

การออกแบบตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสม
สำหรับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้า
ด้วยขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฬ

Optimal PID Controller Design for Electric Vehicle
Speed Control System
using Whale Optimization Algorithm

กิตติศักดิ์ ฤาแรง¹ ทิวา จิตหวัง² และ เตชา พวงดาวเรือง^{3*}
Kittisak Lurang¹, Thiwa Jitwang² and Deacha Puangdownreong^{3*}

Received: 14 February 2025

Revised: 24 August 2025

Accepted: 5 September 2025

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฬ (Whale Optimization Algorithm: WOA) ซึ่งเป็นเทคนิคการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบอภิศึกษาสำนึกที่ทรงประสิทธิภาพ โดยกำหนดให้ผลรวมของผลต่างยกกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วอ้างอิงและความเร็วจริง เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการทำให้มีค่าน้อยที่สุด ตามหลักการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่ ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย WOA จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอิงผู้สอน-ผู้เรียน (Teacher-Learner-Based Optimization: TLBO) จากผลการออกแบบพบว่าตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA สามารถให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าทั้งในส่วนของผลตอบสนองแบบเฝ้าติดตามสัญญาณอินพุต และผลตอบสนองแบบคุมค่าโหลด ที่รวดเร็วและราบเรียบกว่าตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี TLBO อย่างน่าพึงพอใจ

คำสำคัญ: ตัวควบคุม PID ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้า ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฬ เทคนิคการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบอภิศึกษาสำนึก การหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่

¹สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น กาญจนบุรี ประเทศไทย 71170

¹Department of Surveying Engineering, Faculty of Liberal Arts and Science, Western University, Kanchanaburi, Thailand 71170

²นักวิชาการอิสระ นนทบุรี ประเทศไทย 11140

²Independent Scholar, Nonthaburi, Thailand 11140

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10160

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia University, Bangkok, Thailand 10160

*ผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding author) e-mail: deachap@sau.ac.th

ABSTRACT

This paper presents the optimal PID controller design for the electric vehicle (EV) speed control system by using the whale optimization algorithm (WOA), one of the most powerful metaheuristic optimization techniques. The sum-squared error (SSE) between the referent speed and actual speed will be set as the objective function to be minimized according to the modern optimization principle. The PID controller designed by the WOA will be compared with that designed by the teacher-learner-based optimization (TLBO). As design results, it was found that the PID controller designed by the WOA can provide very satisfactory response of the EV speed control system in both the input tracking response and the load regulating response with faster and smoother than the PID controller designed by the TLBO.

Keywords: PID Controller; EV Speed Control System; Whale Optimization Algorithm; Metaheuristic Optimization Technique; Modern Optimization

บทนำ

ในปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้า (electric vehicle: EV) ได้รับความนิยมน้อยกว่าหลายและเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากยานยนต์สันดาป (combustion vehicle) ที่ใช้น้ำมันหรือเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) ได้ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศอย่างมหาศาล ไม่ว่าจะเป็นควันพิษและเสียงรบกวนซึ่งถือเป็นแหล่งทำลายสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ [1] ส่วนประกอบหลักในยานยนต์ไฟฟ้า ได้แก่ มอเตอร์ ตัวควบคุม เซ็นเซอร์ แบตเตอรี่และระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) [2] ระบบจัดการแบตเตอรี่ BMS มีบทบาทสำคัญในการจัดการแบตเตอรี่ ระดับอุณหภูมิของแบตเตอรี่ และตรวจสอบสถานะการชาร์จและการคายประจุของแบตเตอรี่ ภายในระบบรวมของยานยนต์ไฟฟ้าจะอาศัยพลังงานจากระบบกักเก็บแบตเตอรี่ (Battery Storage System: BSS) [3] แบตเตอรี่จะเป็นแหล่งพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งจะถูกชาร์จพลังงานจากแหล่งพลังงาน ผ่านกลไกของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าอาจเป็นมอเตอร์ AC มอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor: BLDC) หรือมอเตอร์ DC แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet DC Motor) โดยมีหน้าที่หลักในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า [4] โดยทั่วไประบบควบคุมในยานยนต์ไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ระบบควบคุมแบตเตอรี่และระบบควบคุมมอเตอร์ ระบบควบคุมแบตเตอรี่จะถูกใช้เพื่อควบคุมให้แบตเตอรี่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและส่งพลังงานจากแบตเตอรี่ไปยังเซ็นเซอร์และมอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม ส่วนระบบควบคุมมอเตอร์จะทำหน้าที่รักษาระดับแรงบิดและความเร็วให้มีค่าเหมาะสม ตามสถานการณ์การขับขี่อย่างต่อเนื่อง [5]

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ในยานยนต์ไฟฟ้าอาศัยระบบควบคุมวงปิด (closed loop control system) ที่ใช้ตัวควบคุม PID (Proportional Integral Derivative Controller) [6, 7] ตัวควบคุมฟัซซี่ (fuzzy controller) [8, 9] และตัวควบคุม FOPID (Fractional-Order PID Controller) [9, 10] อย่างไรก็ตาม การอนุวัติ (implementation) ตัวควบคุมฟัซซี่และตัวควบคุม FOPID ในปัจจุบันยังคงค่อนข้างประสบปัญหาเกี่ยวกับข้อจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์ สำหรับการอนุวัติตัวควบคุม

พีชชีแบบแอนะล็อกอาจจำเป็นต้องใช้วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (signal comparator) จำนวนเท่ากับจำนวนกฎพีชชีที่ออกแบบ และการอนุมัตตัวควบคุมพีชชีแบบดิจิทัลจำเป็นต้องอาศัยการเขียนโปรแกรมที่ซับซ้อนเพื่อการอนุมานกฎพีชชี (fuzzy rule inference) ในส่วนของตัวควบคุม FOPID การอนุมัตตัวควบคุม FOPID แบบแอนะล็อก จำเป็นต้องใช้วงจรแฟล็กแดนซ์ (fractance circuits) ในขณะที่การอนุมัตตัวควบคุม FOPID แบบดิจิทัล จำเป็นต้องอาศัยการเขียนโปรแกรมเพื่อการทำอนุพันธ์และปริพันธ์เชิงเศษส่วน ที่ต้องพึ่งพาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ที่ซับซ้อนบทความวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญกับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ในยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุม PID เป็นหลัก

การออกแบบตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสมจะอาศัยหลักการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่ โดยใช้เทคนิคการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบอภิศึกษาสำนึกเป็นตัวค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งในปี ค.ศ. 2016 ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฬ (Whale Optimization Algorithm: WOA) ได้รับการนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Mirjalili และ Lewis [11] เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization problems) ขั้นตอนวิธี WOA ได้รับการพัฒนาขึ้นจากพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬหลังค่อม (humpback whales) ด้วยเทคนิคการปล่อยฟองอากาศออกมาในรูปแบบเฉพาะ เป็นเกลียวฟองอากาศเพื่อต้อนให้ฝูงปลา (เหยื่อ) มารวมกลุ่มกัน วาฬหลังค่อมจะดำน้ำลงไปและเริ่มสร้างฟองอากาศในรูปเกลียวรอบตัวเหยื่อและค่อย ๆ ว่ายน้ำขึ้นไปบนผิวน้ำเพื่อกินเหยื่อ กลไกสำคัญของขั้นตอนวิธี WOA คือการค้นหาเหยื่อ (searching for prey) การล้อมเหยื่อ (encircling prey) และการโจมตีแบบฟองอากาศ (bubble-net attacking) ขั้นตอนวิธี WOA ได้รับการทดสอบสมรรถนะกับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดมาตรฐาน (benchmark optimization problems) และปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดทางวิศวกรรมโยธา (civil engineering optimization problems) เปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการค้นหาเชิงแรงโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm: GSA) วิธีวิวัฒนาการเชิงผลต่าง (Differential Evolution: DE) วิธีกลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ (Evolution Strategy: ES) และโปรแกรมเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Programming: EP) ซึ่งพบว่า ขั้นตอนวิธี WOA มีสมรรถนะการค้นหาค่าเฉลียวกว้าง (global solution) ที่เหนือกว่าขั้นตอนวิธี GSA, DE, ES, และ EP [11]

