



## วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

### การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วย วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

#### Dynamic model identification of BLDC motor using artificial intelligence techniques

รัฐพล โพธิ์สังข์<sup>1</sup> จักรกริช ภัคดีโต<sup>2</sup> ศรุต หวานสูงเนิน<sup>1</sup> กองพัน อารีรักษ์<sup>1\*</sup> กองพล อารีรักษ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

<sup>2</sup> ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10800

Ratapon Phosung<sup>1</sup> Jakkrit Pakdeeto<sup>2</sup> Saruta Wansungnoen<sup>1</sup> Kongpan Areerak<sup>1\*</sup> Kongpol Areerak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

<sup>2</sup> Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB, Bangkok 10800

\* Corresponding author.

E-mail: kongpan@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4520

วันที่รับบทความ 23 มีนาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 4 กรกฎาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ 9 สิงหาคม 2565

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีชุดบอร์ดขับเคลื่อน โดยทั่วไปมอเตอร์ดังกล่าวจะถูกควบคุมการทำงานเพื่อให้สามารถใช้งานในระดับความเร็วรอบที่ต้องการได้ แบบจำลองที่มีความถูกต้องเพื่อใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมจึงมีความสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบแม่นยำของระบบดังกล่าวมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก บทความนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองกล่องดำเพื่ออธิบายผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีชุดขับเคลื่อน แบบจำลองดังกล่าวจำเป็นต้องระบุค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนั้นบทความนี้จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองกล่องดำที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน วิธีการที่นำเสนอในบทความนี้ได้แก่ การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม (GA) การค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) และการค้นหาแบบตาปูเชิงปรับตัว (ATS) ซึ่งจะทำให้การค้นหาจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าน้อยที่สุด ผลการระบุเอกลักษณ์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการค้นหาทั้ง 3 วิธีสามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้ถูกต้องแม่นยำ การยืนยันสมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านในห้องปฏิบัติการ เพื่อแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองมีความสอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว

#### คำสำคัญ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน แบบจำลองกล่องดำ การระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลอง การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม (GA) การค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) การค้นหาแบบตาปูเชิงปรับตัว (ATS)

#### Abstract

This paper presents the model of brushless direct current motor including the commercial driver board. Generally, the motor speed is controlled by setting the desired conditions. The accurate model for the controller design is very important. However, the exact mathematical model is very complicated. As a result, this paper presents the black-box model to explain the response of the brushless direct current motor driven by the commercial driver board. The identification of the proposed model is necessary to search the transfer function coefficients. Therefore, this paper presents the artificial intelligence techniques to identify the black-box model represented by the transfer function. The

proposed genetic algorithm (GA), particle swarm optimization (PSO) and adaptive tabu search (ATS) will tune the unknown parameters until the minimum fitness value is obtained. It can be found that the proposed methods can provide the accurate dynamic model. The performance of the presented methodology is verified by the comparison results of the speed responses from the proposed model and experimentation. The results can show that the proposed technique can provide the accurate model useful for the controller design.

### Keywords

brushless direct current motor; black-box model; model identification; genetic algorithm (GA) method; particle swarm optimization (PSO) method; adaptive tabu search (ATS) method

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (brushless direct current motor: BLDC) เป็นที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลาย อาทิเช่น อากาศยาน ยานยนต์ รถไฟฟ้า เรือดำน้ำ คอมพิวเตอร์ การแพทย์ และระบบควบคุมอัตโนมัติในสายการผลิตของภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น [1,2] เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อัตราส่วนระหว่างแรงบิดต่อขนาดพิกัดกำลังที่ค่อนข้างสูง มีประสิทธิภาพสูง การดูแลบำรุงรักษาที่ต่ำ อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานยาวนาน [3,4] โดยส่วนใหญ่การใช้งานมอเตอร์ดังกล่าว มักจะมีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อให้สามารถใช้งานในความเร็วยุทธที่ต้องการได้ ดังนั้นการออกแบบและการวิเคราะห์ระบบควบคุมความเร็วรอบจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานและพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ จากการศึกษางานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการนำเสนอแนวทางการหาแบบจำลองของมอเตอร์ BLDC ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทางคือ แนวทางที่ 1 การพิสูจน์หาแบบจำลองด้วยทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน [1,5,6] เป็นแนวทางที่อาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ตั้งอยู่บนหลักฟิสิกส์พื้นฐาน แบบจำลองที่ได้จะสามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ปรากฏในแบบจำลองสามารถอธิบายความหมายทางฟิสิกส์ของระบบได้ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม แนวทางดังกล่าวเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ BLDC ที่มีชุดบอร์ดขับเคลื่อนจะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการพิสูจน์หาแบบจำลองเป็นอย่างมาก ดังนั้นในบทความนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาแนวทางที่ 2 คือ การสร้างแบบจำลองกล่องดำ (black-box model) ที่มีการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง (model identification) [7] โดยอาศัย

วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตที่สนใจโดยอาศัยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ได้จากการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ปรากฏในแบบจำลองไม่สามารถอธิบายความหมายทางฟิสิกส์ แต่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของระบบพลวัตได้อย่างถูกต้อง สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ BLDC ที่พิจารณาในบทความนี้จะกำหนดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม [7] เนื่องจากแบบจำลองโดยทั่วไปของมอเตอร์ BLDC จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับชุดบอร์ดขับเคลื่อนแบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม ซึ่งสามารถระบุค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่นำมาเป็นแบบจำลองได้ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ วิธีการดังกล่าวได้รับความนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมเป็นอย่างมาก ไม่เพียงแต่การระบุเอกลักษณ์เท่านั้น แต่ยังสามารถนำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมได้เช่นกัน วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มีมากมายดังตัวอย่างต่อไปนี้ วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm: GA) [8,9] วิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) [10,11] วิธีการค้นหาแบบตาปูเชิงปรับตัว (ATS) [12-14] และวิธีการผสมเกสรดอกไม้ (flower pollination algorithm: FPA) [15] เป็นต้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จากงานวิจัยในอดีตมีดังนี้ การออกแบบวงจรกรองกำลังแบบแอคทีฟด้วยวิธี ATS [16] และวิธี GA [17] การประยุกต์ใช้วิธี PSO เพื่อหาค่าตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดแบบแยกกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ [18] การออกแบบสายอากาศแถวลำดับด้วยอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งเทียม (artificial bee colony:

