering*, Ubon Ratchathani, Thailand, 2015, pp. 84-88.
- [17] *MATLAB/SIMULINK User's Guide*, The Math Works Inc., Natick, MA, 1998.
- [18] *Texas Instruments*, TMS320F28335, Digital Signal Controller, 2007.