งานวิจัยเชิงสำรวจของ Rana และคณะ [12] และ Nadimi-Shahraki และคณะ [13] ได้รวบรวมและรายงานการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี WOA เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดจากบทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติบนฐานข้อมูล Springer, Elsevier, IEEE, IET, Taylor & Francis, Wiley และฐานข้อมูลอื่น ๆ พบว่า ขั้นตอนวิธี WOA ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดที่หลากหลาย เช่น ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดทางวิศวกรรมไฟฟ้า ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดทางวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดทางวิศวกรรมอากาศยาน และการหาค่าเหมาะที่สุดทางวิศวกรรมโครงสร้าง เป็นต้น ผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดของการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี WOA เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดดังกล่าวข้างต้นได้จากเอกสารอ้างอิง [12, 13]

ในบทความวิจัยนี้ ขั้นตอนวิธี WOA จะถูกประยุกต์เพื่อออกแบบตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้า และนำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอิงผู้สอน-ผู้เรียน (Teacher Learner Based Optimization: TLBO) [6] ทั้งนี้ เนื่องจากเป็นงานวิจัยหลักที่ใช้อ้างอิงในบทความนี้และได้มีการออกแบบตัวควบคุม PID สำหรับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยขั้นตอนวิธี TLBO ไว้เรียบร้อยแล้วลำดับถัดไปจะนำเสนอวิธีดำเนินการวิจัยผลการวิจัยอภิปรายและสรุปผลการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัย อันประกอบไปด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณา กรอบงานการออกแบบตัวควบคุม PID สำหรับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าและขั้นตอนวิธี WOA ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้าประกอบด้วยชุดแบตเตอรี่ ตัวควบคุมและมอเตอร์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับตัวยานยนต์ผ่านชุดส่งกำลัง ระบบพลวัตของยานยนต์ไฟฟ้าประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ระบบพลวัตของตัวยานยนต์และพลวัตของมอเตอร์ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับการปรับสมดุลของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อยานยนต์ในขณะกำลังวิ่ง แรงหลักจำนวน 4 แรง ได้แก่ แรงเสียดทานเนื่องจากการหมุน (rolling friction force: F_r) แรงลาก (dragging force: F_d) แรงป็นขึ้นเนิน (hill-climbing force: F_g) และแรงเนื่องจากความเร่ง (force of acceleration: F_a) ดังแสดงใน Figure 1 โดยอาศัยกฎของนิวตัน (Newton's law) แรงดึงรวม (overall traction force: F_t) ที่กระทำต่อยานยนต์แสดงดังสมการที่ (1) [9, 14] เมื่อ m คือมวลของยานยนต์ g คือความเร่งจากแรงโน้มถ่วง v คือความเร็วของยานยนต์ μ_r คือค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน (rolling resistance coefficient) ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (air density) A คือพื้นที่หน้าตัดส่วนหน้าของยานยนต์ C_d คือค่าสัมประสิทธิ์แรงลาก (dragging coefficient) และ φ คือมุมป็นขึ้นเนิน (hill-climbing angle)

$$F_t = F_r + F_d + F_g + F_a \tag{1}$$

เมื่อ

$$\left. \begin{aligned} F_r &= \mu_r mg \\ F_d &= 0.5 \rho A C_d v^2 \\ F_g &= mg \sin \varphi \\ F_a &= m (dv / dt) \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

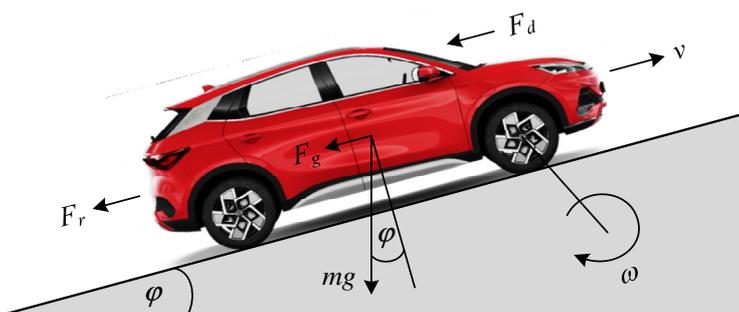


Figure 1 External forces acting on running EV.

แรงดึงรวม F_t จะสร้างแรงบิด T_L เพื่อขับมอเตอร์ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (3) เมื่อ r คือรัศมีของล้อ และ G คืออัตราทดเกียร์

$$T_L = F_t \times \frac{r}{G} \quad (3)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นของมอเตอร์ DC แสดงดังสมการที่ (4) [9, 14] เมื่อ i คือ กระแสอาร์เมเจอร์และกระแสฟิลด์ R_a คือค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ L_a คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ R_f คือค่าความต้านทานของขดลวดฟิลด์ L_f คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดฟิลด์ L_{af} คือค่าความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดอาร์เมเจอร์กับขดลวดฟิลด์ B คือค่าสัมประสิทธิ์ความฝืด J คือโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ T_L คือแรงบิดจากภายนอก ω คือความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ และ V คือแรงดันอินพุต

$$\left. \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{1}{(L_a + L_f)} [V - (R_a + R_f)i - L_{af}i\omega] \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} [L_{af}i^2 - B\omega - T_L] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ความเร็วของยานยนต์ v ซึ่งถูกพิจารณาเป็นตัวแปรเอาต์พุต จะสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ ω ดังแสดงในสมการที่ (5)

$$v = \omega \times \frac{r}{G} \quad (5)$$

เมื่อรวมพลวัตของตัวยานยนต์และพลวัตของมอเตอร์เข้าด้วยกัน ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานยนต์ไฟฟ้าในภาพรวม แสดงดังสมการที่ (6)

$$\left. \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{1}{(L_a + L_f)} [V - (R_a + R_f)i - L_{af}i\omega] \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{[J + m(r/G)^2]} [L_{af}i^2 - B\omega - \frac{r}{G}(\mu_r mg + 0.5\rho AC_d v^2 + mg \sin \phi)] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

สมการที่ (6) สามารถนำไปสร้างแบบจำลองตัวแปรสถานะ (state-variable model) ได้ดังสมการที่ (7) เมื่อ $X = [x_1 x_2]^T = [i \omega]^T$

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (7)$$

เมื่อ

$$\left. \begin{aligned}
 f(\mathbf{x}) &= \left[\begin{aligned}
 &-\left(\frac{R_a + R_f}{L_a + L_f}\right)x_1 - \left(\frac{L_{af}}{L_a + L_f}\right)x_1x_2 \\
 &\frac{1}{[J + m(r/g)^2]} [L_{af}x_1^2 - Bx_2 - \frac{r}{G}(\mu_r mg + \frac{1}{2}\rho AC_d \frac{r^2}{G^2}x_2^2 + mg \sin \varphi)]
 \end{aligned} \right] \\
 g(\mathbf{x}) &= \left[\begin{aligned}
 &\left(\frac{1}{L_a + L_f}\right) \\
 &0
 \end{aligned} \right], \quad h(\mathbf{x}) = x_2
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

แบบจำลองตัวแปรสถานะของยานยนต์ไฟฟ้าในสมการที่ (7)-(8) จะถูกทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) [14] เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function model) ดังแสดงในสมการที่ (9) [6, 14] ในส่วนของการทำให้เป็นเชิงเส้น จากสมการที่ (6) ซึ่งเป็นแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นจะพิจารณาให้ค่า i , v และ φ มีค่าน้อยๆ ดังนั้นเทอม $\sin \varphi \approx \varphi$ ส่วนเทอม i และ v ที่ยกกำลังสองจะประมาณให้เป็นศูนย์ [6, 14]