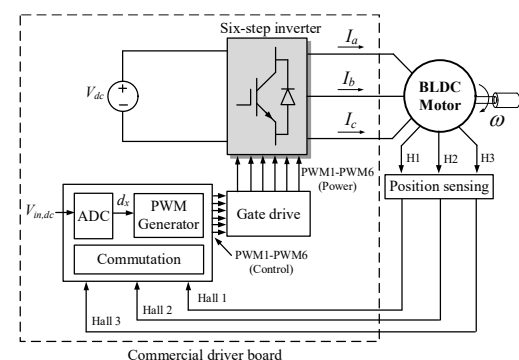
ABC) [19] การประยุกต์ใช้วิธีอาณานิคมมด (ant colony optimization: ACO) เพื่อแก้ปัญหาการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด [20] เป็นต้น สำหรับบทความนี้ได้เลือกวิธี GA PSO และ ATS มาประยุกต์ใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ BLDC เนื่องจากวิธีการทั้ง 3 ได้รับการพิสูจน์ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์แล้วว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบของปัญหา (convergence) [21–23] จากผลการระบุเอกลักษณ์ที่ได้ พร้อมทั้งการยืนยันด้วยผลการทดสอบของมอเตอร์ BLDC ในห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้สามารถสร้างแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ต่อยอดและพัฒนาเพื่อการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC ต่อไปในอนาคต

บทความนี้ประกอบไปด้วย 6 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอระบบที่พิจารณา และส่วนที่ 3 จะกล่าวถึงแบบจำลองของระบบที่พิจารณา รวมถึงชุดทดสอบที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์ หลักการค้นหาวงจร GA PSO และ ATS จะได้รับการนำเสนอในส่วนที่ 4 สำหรับส่วนที่ 5 เป็นการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ พร้อมทั้งดำเนินการตรวจสอบความถูกต้อง ในลำดับสุดท้าย ส่วนที่ 6 เป็นการสรุปข้อดีของวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้

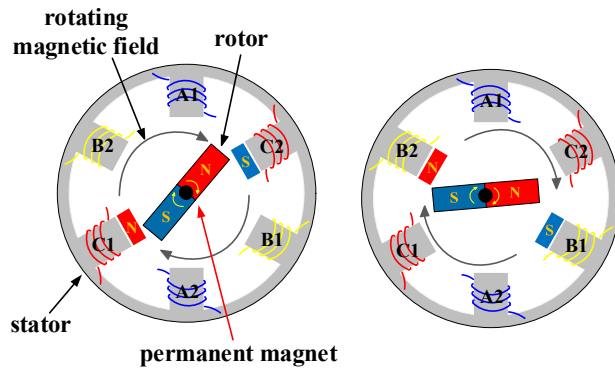
## 2. ระบบที่พิจารณา

ระบบที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 1 จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ มอเตอร์ BLDC และชุดบอร์ดขับเคลื่อน ในส่วนของมอเตอร์ BLDC เป็นมอเตอร์ที่พัฒนามาจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน โดยใช้กระบวนการคอมมิวเตชันแบบอิเล็กทรอนิกส์ ในการควบคุมการไหลของกระแสในขดลวดแทนการคอมมิวเตชันทางกลเพื่อลดปัญหาการเสียดสีทำให้เกิดความร้อน การสึกหรอ และการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [24,25] การขับเคลื่อนมอเตอร์จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กเช่นเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับซิงโครนัส ดังแสดงในรูปที่ 2 [26] ซึ่งจะใช้ขดลวดสเตเตอร์ 2 ชุดในการทำงานต่อครั้งเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กสลับเปลี่ยนกัน การทำงานจะเริ่มเมื่อ

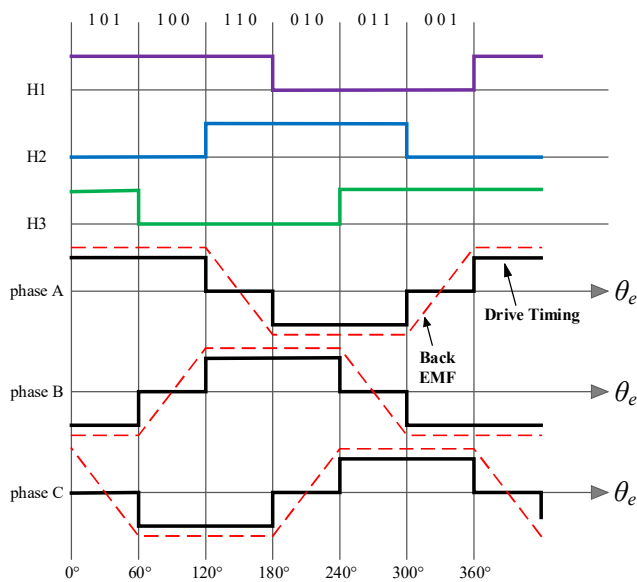
กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์ชุดที่ 1 ในจำนวน 3 ชุด และสร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อดึงดูดขั้วแม่เหล็กถาวรขั้วตรงข้ามของโรเตอร์ส่งผลทำให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ เมื่อกระแสเลื่อนไปที่ชุดขดลวดที่อยู่ถัดไปอย่างต่อเนื่องจะเกิดลำดับการเปลี่ยนแปลงแต่ละชุดทำให้โรเตอร์ติดตามการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุน โดยตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์จะถูกตรวจจับสัญญาณด้วยตัวตรวจจับฮอลล์ทั้ง 3 ตัว ( $H_1$ ,  $H_2$  และ  $H_3$ ) ที่อยู่บริเวณสเตเตอร์ เพื่อนำไปสร้างชุดตัวเลขสามหลักที่มีการเปลี่ยนแปลงทุก ๆ 60 องศา นอกจากนี้สัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการกำหนดจังหวะเวลาการขับ (drive timing) ของสวิตช์ IGBT และขณะมอเตอร์หมุนจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back electromotive forces) อีกด้วย โดยรูปสัญญาณจากตัวตรวจจับฮอลล์ จังหวะเวลาการขับ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ แสดงได้ในรูปที่ 3 สำหรับชุดบอร์ดขับเคลื่อนจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ BLDC ผ่านการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีอุปกรณ์สวิตช์ IGBT 6 ตัว เนื่องจากหลักการทำงานของมอเตอร์ BLDC จะมีลักษณะคล้ายกับมอเตอร์ซิงโครนัสสามเฟส อุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าวจะถูกขับด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM1-PWM6) ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM Generator) และวงจรขับเกท (gate drive) โดยที่อินพุตของวงจร PWM Generator เป็นสัญญาณควบคุมความเร็วรอบ ( $d_x$ ) ซึ่งจะถูกรับเปลี่ยนแปลงตามแรงดันแอนะล็อก ( $V_{in,dc}$ ) ที่ป้อนให้กับชุดบอร์ดขับเคลื่อน ดังนั้นชุดขับเคลื่อนจึงมีพฤติกรรมเป็นระบบควบคุมความเร็วรอบแบบวงเปิดสำหรับมอเตอร์ BLDC เนื่องจากสัญญาณ  $d_x$  ไม่ได้ถูกปรับจากตัวควบคุมโดยตรง



รูปที่ 1 ไดอะแกรมชุดบอร์ดขับเคลื่อนที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ BLDC



รูปที่ 2 หลักการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 3 สัญญาณการคอมมิวเตชัน

### 3. แบบจำลองและชุดทดสอบของระบบที่พิจารณา

#### 3.1 แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC

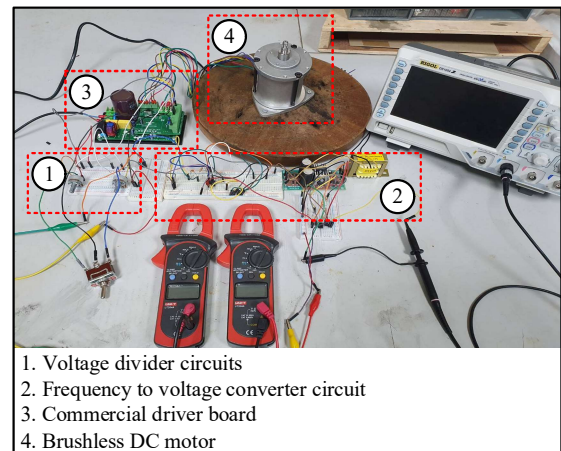
แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC รวมทั้งชุดขับเคลื่อนในบทความนี้เป็นแบบจำลองกล่องดำที่แทนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสามเนื่องจากแบบจำลองโดยทั่วไปของมอเตอร์ BLDC จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองและชุดบอร์ดขับเคลื่อนสามารถประมาณได้โดยใช้แบบจำลองอันดับหนึ่ง [7] ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างการแปลงลาปลาซของความถี่รอบ ( $\omega$ ) ต่อการแปลงลาปลาซของแรงดันอินพุต  $V_{in,dc}$  ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V_{in,dc}(s)} = \frac{a_0}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) จะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ปรากฏภายในแบบจำลอง ( $a_0$ ,  $b_3$ ,  $b_2$ ,  $b_1$  และ  $b_0$ ) จะไม่สามารถอธิบายความหมายทางกายภาพของระบบได้ ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5 ต่อไป

#### 3.2 ชุดทดสอบของมอเตอร์ BLDC

ชุดทดสอบของมอเตอร์ BLDC แสดงได้ดังในรูปที่ 4 จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักทั้งหมด 5 ชุดคือ วงจรแบ่งแรงดัน วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน ชุดบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ และมอเตอร์ BLDC ของบริษัท Beijing Eletechnic ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลต่าง ๆ ของชุดบอร์ดขับเคลื่อนและมอเตอร์ได้ดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ชุดทดสอบของระบบที่พิจารณา

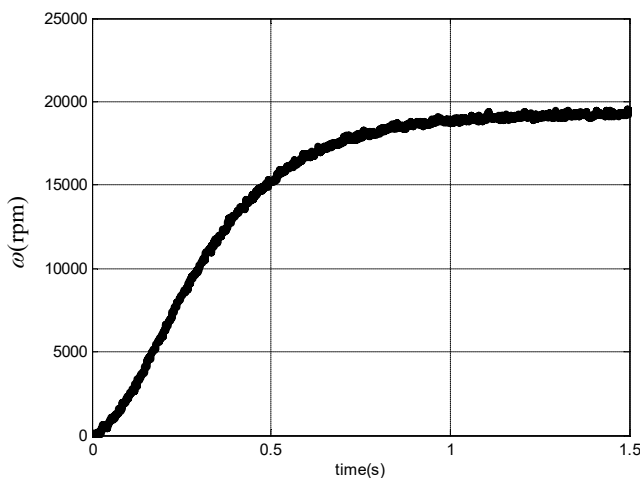
ตารางที่ 1 ข้อมูลของชุดบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์

|                                               |                            |
|-----------------------------------------------|----------------------------|
| แรงดันแหล่งจ่าย                               | 275 V <sub>rms</sub> (AC)/ |
|                                               | 390 V <sub>max</sub> (DC)  |
| กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดสามเฟส                | 9.3 A (Peak)               |
| ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่สามารถควบคุมได้สูงสุด | 50000 rpm                  |
| แรงดันอ้างอิงของฮอลล์เซ็นเซอร์                | 5 V <sub>DC</sub>          |

ตารางที่ 2 ข้อมูลของมอเตอร์ BLDC

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด    | 471 W     |
| แรงดันไฟฟ้าของระบบ          | 220 V     |
| ความเร็วพิกัดของมอเตอร์     | 23000 rpm |
| ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ | 4 poles   |

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ความเร็วพิกัดของมอเตอร์ BLDC จะมีค่าเท่ากับ 23000 rpm หากดำเนินการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าพิกัดอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ภายในระบบได้ ดังนั้นการทดสอบมอเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลนำไปใช้ในกระบวนการระบุเอกลักษณ์จะทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำกว่าพิกัดของมอเตอร์ BLDC ( $\approx 20000$  rpm) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC

#### 4. หลักการค้นหาของวิธี GA PSO และ ATS

สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอหลักการค้นหาของวิธี GA PSO และ ATS ที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งจะสรุปเป็นขั้นตอนเพื่ออธิบายหลักการค้นหาไว้พอสังเขปดังนี้