ในบทความวิจัยนี้ ค่าพารามิเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณา มีรายละเอียดดังแสดงใน Table 1 [9, 15] เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ทำให้แบบจำลองเชิงเส้นของยานยนต์ไฟฟ้าในรูปของแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอน แสดงดังสมการที่ (9) [6, 14] ซึ่งจะถูกเพื่อใช้เป็นพลานต์ (plant) สำหรับการออกแบบตัวควบคุม PID ด้วยขั้นตอนวิธี WOA ต่อไป

Table 1 EV Parameters

Symbols	Values	Symbols	Values
L_a+L_f	6.008 mH	m	800 kg
R_a+R_f	0.12 Ω	A	1.8 m ²
L_{af}	1.766 mH	ρ	1.25 kg/m ³
i	78 A (250 max)	C_d	0.3
V	0 ~ 48 V	μ_r	0.015
B	0.0002 N.M.s	φ	0 deg
J	0.05 kg-m ²	G	11
ω	25 km/h	r	0.25 m

$$G_p(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}{s^5 + b_4s^4 + b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0} \quad (9)$$

เมื่อ

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= 1.836 \times 10^{-5}, a_1 = 4.034 \times 10^{-4}, a_2 = 5.944 \times 10^{-3}, \\ a_3 &= 1.292 \times 10^{-2}, b_0 = 4.641 \times 10^{-5}, b_1 = 1.381 \times 10^{-3}, \\ b_2 &= 1.532 \times 10^{-2}, b_3 = 1.139 \times 10^{-1}, b_4 = 2.985 \times 10^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2. กรอบงานการออกแบบตัวควบคุม PID สำหรับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้า

ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าแสดงด้วยแผนภาพบล็อกใน Figure 2 เมื่อ $R(s)$ คือสัญญาณอินพุตอ้างอิง (referent input signal) $E(s)$ คือสัญญาณความคลาดเคลื่อน (error signal) $U(s)$ คือสัญญาณควบคุม (control signal) $D(s)$ คือสัญญาณรบกวนภายนอก (disturbance signal) และ $C(s)$ คือสัญญาณเอาต์พุต (output signal) จาก Figure 2 พลานต์ $G_p(s)$ คือแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนของยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ (9) ในขณะที่ $G_c(s)$ คือฟังก์ชันของตัวควบคุม PID ดังแสดงในสมการที่ (11) เมื่อ K_p คืออัตราขยายเชิงสัดส่วน (proportional gain) K_i คืออัตราขยายเชิงปริพันธ์ (integral gain) และ K_d คืออัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (derivative gain) ตัวควบคุม PID $G_c(s)$ จะรับสัญญาณความคลาดเคลื่อน $E(s)$ มาดำเนินการทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (11) เพื่อสร้างสัญญาณควบคุม $U(s)$ จากนั้นสัญญาณควบคุม $U(s)$ จะถูกส่งไปควบคุมพลานต์ $G_p(s)$ เพื่อให้ระบบผลิตสัญญาณเอาต์พุต $C(s)$ ให้เป็นไปตามสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ และกำจัดสัญญาณรบกวนภายนอก $D(s)$ ที่เข้ามารบกวนระบบ

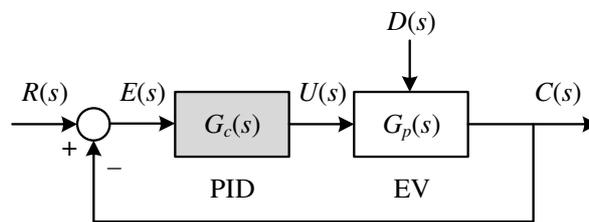


Figure 2 EV Speed Control System.

$$G_c(s)|_{PID} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (11)$$

กรอบงานการออกแบบตัวควบคุม PID สำหรับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธี WOA ตามหลักการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่ แสดงด้วยแผนภาพบล็อกใน Figure 3

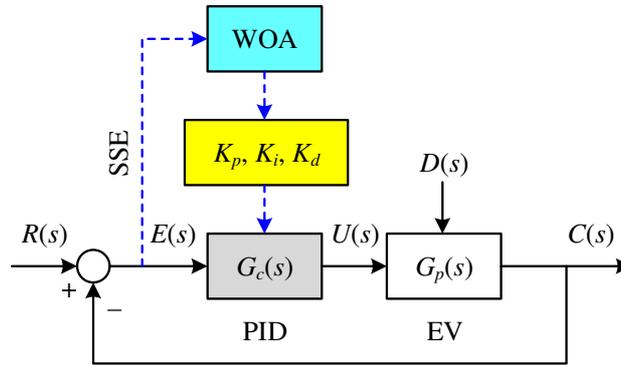


Figure 3 PID Controller Design Framework for EV Speed Control System using WOA.

การออกแบบตัวควบคุม PID คือการค้นหาค่า K_p , K_i , และ K_d ของตัวควบคุม PID ที่เหมาะสม เพื่อให้ระบบสามารถผลิตผลตอบสนองหรือสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ จาก Figure 3 ผลรวมของผลต่างยกกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน (sum-squared error: SSE) ระหว่างความเร็วอ้างอิง ω^* และความเร็วจริง ω ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) f ที่ต้องการทำให้มีค่าน้อยที่สุด (minimization) ดังแสดงในสมการที่ (12) ภายใต้ข้อกำหนดสมรรถนะในการออกแบบและปริภูมิ การค้นหา (search space) ที่กำหนดให้เป็นฟังก์ชันเงื่อนไข (constraint function) ดังแสดงในสมการที่ (13)

$$\text{Minimize } f(K_p, K_i, K_d) = \text{SSE} = \sum_{i=1}^N (\omega^* - \omega)^2 \quad (12)$$

$$\text{Subject to } \left. \begin{aligned} t_r &\leq t_{r_max}, \\ M_p &\leq M_{p_max}, \\ t_s &\leq t_{s_max}, \\ e_{ss} &\leq e_{ss_max}, \\ K_{p_min} &\leq K_p \leq K_{p_max}, \\ K_{i_min} &\leq K_i \leq K_{i_max}, \\ K_{d_min} &\leq K_d \leq K_{d_max} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

- เมื่อ t_r คือ ช่วงเวลาขึ้น (rise time)
 t_{r_max} คือ t_r สูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้
 M_p คือ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูงสุด (maximum percent overshoot)
 M_{p_max} คือ M_p สูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้
 t_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time)

- t_{s_max} คือ t_s สูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้
- e_{ss} คือ ความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (steady-state error)
- e_{ss_max} คือ e_{ss} สูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้
- $[K_{p_min}, K_{p_max}]$ คือ ปริภูมิการค้นหาของ K_p
- $[K_{i_min}, K_{i_max}]$ คือ ปริภูมิการค้นหาของ K_i
- $[K_{d_min}, K_{d_max}]$ คือ ปริภูมิการค้นหาของ K_d

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f ในสมการที่ (12) จะถูกส่งไปยังขั้นตอนวิธี WOA เพื่อให้มีค่าน้อยที่สุดด้วยการค้นหาค่า K_p , K_i , และ K_d ของตัวควบคุม PID ที่เหมาะสม ภายใต้ข้อกำหนดสมรรถนะในการออกแบบและปริภูมิการค้นหาที่กำหนดในฟังก์ชันเงื่อนไขตามสมการที่ (13)

3. ขั้นตอนวิธี WOA

ขั้นตอนวิธี WOA ได้รับการพัฒนาขึ้นจากการเลียนแบบพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬหลังค่อมที่อาศัยเทคนิคการปล่อยฟองอากาศออกมาในรูปแบบเฉพาะ เป็นเกลียวฟองอากาศเพื่อดันให้ฝูงปลา (เหยื่อ) มารวมกลุ่มกันดังแสดงใน Figure 4 กลไกสำคัญของขั้นตอนวิธี WOA คือกลไกการค้นหาเหยื่อ กลไกการล้อมเหยื่อ และกลไกการโจมตีแบบฟองอากาศ [11]

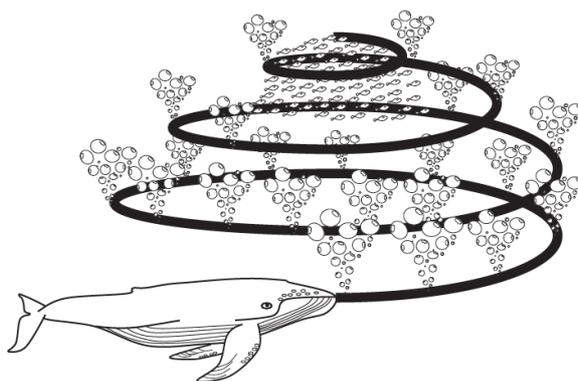


Figure 4 Spiral Bubble-Net Feeding Behavior of Humpback Whales [11].