##### 4.1 วิธี GA

วิธี GA เป็นอัลกอริทึมที่อาศัยแนวคิดการวิวัฒนาการทางสายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตเพื่อความอยู่รอดในระบบชีววิทยา โดยทำการจำลองอยู่บนคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการกระบวนการคำนวณค้นหาคำตอบของปัญหาที่ต้องการค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการค้นหาได้ดังนี้

**ขั้นที่ 1** กำหนดให้รุ่นประชากร ( *Generation* ) เป็นจำนวนรอบการค้นหาและ  $Generation_{max}$  เป็นจำนวนรุ่นประชากรสูงสุดของการค้นหา

**ขั้นที่ 2** สร้างประชากรเริ่มต้น (initial population) จำนวน  $m$  โครโมโซม โดยแต่ละโครโมโซมจะอยู่ในรูปของตัวแปรค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหา ดังแสดงได้ในสมการที่ 2

$$C_i = [a_{0,i} \quad b_{3,i} \quad b_{2,i} \quad b_{1,i} \quad b_{0,i}] ; i = 1, 2, 3 \dots m \quad (2)$$

โดยที่  $C_i$  คือ โครโมโซมตัวที่ 1 ถึง  $m$

**ขั้นที่ 3** ทำการประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ( $\varepsilon$ ) แล้วส่งค่ากลับให้ระบบการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

**ขั้นที่ 4** ทำการคัดเลือกโครโมโซมเพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ให้กับรุ่นประชากรถัดไป

**ขั้นที่ 5** นำต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ได้จากขั้นที่ 4 มาเข้ากระบวนการเพื่อให้ได้ประชากรลูกหลานที่ดีขึ้น พร้อมทั้งประเมินค่าความเหมาะสมด้วย  $\varepsilon$

**ขั้นที่ 6** แทนที่ประชากรรุ่นเดิมด้วยโครโมโซมประชากรลูกหลาน

**ขั้นที่ 7** ถ้า  $Generation > Generation_{max}$  ให้หยุดการค้นหา โดยโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุดจะเป็นคำตอบของระบบการค้นหา มิฉะนั้นแล้วให้กลับไปขั้นที่ 4 ใหม่

#### 4.2 วิธี PSO

วิธี PSO เป็นอัลกอริทึมการค้นหาเชิงประชากรโดยมีอนุภาคย่อย ๆ จำนวน  $n$  อนุภาค รวมกลุ่มกันเคลื่อนที่ไปในปริภูมิการค้นหา เพื่อค้นหาคำตอบที่ต้องการ โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคจะแปรเปลี่ยนไปตามข้อมูลการค้นหาที่ผ่านมาของอนุภาคนั้น ๆ และข้อมูลการค้นหาจากอนุภาคที่พบคำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่ม สำหรับขั้นตอนการค้นหาสามารถสรุปได้ดังนี้

**ขั้นที่ 1** กำหนดจำนวนรอบของการค้นหา ( *Iteration* ) และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา (  $Iteration_{max}$  )

**ขั้นที่ 2** ทำการสุ่มค่าเวกเตอร์ตำแหน่งและเวกเตอร์ความเร็ว โดยเวกเตอร์ดังกล่าวจะมีมิติเท่ากับจำนวนของตัวแปรที่ต้องการค้นหา ดังแสดงได้ในสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

$$\vec{P}_j = [a_{0,j} \quad b_{3,j} \quad b_{2,j} \quad b_{1,j} \quad b_{0,j}]^T ; j=1,2,3...n \quad (3)$$

$$\vec{V}_j = [v_{1,j} \quad v_{2,j} \quad v_{3,j} \quad v_{4,j}]^T ; j=1,2,3...n \quad (4)$$

โดยที่  $\vec{P}_j$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคตัวที่ 1 ถึง  $n$

$\vec{V}_j$  คือ เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคตัวที่ 1 ถึง  $n$

**ขั้นที่ 3** ทำการประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาคด้วย  $\varepsilon$  ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี

- กรณีที่ 1 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใดมีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาค หรือค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง ( $gbest$ ) ให้บันทึกค่าความเหมาะสมและเวกเตอร์ตำแหน่งด้วยการกำหนดให้  $gbest = f(\vec{P}_j)$  และ  $\vec{P}_{gbest} = \vec{P}_j$

- กรณีที่ 2 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใดมีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาคตัวเดียวกัน ( $pbest$ ) ที่เคยพบมาก่อน ให้บันทึกค่าความเหมาะสมและเวกเตอร์ตำแหน่งด้วยการกำหนดให้  $pbest = f(\vec{P}_j)$  และ  $\vec{P}_{pbest,j} = \vec{P}_j$

**ขั้นที่ 4** ทำการปรับค่าความเร็วของอนุภาคด้วยสมการที่ (5)

$$\vec{V}_i(new) = \vec{V}_i(old) + \rho_p (\vec{P}_{pbest,i} - \vec{P}_i(old)) + \rho_g (\vec{P}_{gbest,i} - \vec{P}_i(old)) \quad (5)$$

โดยที่  $C_p$  คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบเชิงปริมาตร

$C_g$  คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบทางสังคม

$\rho_p$  คือ ตัวประกอบแบบสุ่มขององค์ประกอบเชิงปริมาตร

$\rho_g$  คือ ตัวประกอบแบบสุ่มขององค์ประกอบทางสังคม

**ขั้นที่ 5** ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคสำหรับรอบการค้นหาต่อไปโดยใช้สมการที่ (6)

$$\vec{P}_j(new) = \vec{P}_j(old) + \vec{V}_j(new) \quad (6)$$

**ขั้นที่ 6** ถ้า  $Iteration > Iteration_{max}$  ให้หยุดการค้นหา โดยคำตอบที่ดีที่สุดแบบ  $gbest$  จะเป็นคำตอบของระบบการค้นหา มิฉะนั้นแล้วให้กลับไปขั้นที่ 3 ใหม่

#### 4.3 วิธี ATS

วิธี ATS เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบ โดยทำการเพิ่มกลไกการเดินย้อนรอยและการปรับลดค่ารัศมี เพื่อแก้ปัญหาค้างติดอยู่ในคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและเพิ่มสมรรถนะในการค้นหา [27] ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการค้นหาได้ดังนี้