กลไกการล้อมเหยื่อ (encircling prey mechanism) อาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในสมการที่ (14) - (15) เมื่อ t คือจำนวนรอบการค้นหา \vec{X}^* คือตำแหน่ง (ผลเฉลย) ที่ดีที่สุด \vec{X} คือตำแหน่ง (ผลเฉลย) ปัจจุบัน \vec{A} และ \vec{C} คือเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ a คือค่าสัมประสิทธิ์ที่ลดลงจาก $2 \rightarrow 0$ แบบเชิงเส้นตามจำนวนรอบการค้นหา t และ r_1, r_2 คือค่าสุ่ม (random) ที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป (uniform distribution) ในช่วง $[0, 1]$ เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ \vec{A} และ \vec{C} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16) และ (17) ตามลำดับ

$$\vec{D} = \vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \tag{14}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (15)$$

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (16)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (17)$$

กลไกการโจมตีแบบฟองอากาศ (bubble-net attacking mechanism) อาศัยกลไกที่แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือการบีบวงล้อม (shrinking encircling) และการปรับตำแหน่งแบบเกลียวกันหอย (spiral updating positions) ซึ่งวาฬหลังค่อมจะว่ายไปรอบๆเหยื่อเป็นวงเกลียวที่บีบตัวไปพร้อมๆกัน โดยกำหนดให้มีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 50%-50% ระหว่างการบีบวงล้อมและการปรับตำแหน่งแบบเกลียวกันหอย ดังแสดงในสมการที่ (18)

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p < 0.5 \text{ (shrinking encircling)} \\ \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \text{ (spiral updating pos.)} \end{cases} \quad (18)$$

เมื่อ $\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)|$ b คือค่าคงตัวที่กำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่รูปเกลียวและ l, p คือค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป ในช่วง $[0, 1]$ การโจมตีแบบฟองอากาศนี้เปรียบเสมือนคุณสมบัติความเข้มข้น (intensification property) ในการค้นหาผลเฉลยเฉพาะที่ (local solution) ของขั้นตอนวิธี WOA

กลไกการค้นหาเหยื่อ (searching for prey mechanism) อาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในสมการที่ (19) - (20)

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand}(t) - \vec{X}(t)| \quad (19)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (20)$$

เมื่อ $\vec{X}_{rand}(t)$ คือค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป ในช่วง $[0, 1]$ การค้นหาเหยื่อนี้เปรียบเสมือนคุณสมบัติความหลากหลาย (diversification property) ในการค้นหาผลเฉลยวงกว้าง (global solution) ของขั้นตอนวิธี WOA

ขั้นตอนวิธี WOA สามารถแสดงด้วยรหัสเทียม (pseudo code) ดัง Figure 5 ซึ่งสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนการค้นหาผลเฉลยได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่-0 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ และปริภูมิการค้นหา (search spaces) ของผลเฉลย x กำหนดจำนวนประชากรวาฬ $X_i, i = 1, 2, \dots, n$ จำนวน n ตัว ในฐานะตัวแทนการค้นหา (search agent) จากนั้นทำการประเมินตัวแทนการค้นหาแต่ละตัวผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ กำหนดให้ X^* คือตัวแทนการค้นหาที่ดีที่สุด (best search agent)

- กำหนดให้ $t = 1$ คือจำนวนรอบการค้นหาเริ่มต้นและกำหนดให้ Max_Iter คือจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด
- ขั้นตอนที่-1 ถ้า $t \leq Max_Iter$ ให้ดำเนินการค้นหาต่อไปในขั้นตอนที่-2 ไม่เช่นนั้นให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่-9
- ขั้นตอนที่-2 อาศัยกลไกการล้อยู่ตามสมการที่ (16) - (17) เพื่อปรับค่า a , A , และ C , สำหรับตัวแทนการค้นหาแต่ละตัว และสุ่มค่า l และ p ที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป ในช่วง $[0, 1]$
- ขั้นตอนที่-3 ถ้า $p < 0.5$ ให้ดำเนินการค้นหาต่อไปในขั้นตอนที่-4 ไม่เช่นนั้นให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่-7
- ขั้นตอนที่-4 ถ้า $|A| < 1$ ให้ดำเนินการค้นหาต่อไปในขั้นตอนที่-5 ไม่เช่นนั้นให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่-6
- ขั้นตอนที่-5 อาศัยกลไกการล้อยู่ตามสมการที่ (14) - (15) เพื่อปรับค่าตำแหน่ง (ผลเฉลย) ปัจจุบันของตัวแทนการค้นหาแต่ละตัว
- ขั้นตอนที่-6 ถ้า $|A| \geq 1$ เลือกตัวแทนการค้นหา X_{rand} แบบสุ่ม และอาศัยกลไกการค้นหาที่อยู่ตามสมการที่ (19) - (20) เพื่อปรับค่าตำแหน่ง (ผลเฉลย) ปัจจุบันของตัวแทนการค้นหาแต่ละตัว
- ขั้นตอนที่-7 ถ้า $p \geq 0.5$ อาศัยกลไกการโจมตีแบบฟองอากาศตามสมการที่ (18) เพื่อปรับค่าตำแหน่ง (ผลเฉลย) ปัจจุบันของตัวแทนการค้นหาแต่ละตัว
- ขั้นตอนที่-8 ตรวจสอบว่าถ้ามีตัวแทนการค้นหาออกนอกปริภูมิการค้นหา ให้ปรับตำแหน่งของตัวแทนการค้นหาหากกลับมาอยู่ภายในปริภูมิการค้นหาที่กำหนด จากนั้นทำการประเมินตัวแทนการค้นหาแต่ละตัวผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ ถ้ามีตัวแทนการค้นหาที่ดีกว่าให้ทำการปรับค่า X^* ปรับค่าจำนวนรอบการค้นหา $t = t + 1$ แล้วกลับไปยังขั้นตอนที่-1 เพื่อดำเนินการค้นหาในรอบต่อไป
- ขั้นตอนที่-9 รายงานผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (optimal solutions) X^* ที่ได้จากการค้นหา และหยุดการค้นหา

```

Initialize:
- Initialize the objective function  $f(x)$  and search spaces
- Initialize the whales population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
- Evaluate each search agent  $X_i$  via  $f(x)$ 
- Define  $X^*$  = the best search agent
- Define the initial iteration  $t = 1$ , and maximum number of iterations Max_Iter
while ( $t \leq \text{Max\_Iter}$ )
  for each search agent
    - Update  $a$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $l$ , and  $p$ 
    if1 ( $p < 0.5$ )
      if2 ( $|A| < 1$ )
        - Update the position of the current search agent by the Eq. (14)
      else if2 ( $|A| \geq 1$ )
        - Select a random search agent ( $X_{rand}$ )
        - Update the position of the current search agent by the Eq. (20)
      end if2
    else if1 ( $p \geq 0.5$ )
      - Update the position of the current search agent by the Eq. (18)
    end if1
  end for
  - Check if any search agent goes beyond the search space and amend it
  - Evaluate each search agent  $X_i$  via  $f(x)$ 
  - Update  $X^*$  if there is a better solution
  -  $t = t + 1$ 
end while
- Report the optimal solution  $X^*$ 

```

Figure 5 Pseudo code of WOA.

ผลการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการวิจัย อันประกอบด้วยผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าในกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอิงผู้สอน-ผู้เรียน (TLBO) และระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าในกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้า ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน ดังแสดงในสมการที่ (9) ทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB version 2017b (License No. #40637337) เมื่อกำหนดให้สัญญาณอินพุตอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (unit-step input signal) ปรากฏเข้ามาระดับระบบในวินาทีที่ 0 เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองแบบเฝ้าติดตามสัญญาณอินพุต (input tracking response) และสัญญาณรบกวนจากภายนอกคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (unit-step

disturbance signal) ปรากฏเข้ามากระทำกับระบบในวินาทีที่ 100 เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองแบบคุมค่าโหลด (load regulating response)

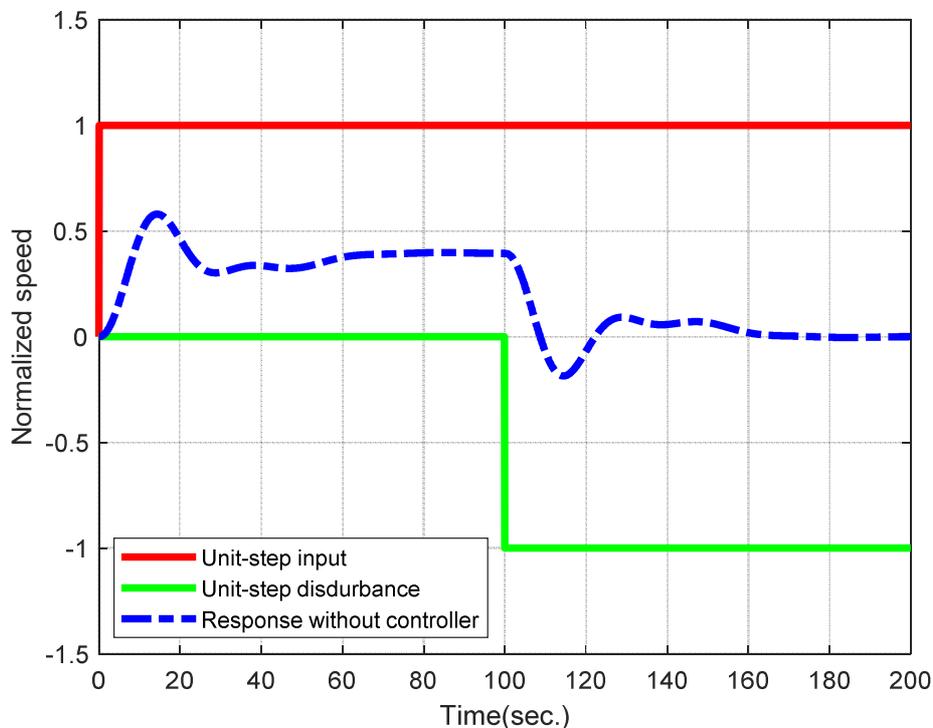


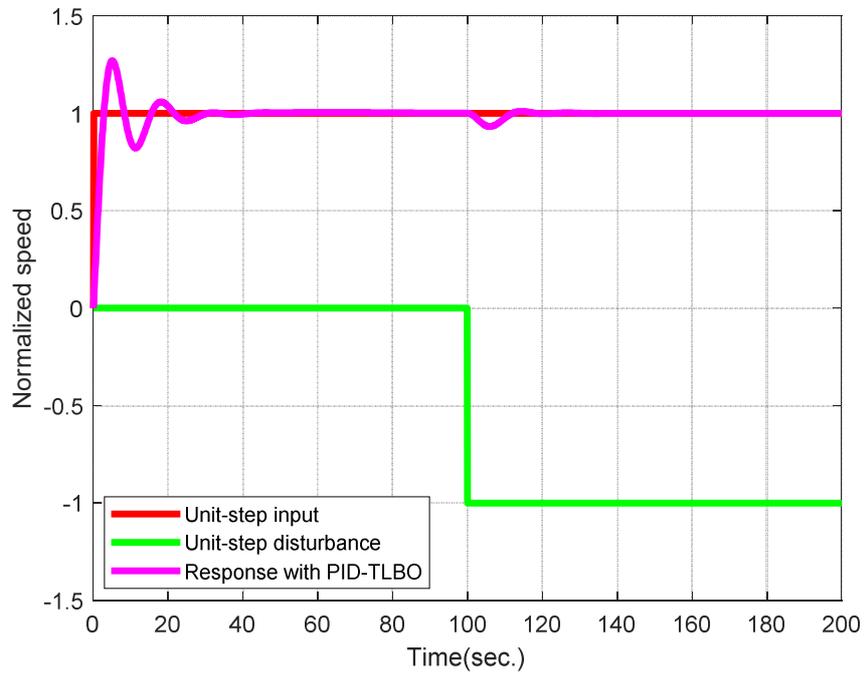
Figure 6 Step Response of EV Speed Control System without Controller.

ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณา ในขณะที่ยังไม่มีตัวควบคุมแสดงดัง Figure 6 ซึ่งพบว่าในส่วนของผลตอบสนองแบบเฝ้าติดตามสัญญาณอินพุต ระหว่างวินาทีที่ 0 - 100 ปรากฏ $t_r = 8.58$ วินาที $M_p = 47.21\%$ $t_s = 62.54$ วินาที และ $e_{ss} = 60.60\%$ ในขณะที่ผลตอบสนองแบบคุมค่าโหลดระหว่างวินาทีที่ 100 - 200 พบว่าระบบไม่สามารถคุมค่าโหลดได้

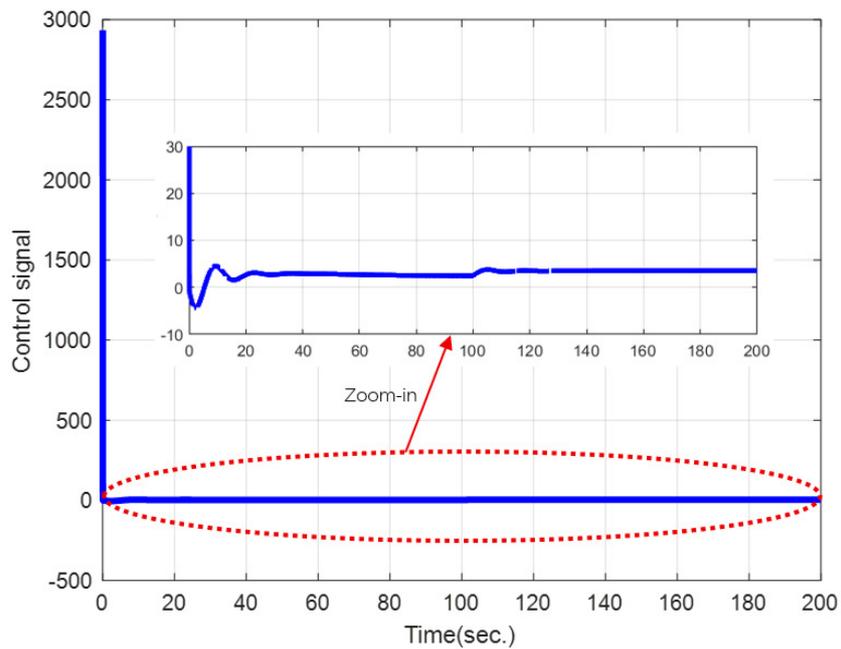
2. ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้า เมื่อใช้ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอิงผู้สอน-ผู้เรียน (TLBO)

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าตัวควบคุม PID สำหรับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าในสมการที่ (9) ได้รับการออกแบบด้วยวิธี TLBO ดังแสดงในสมการที่ (21) [6]

$$G_c(s)|_{PID_TLBO} = 10.78 + \frac{2.47}{s} + 29.23s \quad (21)$$



(a) Step response



(b) Control signal

Figure 7 Step Response of EV Speed Control System with PID Controller Designed by TLBO.

ทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB version 2017b (License No. #40637337) เมื่อกำหนดให้สัญญาณอินพุตอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ปรากฏเข้ามากระตุ้นระบบในวินาทีที่ 0 เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองแบบเฝ้าติดตามสัญญาณอินพุต และสัญญาณรบกวนจากภายนอกคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ปรากฏเข้ามากระทำกับระบบในวินาทีที่ 100 เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองแบบคุมค่าโหลด ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธี TLBO ในสมการที่ (21) แสดงดัง Figure 7(a) ซึ่งพบว่าในส่วนของผลตอบสนองแบบเฝ้าติดตามสัญญาณอินพุต ระหว่างวินาทีที่ 0 – 100 ปรากฏ $t_r = 2.82$ วินาที $M_p = 27.05\%$ $t_s = 27.83$ วินาที และ $e_{ss} = 0.00\%$ ในขณะที่ผลตอบสนองแบบคุมค่าโหลดระหว่างวินาทีที่ 100 – 200 พบว่าระบบสามารถคุมค่าโหลดได้โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูงสุดเนื่องจากการคุมค่าโหลด (maximum percent overshoot of load regulation) $M_{p_reg} = 6.78\%$ และช่วงเวลากการคุมค่า (regulating time) $t_{reg} = 10.31$ วินาที

สำหรับ Figure 7(b) แสดงสัญญาณควบคุม (control signal) $U(s)$ ของตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธี TLBO ในสมการที่ (21) ซึ่งพบว่าสัญญาณควบคุมมีขนาดค่อนข้างสูง และอาจส่งผลทำให้เกิดปัญหาในการอนุวัตตัวควบคุมเพื่อใช้ในงานจริง กล่าวคือถ้าทำการอนุวัตตัวควบคุม PID แบบแอนะล็อก โดยอาศัยวงจรรออปแอมป์ สัญญาณควบคุมที่มีขนาดสูงอาจเกิดการอิ่มตัว (saturation) อันเนื่องมาจากข้อจำกัด (limitation) เกี่ยวกับขนาดของไฟเลี้ยงวงจรรออปแอมป์ เมื่อสัญญาณควบคุมเกิดการอิ่มตัวจะไม่สามารถทำให้ระบบมีผลตอบสนองดังแสดงใน Figure 7(a) ได้ แนวทางการแก้ไขคืออาจต้องอาศัยการปรับลดสเกล (scaling down) สัญญาณควบคุมในตำแหน่งที่เหมาะสม แต่ยังคงโครงรูป (profile) ของสัญญาณควบคุมเอาไว้อย่างสมบูรณ์และทำการปรับเพิ่มสเกล (scaling up) สัญญาณควบคุมในตำแหน่งที่เหมาะสม แต่ยังคงโครงรูปของสัญญาณควบคุมเอาไว้อย่างสมบูรณ์ให้กลับคืนมา หรืออาจเปลี่ยนไปทำการอนุวัตตัวควบคุม PID แบบดิจิทัลร่วมกับการออกแบบใหม่ (re-design) เป็นต้น

3. ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA

ขั้นตอนวิธี WOA ได้รับการพัฒนาให้เป็นโปรแกรมการค้นหาด้วย MATLAB version 2017b (License No. #40637337) เพื่อประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i7-10510UCPU@2.3GHz, 80.GB-RAM ค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธี WOA ได้รับการทดสอบโดยการปรับจำนวนวาท $n = 5, 10, \dots, 50$ ซึ่งพบว่า $n = 30$ คือค่าที่เหมาะสมสำหรับปัญหานี้ กำหนดให้เกณฑ์ยุติการค้นหา (termination criteria: TC) คือจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด $Max_Iter = 100$ และดำเนินการค้นหาทั้งหมด 100 ครั้ง (trials) เพื่อค้นหาค่า K_p , K_i และ K_d ของตัวควบคุม PID ที่เหมาะสม อันจะส่งผลทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ (12) มีค่าน้อยที่สุดและสอดคล้องกับฟังก์ชันเงื่อนไข ดังแสดงในสมการที่ (22)

$$\text{Subject to } \left. \begin{array}{l} t_r \leq 5.00 \text{ sec.}, \\ M_p \leq 10.00\%, \\ t_s \leq 20.00 \text{ sec.}, \\ e_{ss} \leq 0.01\%, \\ 0 \leq K_p \leq 20, \\ 0 \leq K_i \leq 10, \\ 0 \leq K_d \leq 60 \end{array} \right\} \quad (22)$$

จากสมการที่ (22) ตัวเลขที่ปรากฏคือขอบเขตของปริภูมิการค้นหา ซึ่งโดยทั่วไปอาจกำหนดได้ 2 แนวทางดังนี้ แนวทางแรกคือกำหนดให้ปริภูมิการค้นหามีย่านกว้างๆ ที่ครอบคลุมผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งหมด แนวทางนี้ค่อนข้างสะดวกและเหมาะสำหรับปัญหาที่ไม่ทราบขอบเขตของผลเฉลย แต่ข้อเสียคือจะทำให้กระบวนการค้นหาใช้เวลาค่อนข้างยาวนาน แนวทางที่สองซึ่งเป็นที่มาของตัวเลขที่ปรากฏในสมการที่ (22) คือกำหนดให้ปริภูมิการค้นหามีย่านแคบ ๆ แนวทางนี้จะทำให้กระบวนการค้นหาผลเฉลยจะใช้เวลาค่อนข้างรวดเร็ว ซึ่งเหมาะสำหรับปัญหาที่ทราบขอบเขตของผลเฉลยโดยประมาณ อย่างไรก็ตามการค้นหาอาจถูกจำกัดด้วยขอบเขตที่กำหนดทั้งที่ยังไม่พบผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นเมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นจำเป็นจะต้องปรับย่านของปริภูมิการค้นหาเพื่อเป็นการเปิดพื้นที่ใหม่ที่ยังไม่ได้ถูกค้นหา

จากผลการค้นหาจำนวน 100 ครั้ง อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธี WOA แสดงดัง Figure 8 ซึ่งพบว่าแม้ผลเฉลยเริ่มต้นจะแตกต่างกันเนื่องจากกระบวนการสุ่ม แต่ขั้นตอนวิธี WOA สามารถค้นพบผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดในทุกครั้ง โดยขั้นตอนวิธี WOA จะใช้เวลาเฉลี่ยในการค้นหาผลเฉลยเท่ากับ 9.73 วินาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในการค้นหาผลเฉลยแต่ละครั้งอาจแตกต่างกันอยู่บ้าง ทั้งนี้ขึ้นกับการประมวลผลของหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ที่กำลังทำงานในขณะนั้น

ตัวควบคุม PID สำหรับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าในสมการที่ (9) ที่ได้รับการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA แสดงดังสมการที่ (23)

$$G_c(s)|_{PID_WOA} = 8.42 + \frac{2.85}{s} + 55.23s \quad (23)$$

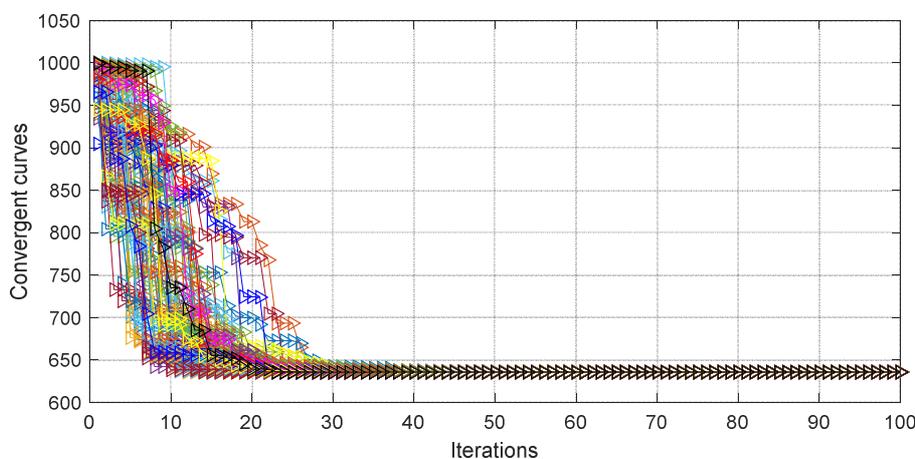
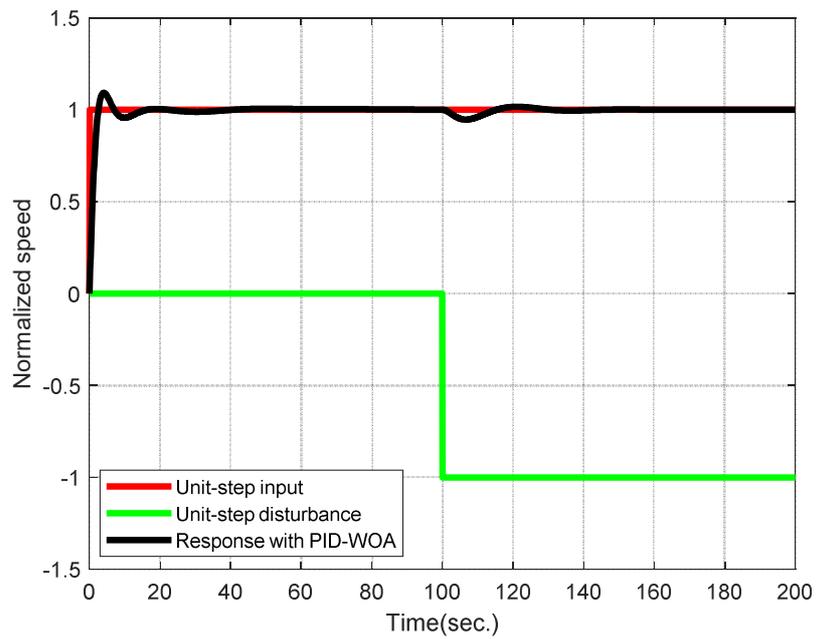


Figure 8 Convergent curves of WOA for PID controller design.

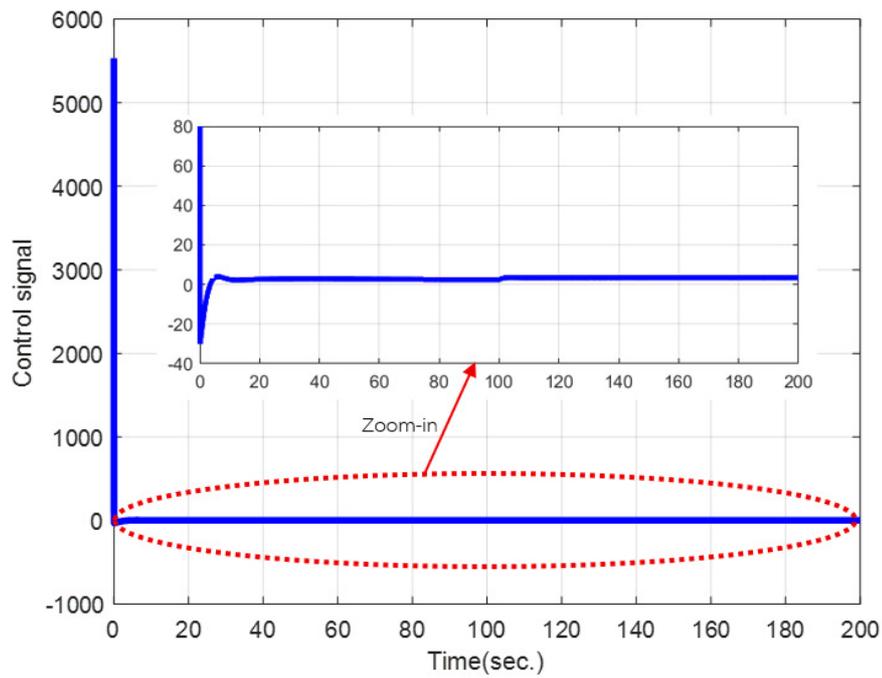
ทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB version 2017b (License No. #40637337) เมื่อกำหนดให้สัญญาณอินพุตอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ปรากฏเข้ามากระตุ้นระบบในวินาทีที่ 0 เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองแบบเฝ้าติดตามสัญญาณอินพุต และสัญญาณรบกวนจากภายนอกคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ปรากฏเข้ามากระทำกับระบบในวินาทีที่ 100 เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองแบบคุมค่าโหลด

ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้า เมื่อใช้ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA ในสมการที่ (23) แสดงดัง Figure 9(a) ซึ่งพบว่าในส่วนของผลตอบสนองแบบเฝ้าติดตามสัญญาณอินพุต ระหว่างวินาทีที่ 0 – 100 ปรากฏ $t_r = 2.52$ วินาที $M_p = 9.21\%$ $t_s = 13.27$ วินาทีและ $e_{ss} = 0.00\%$ ซึ่งสอดคล้องกับฟังก์ชันเงื่อนไขในสมการที่ (22) ในขณะที่ผลตอบสนองแบบคุมค่าโหดระหว่างวินาทีที่ 100 – 200 พบว่าระบบสามารถคุมค่าโหดได้โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูงสุดเนื่องจากการคุมค่าโหด $M_{p_reg} = 5.37\%$ และช่วงเวลาการคุมค่า $t_{reg} = 10.28$ วินาที

สำหรับ Figure 9(b) แสดงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธี WOA ในสมการที่ (23) ซึ่งพบว่าสัญญาณควบคุมมีขนาดค่อนข้างสูง และอาจส่งผลทำให้เกิดปัญหาในการอนุวัตตัวควบคุมเพื่อใช้ในงานจริง กล่าวคือถ้าหากทำการอนุวัตควบคุม PID แบบแอนะล็อกโดยอาศัยวงจรรอบแอมป์ สัญญาณควบคุมที่มีขนาดสูงอาจเกิดการอิมิตัว อันเนื่องมาจากข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดของไฟเลี้ยงวงจรรอบแอมป์ เมื่อสัญญาณควบคุมเกิดการอิมิตัว จะไม่สามารถทำให้ระบบมีผลตอบสนองดังแสดงใน Figure 9(a) ได้ แนวทางการแก้ไขคือ อาจต้องอาศัยการปรับสเกล (scaling) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว หรืออาจเปลี่ยนไปทำการอนุวัตควบคุม PID แบบดิจิทัล ร่วมกับการออกแบบใหม่ หรืออาจเพิ่มเงื่อนไขการออกแบบ ในฟังก์ชันเงื่อนไข ดังที่ปรากฏในสมการที่ (13) เพื่อจำกัดขอบเขตของสัญญาณควบคุมไม่ให้เกิดการอิมิตัว เช่น กำหนดให้ $u_{min} \leq u \leq u_{max}$ เมื่อ $[u_{min}, u_{max}]$ คือขอบเขตล่างและขอบเขตบนของสัญญาณควบคุม u ที่ กำหนดจากข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์ที่เลือกใช้



(a) Step Response



(b) Control Signal

Figure 9 Step response of EV speed control system with PID controller designed by WOA.