**ขั้นที่ 1** กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา ( $radius$ ) จำนวนรอบของการค้นหา ( $Round$ ) และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา ( $Round_{max}$ )

**ขั้นที่ 2** ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น ( $S_0$ ) ภายใต้พื้นที่การค้นหา และให้  $S_0$  เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น

**ขั้นที่ 3** ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน  $N$  คำตอบรอบๆ  $S_0$  ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา  $R$  และกำหนดให้เซต  $S(R)$  เป็นเซตของคำตอบ  $N$  คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง โดยสมาชิกของเซต  $S(R)$  ที่นำเสนอในบทความนี้คือ พารามิเตอร์ที่จะทำการค้นหา ประกอบไปด้วย  $a_0 \quad b_3 \quad b_2 \quad b_1$  และ  $b_0$

**ขั้นที่ 4** ทำการประเมินคำตอบของแต่ละสมาชิกใน  $S(R)$  ด้วย  $\varepsilon$  โดยกำหนดให้  $S_1$  เป็นคำตอบที่ดีที่สุด ใน  $S(R)$

**ขั้นที่ 5** ถ้า  $S_1 < S_0$  จะกำหนดให้  $S_0 = S_1$  และเก็บค่า  $S_0$  ในรายการตาบ

**ขั้นที่ 6** ถ้า  $Round < Round_{max}$  จะหยุดกระบวนการค้นหา โดยที่ค่า  $S_0$  คือ คำตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3

ขั้นที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย่อนรอยเพื่อแก้ปัญหาจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นตามจำนวนคำตอบสูงสุดที่ตั้งค่าไว้ โดยอาศัยการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดจากพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตามูเพื่อกำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นในการค้นหารอบถัดไป

ขั้นที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ด้วยอัตราการปรับลดรัศมี  $DF$  ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (7)$$

## 5. การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC ด้วยวิธี GA PSO และ ATS

จากหัวข้อที่ผ่านได้อธิบายหลักการค้นหาของวิธี GA PSO และ ATS ไว้แล้ว ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำหลักการค้นหาของดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC โดยเนื้อหาที่สำคัญจะประกอบด้วยกระบวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง ผลการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง และการยืนยันผลการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งจะได้รับคำแนะนำในหัวข้อที่ 5.1-5.3 ตามลำดับ

### 5.1 กระบวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง

โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมสำหรับกระบวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองมอเตอร์ BLDC แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนในการระบุเอกลักษณ์ได้ดังต่อไปนี้

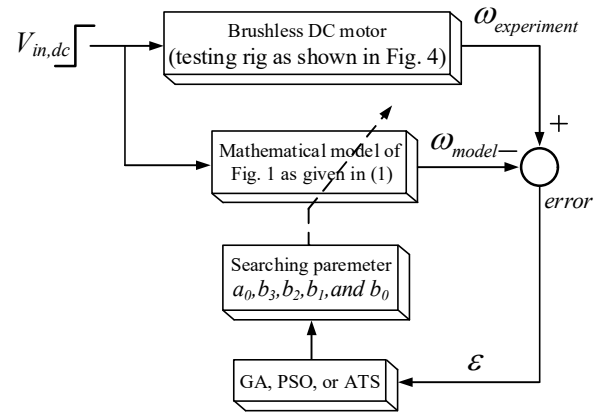
ขั้นที่ 1 ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต  $V_{in,dc}$  จาก 0 V (0 rpm) ไปเป็น 3.7 V ( $\approx 20000$  rpm)

ขั้นที่ 2 นำผลตอบสนองความเร็วรอบของชุดทดสอบ ( $\omega_{experiment}$ ) มาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองความเร็วรอบของแบบจำลอง ( $\omega_{model}$ ) ผ่านค่าความคลาดเคลื่อน ( $error$ ) เพื่อนำมาใช้คำนวณหาความผิดพลาดอาร์เอ็มเอส หรือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ( $\varepsilon$ ) ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum error^2}{n}} \quad (8)$$

โดยที่  $error$  คำนวณได้จาก  $|\omega_{experiment} - \omega_{model}|$

และ  $n$  คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง

ขั้นที่ 3 นำค่า  $\varepsilon$  ส่งให้วิธีการค้นหา GA PSO และ ATS ทำการค้นหาค่า  $a_0$   $b_3$   $b_2$   $b_1$  และ  $b_0$  จนกระทั่งได้ค่า  $\varepsilon$  ที่น้อยที่สุด โดยจะกำหนดให้ขอบเขตการค้นหา  $a_0$   $b_3$   $b_2$   $b_1$  และ  $b_0$  มีค่าเท่ากับ  $[0, 0.5 \times 10^3]$   $[0, 0.1]$   $[25, 35]$   $[340, 370]$  และ  $[1040, 1080]$  ตามลำดับ ทั้งนี้คำตอบที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีต่าง ๆ จะต้องมีความอยู่ระหว่างขอบเขตที่กำหนดไว้ ในกรณีที่คำตอบจากการระบุเอกลักษณ์มีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตบนหรือขอบเขตล่างจะต้องดำเนินการปรับเปลี่ยนขอบเขตของคำตอบ และทำการค้นหาใหม่จนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด

การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองมอเตอร์ BLDC จำเป็นต้องมีการทดสอบพารามิเตอร์ของวิธี GA PSO และ ATS เพื่อให้การค้นหามีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในบทความนี้ได้ดำเนินการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวโดยอาศัยเกณฑ์การพิจารณาจากค่า  $\varepsilon$  เฉลี่ยที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังนี้

วิธี GA ได้เลือกใช้ขนาดของประชากรเท่ากับ 50 โครโมโซม การคัดเลือกสายพันธุ์แบบพันธุกรรมแบบสุ่ม การค้นหา การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวที่ระดับค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.8 และการทำมิวเทชันแบบยูนิฟอร์มที่ระดับค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.04 โดยกำหนดให้จำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาเท่ากับ 120 รอบ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขยุติการค้นหา

วิธี PSO ในบทความนี้ได้เลือกใช้จำนวนอนุภาค ค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_p$  และค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_g$  เท่ากับ 30 0.75 และ 1.0 ตามลำดับ โดยกำหนดให้จำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาเท่ากับ 120 รอบ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขยุติการค้นหาเช่นเดียวกัน

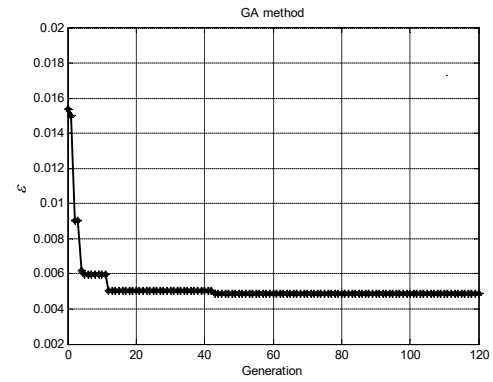
วิธี ATS ในบทความนี้ได้เลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีการค้นหา และอัตราปรับลดรัศมี เท่ากับ 150 250 30 และ 1.08 ตามลำดับ โดยกำหนดให้จำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาเท่ากับ 120 รอบ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขยุติการค้นหาเช่นเดียวกัน

เมื่อทราบถึงองค์ประกอบที่สำคัญทั้งหมดสำหรับการระบุเอกลักษณ์แล้ว การใช้วิธี GA PSO และ ATS ในการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองมอเตอร์ BLDC ซึ่งผลการระบุเอกลักษณ์ดังกล่าว จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2

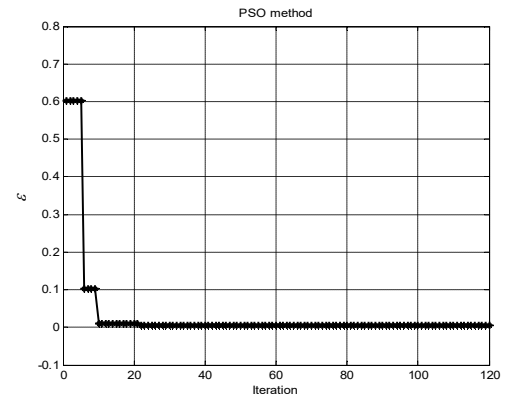
## 5.2 ผลการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง

การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองมอเตอร์ BLDC ผ่านการค้นหาค่า  $a_0$   $b_3$   $b_2$   $b_1$  และ  $b_0$  สำหรับในบทความนี้จะพิจารณาผลการเข้าสู่ของค่า  $\varepsilon$  ทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อนำมาใช้ในการเลือกค่า  $a_0$   $b_3$   $b_2$   $b_1$  และ  $b_0$  ที่เหมาะสมที่สุด ผ่านเงื่อนไขค่า  $\varepsilon$  ที่น้อยที่สุด อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการระบุเอกลักษณ์อีกด้วย สำหรับผลการค้นหาดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 ถึง 9 และตารางที่ 3

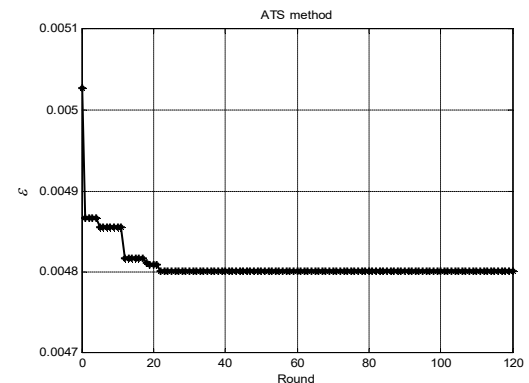
จากรูปที่ 7 ถึง 9 แสดงการเข้าสู่ของค่า  $\varepsilon$  ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 120 จะเห็นได้ว่าค่า  $\varepsilon$  มีค่าลดลงในแต่ละรอบการค้นหา ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าวิธี GA PSO และ ATS สามารถค้นหาค่า  $a_0$   $b_3$   $b_2$   $b_1$  และ  $b_0$  ที่ทำให้ผลตอบสนอง  $\omega_{experiment}$  และ  $\omega_{model}$  มีค่าใกล้เคียงกันได้



รูปที่ 7 การเข้าสู่หาค่าตอบ  $\varepsilon$  ที่เหมาะสมที่สุดของวิธี GA



รูปที่ 8 การเข้าสู่หาค่าตอบ  $\varepsilon$  ที่เหมาะสมที่สุดของวิธี PSO



รูปที่ 9 การเข้าสู่หาค่าตอบ  $\varepsilon$  ที่เหมาะสมที่สุดของวิธี ATS

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดและแบบจำลองของมอเตอร์ BLDC ที่ได้จากวิธี GA PSO และ ATS

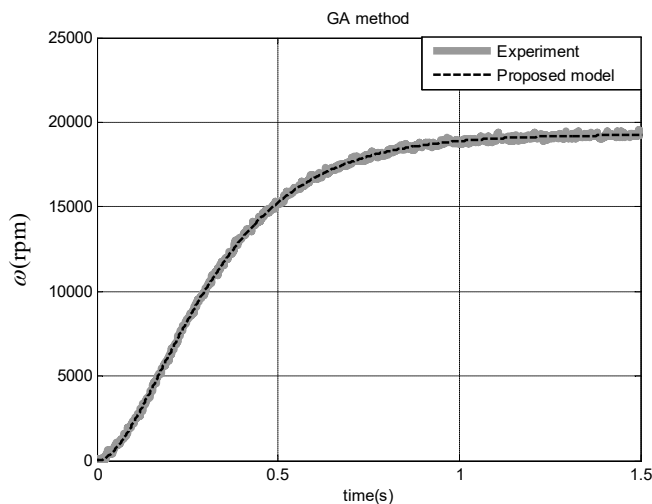
| วิธี | ค่าพารามิเตอร์       |        |         |          |           | เวลาเฉลี่ย<br>(วินาที) | $\varepsilon$ | แบบจำลอง                                                                    |
|------|----------------------|--------|---------|----------|-----------|------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|      | $a_0$                | $b_3$  | $b_2$   | $b_1$    | $b_0$     |                        |               |                                                                             |
| GA   | $0.2021 \times 10^8$ | 0.0799 | 30.6347 | 358.6502 | 1048.8231 | 181.1548               | 0.004851      | $\frac{0.2021 \times 10^8}{0.0799s^3 + 30.6347s^2 + 358.6502s + 1048.8231}$ |
| PSO  | $0.2041 \times 10^8$ | 0.0782 | 30.2992 | 361.8813 | 1060.5996 | 253.6682               | 0.004974      | $\frac{0.2041 \times 10^8}{0.0782s^3 + 30.2992s^2 + 361.8813s + 1060.5996}$ |
| ATS  | $0.2042 \times 10^8$ | 0.0551 | 30.995  | 361.4188 | 1061.2141 | 920.2222               | 0.004801      | $\frac{0.2042 \times 10^8}{0.0551s^3 + 30.995s^2 + 361.4188s + 1061.2141}$  |