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยในหัวข้อที่ผ่านมา ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้า ในขณะที่ยังไม่มีตัวควบคุม ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธี TLBO และระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA ถูกนำเสนอเพื่อการเปรียบเทียบดังแสดงใน Figure 10 และ Table 2 ซึ่งพบว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าในขณะที่ยังไม่มีตัวควบคุมมีความล่าช้า ปรากฏการณ์สั่นไหว มีค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว และไม่สามารถคุมค่าโหดได้สำหรับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้า เมื่อใช้ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธี TLBO พบว่ามีผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าในขณะที่ยังไม่มีตัวควบคุม ระบบสามารถคุมค่าโหดได้อย่างน่าพึงพอใจ แต่ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินและการสั่นไหวค่อนข้างสูง และสำหรับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA พบว่ามีผลตอบสนองที่รวดเร็วและราบเรียบกว่า (มีการพุ่งเกินและการสั่นไหวที่น้อยกว่า) ระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธี TLBO และระบบสามารถคุมค่าโหดได้อย่างน่าพึงพอใจ

Table 2 Response Comparison of EV Speed Control System

Response Specifications	EV System without Controller	EV System With PID-TLBO	EV System With PID-WOA
t_r (sec.)	8.58	2.82	2.52
M_p (%)	47.21	27.05	9.21
t_s (sec.)	62.54	27.83	13.27
e_{ss} (%)	60.60	0.00	0.00
M_{p_reg} (%)	Unregulable	6.78	5.37
t_{reg} (sec.)	Unregulable	10.31	10.28

สำหรับสัญญาณควบคุมใน Figure 7(b) ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธี TLBO ในสมการที่ (21) อาจส่งผลทำให้เกิดปัญหาในการอนุวัตตัวควบคุมเพื่อใช้ในงานจริง แนวทางการแก้ไขคือ อาจใช้การปรับสเกลสัญญาณควบคุมในตำแหน่งที่เหมาะสม หรืออาจเปลี่ยนไปทำการอนุวัตควบคุม PID แบบดิจิทัล ร่วมกับการออกแบบใหม่ เป็นต้น ส่วนสัญญาณควบคุมใน Figure 9(b) ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธี WOA ในสมการที่ (23) อาจส่งผลทำให้เกิดปัญหาในการอนุวัตตัวควบคุมเพื่อใช้ในงานจริง แนวทางการแก้ไขคืออาจใช้การปรับสเกลหรือเปลี่ยนไปทำการอนุวัตควบคุม PID แบบดิจิทัลร่วมกับการออกแบบใหม่ หรืออาจเพิ่มเงื่อนไขการออกแบบในฟังก์ชันเงื่อนไขเพื่อจำกัดขอบเขตของสัญญาณควบคุมไม่ให้เกิดการอ้อมตัว โดยกำหนดขอบเขตตามข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์ที่เลือกใช้

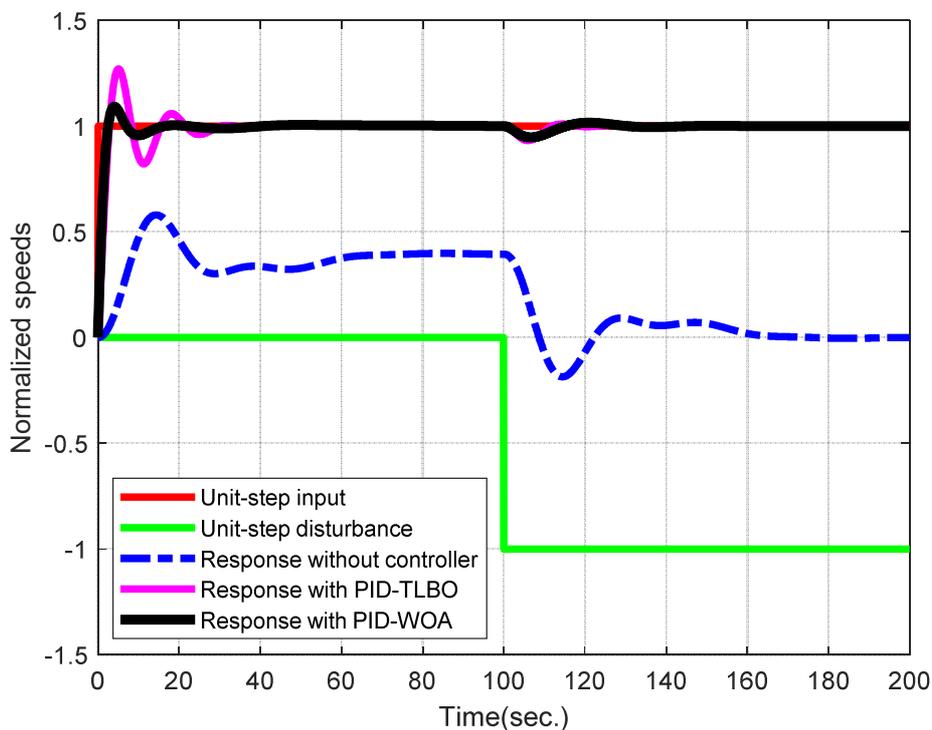


Figure 10 Step Responses of EV Speed Control System without Controller, with PID Controller Designed by TLBO, and with PID Controller Designed by WOA.

จากผลการเปรียบเทียบสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธี WOA สามารถออกแบบตัวควบคุม PID ให้กับระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม สอดคล้องกับเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดเป็นฟังก์ชันเงื่อนไขสำหรับการค้นหาตามหลักการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่ ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA สามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วยานยนต์ไฟฟ้า มีความรวดเร็วและราบเรียบกว่าตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยวิธี TLBO ทั้งในส่วนของผลตอบสนองแบบเฟ้าติดตามสัญญาณอินพุตและผลตอบสนองแบบคัมค่าไหลต แนวทางการดำเนินงานวิจัยในอนาคตคือการประยุกต์ขั้นตอนวิธี WOA เพื่อออกแบบตัวควบคุม PIDA และ FOPID สำหรับระบบควบคุมในงานจริง (real-world control system) ที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

References

- [1] De Rubens, G. Z., et al. (2020). The Market Case for Electric Mobility: Investigating Electric Vehicle Business Models for Mass Adoption. *Energy*, 194, 116841.
- [2] Habib, A. A., et al. (2023). Lithium-Ion Battery Management System for Electric Vehicles: Constraints, Challenges, and Recommendations. *Batteries*, 9(3), 152.

-
- [3] De Robbio, R., et al. (2022). Investigation by Modelling of a Plug-In Hybrid Electric Commercial Vehicle with Diesel Engine on WLTC. *Fuel*, 317, 123519.
- [4] Miri, I., et al. (2021). Electric Vehicle Energy Consumption Modelling and Estimation-A Case Study. *International Journal of Energy Research*, 45(1), 501–520.
- [5] Teng, F., et al. (2020). Technical Review on Advanced Approaches for Electric Vehicle Charging Demand Management, Part I: Applications in Electric Power Market and Renewable Energy Integration. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(5), 5684-5694.
- [6] Singh, R. et al. (2023). Optimal PID Controller Design for Electric Vehicle System. In *2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)* (p.1-6). 9 – 12 August, 2023, Bhubaneswar, India.
- [7] Jassim, A. A., et al. (2023). Design of Optimal PID Controller for Electric Vehicle Based on Particle Swarm and Multi-Verse Optimization algorithms, *Engineering and Technology Journal*, 41(2), 1-10.
- [8] Khatun, P., et al. (2003). Application of Fuzzy Control Algorithms for Electric Vehicle Antilock Braking/Traction Control Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 52(5), 1356-1364.
- [9] George, M. A., et al. (2021). Electronically Tunable ACO Based Fuzzy FOPID Controller for Effective Speed Control of Electric Vehicle. *IEEE Access*, 9, 73392-73412.
- [10] Kadhim, N. N., et al. (2023). Design An Optimal Fractional Order PID Controller for Speed Control of Electric Vehicle. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 56(5), 735-741.
- [11] Mirjalili, S. & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67.
- [12] Rana, N., et al. (2020). Whale Optimization Algorithm: a Systematic Review of Contemporary Applications, Modifications and Developments. *Neural Computing and Applications*, 32, 16245-16277.
- [13] Nadimi-Shahraki, M. H., et al. (2023). A Systematic Review of the Whale Optimization Algorithm: Theoretical Foundation, Improvements, and Hybridizations. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30, 4113-4159.
- [14] Meena, V., (2024). Rank Exponent-Based Reduction of Higher Order Electric Vehicle Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(9), 12438-12447.
- [15] Sharma, V. & Purwar, S. (2014). Non-Linear Controllers for a Light-Weighted All-Electric Vehicle using Chebyshev Neural Network. *International Journal of Vehicular Technology*, 2014, 867209.