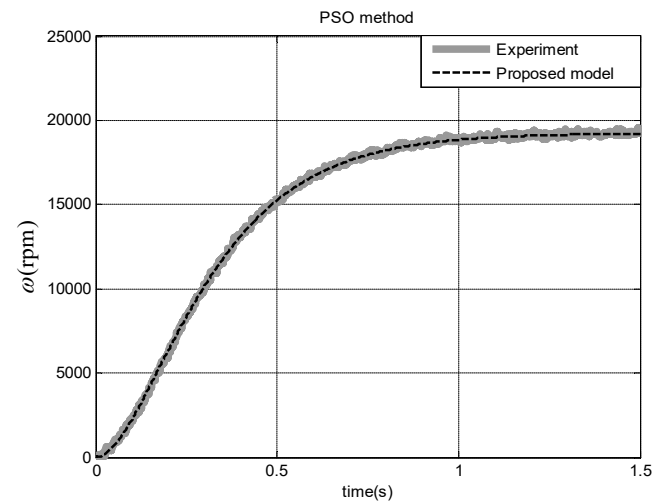
จากตารางที่ 3 จะพบว่า แบบจำลองที่ได้จากทั้ง 3 วิธี สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้ถูกต้อง โดยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $\varepsilon$  ที่ได้จากวิธี ATS มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธี GA และ PSO ตามลำดับ แต่ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาถึงค่าเวลาเฉลี่ยในกระบวนการระบุเอกลักษณ์ วิธี ATS จะใช้เวลาเฉลี่ยในการค้นหามากที่สุดเมื่อเทียบกับวิธี GA และ PSO ตามลำดับ การหาค่าเวลาเฉลี่ยจะอาศัยคำสั่งพื้นฐานในโปรแกรม MATLAB อย่างไรก็ดีตามคอมพิวเตอร์พกพาที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์สำหรับบทความนี้ใช้ซีพียูประมวลผล Intel Core i7-4500U ความถี่ 1.80 GHz แรมขนาด 8 Gb

### 5.3 การยืนยันผลการระบุเอกลักษณ์

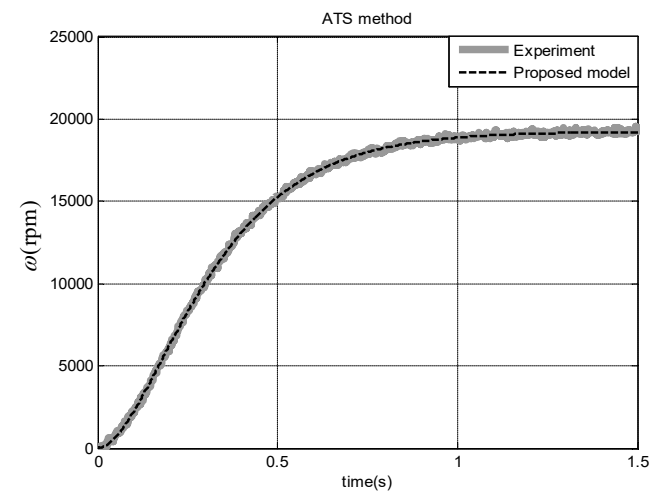
การตรวจสอบความถูกต้องของผลการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองด้วยวิธีการค้นหา GA PSO และ ATS จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลยจากแบบจำลองและผลการทดสอบจากมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็วรอบ 20000 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 ถึง 12



รูปที่ 10 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี GA



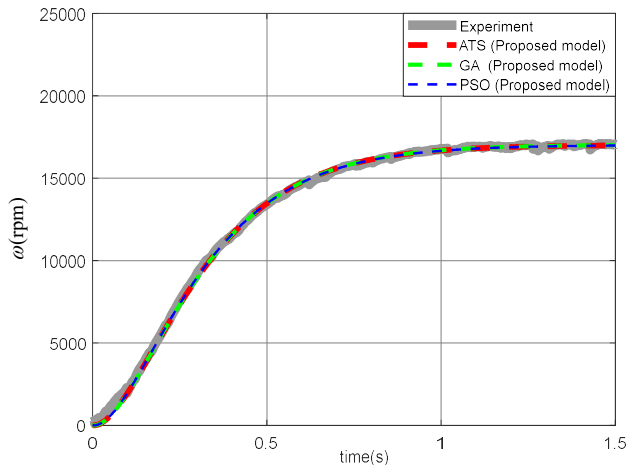
รูปที่ 11 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี PSO



รูปที่ 12 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี ATS

พิจารณาจากรูปที่ 10 ถึง 12 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของความเร็วรอบที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบจากมอเตอร์ BLDC มีลักษณะรูปสัญญาณที่สอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ยิ่งไปกว่านั้นแม้ว่าข้อมูลที่น่ามาใช้ในการยืนยันผลการตอบสนองในรูปที่ 13 ไม่ได้เป็นข้อมูลสำหรับการระบุเอกลักษณ์ แต่เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองก็ยังคงมีความถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองกล่องดำที่น่าเสนอในบทความนี้จากกระบวนการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี GA PSO และ ATS จึงเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้อง

เพื่อยืนยันผลจากการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้ การเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ความเร็วรอบ 17000 รอบต่อวินาที แสดงได้ดังรูปที่ 13 ซึ่งความเร็วรอบดังกล่าวไม่ใช่ชุดข้อมูลที่นำมาใช้ในการกระบวนการค้นหา



รูปที่ 13 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี ATS GA และ PSO ที่ความเร็วรอบ 17000 รอบต่อวินาที

## 6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC ที่เชื่อมต่อกับชุดขับเคลื่อนด้วยวิธี GA PSO และ ATS ผ่านการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม ผลการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองสามารถยืนยันได้จากการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบจากมอเตอร์ BLDC ในห้องปฏิบัติการ และแบบจำลองที่ได้จากวิธีการทั้ง 3 สามารถนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการนำเสนอในบทความนี้จึงเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC ต่อไปในอนาคต อย่างไรก็ตามการระบุเอกลักษณ์สามารถใช้วิธีการอื่น ๆ ได้เช่นเดียวกัน โดยอาศัยหลักการและแนวทางที่ได้กล่าวไว้ในบทความนี้

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (TSRI) กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและ

นวัตกรรม (NSRF) และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานเครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Patel VKS, Pandey AK. Modeling and simulation of brushless DC motor using PWM control technique. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2013; 3(3): 612–620.
- [2] Prasad KMA, Nair U. An intelligent fuzzy sliding mode controller for a BLDC motor. In: *Proceeding of International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications*. Bangalore, India: 2017. p. 274–278.
- [3] Rao APC, Obulesh YP, Babu CS. Mathematical modeling of BLDC motor with closed loop speed control using PID controller under various loading conditions. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012; 7(10): 1321–1328.
- [4] Patel VKS, Pandey AK. Modeling and performance analysis of PID controlled BLDC motor and different schemes of PWM controlled BLDC motor. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2013; 3(4): 1–14.
- [5] Mohankrishna C, Pandey AK. Modelling and simulation of BLDC motor using state space approach. *International Journal of Innovative Research in Electrical, electronics, Instrumentation and Control Engineering*. 2016; 4(5): 533–538.
- [6] Poovizhi M, Kumaran MS, Ragul P, Priyadarshini LI. Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor( BLDC) drives by using matlab-simulink. In: *Proceeding of International Conference on Power and Embedded Drive Control*. Chennai, India · India: 2017. p. 178–183.
- [7] Khlubwannarat P, Nawikavatan A, Puangdownreong D. Application of parallel flower pollination algorithm to fractional-order

- model identification of BLDC motor. In: *Proceeding of International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. Phuket, Thailand: 2020. p. 131–134.
- [8] Kojabadi HM, Cao Q, Chang L, Ghribi M, Dupuis A. Optimal PI controller gains using a multi-loop multi-objective genetic algorithm in IM drives. In: *Proceeding of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. Nova Scotia, Canada: 2015. p. 470–473.
- [9] Achiammal B., Kayalvizhi R. Genetic algorithm based PI controller for negative output elementary LUO converter. In: *Proceeding of IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*. 2015. p. 470–473.
- [10] Li X, Chen M, Tsutomu Y. A method of searching PID controller's optimized coefficients for Buck converter using particle swarm optimization. In: *Proceeding of IEEE 10<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Kitakyushu, Japan: 2013. p. 238–243.
- [11] Sahin E, Ayas MS, Altas IH. A PSO optimized fractional-order PID controller for a PV system with DC-DC boost converter. In: *Proceeding of 16<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*. Antalya, Turkey, 2014: p. 477–481.
- [12] Chaijarunudomrung K, Areerak K-N, Areerak K-L, Srikaew A. The controller design of three-phase controlled rectifier using an adaptive tabu search algorithm. In: *Proceeding of 8<sup>th</sup> Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. Khon Kaen, Thailand: 2011. p. 605–608.
- [13] Sopapirm T, Areerak K-N, Areerak K-L, Srikaew A. The application of adaptive tabu search algorithm and averaging model to the optimal controller design of buck converters. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2011; 12(5): 1707–1713.
- [14] Pakdeeto J, Chanpittayagit R, Areerak K- N, Areerak K-L. The optimal controller design of buck-boost converter by using adaptive tabu search algorithm based on state-space averaging model. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2017; 12(3): 1146–1155.
- [15] Puangdownreong D. Fractional order PID controller design for DC motor speed control system via flower pollination algorithm. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*. 2017; 17(1): 14–23.
- [16] Narongrit T, Areerak K-L, Areerak K-N. Design of an active power filter using adaptive tabu search. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases*. Cambridge UK: 2009 p. 314–318.
- [17] Narongrit T, Areerak K-L, Areerak K-N. Design of an active power filter using genetic algorithm technique. In: *Proceedings of the 9<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases*. UK: 2010. p. 46–50.
- [18] Rojanaworahiran K., Chayakulkheeree K. Real and reactive powers decomposition optimal power flow using particle swarm optimization. In: *Proceedings of International Conference on Power, Energy and Innovation*. Pattaya, Thailand: 2019. p. 78–81.
- [19] Wang L, Zhang X, Zhang X. Antenna array design by artificial bee colony algorithm with similarity induced search method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2019; 55(6): 7201904.

- [20] Soares J, Sousa T, Vale ZA, Morais H, Faria P. Ant colony search algorithm for the optimal power flow problem. In: *Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting*. Chicago, Illinois, USA: 2017. p. 1–8.
- [21] Puansdownreong D, Areerak K- N, Sujitjorn S, Kulworawanichpong T. Convergence analysis of adaptive tabu search. *ScienceAsia*. 2009; 30(2): 183–190.
- [22] Sharapov RR, Lapshin AV. Convergence of genetic algorithms. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2006; 16(3): 392–397.
- [23] Tian D. A review of convergence analysis of particle swarm optimization. *International Journal of Grid and Distributed Computing*. 2013; 6(6): 117–128.
- [24] Chan TF, Yan LT, Fang SY. In-wheel permanent-magnet brushless DC motor drive for an electric bicycle. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2002; 17(2): 229–233.
- [25] Kahveci H, Okumus HI, Ekici M. Improved brushless DC motor speed controller with digital signal processor. *IET Journals & Magazines*. 2014; 50(12): 864–866.
- [26] Real JCG, Gil JG. Sensorless detection of position and speed in brushless DC motors using the derivative of terminal phase voltages technique with a simple and versatile motor driver implementation. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2015; 10(4): 1540–1551.
- [27] Puansdownreong D, Areerak K- N, Srikaew A, Sujitjorn S, Totarong P. System identification via adaptive tabu search. In: *IEEE International Conference on Industrial Technology*. Bangkok, Thailand: 2002. p. 915–920.