

การระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วย

วิธีการเมตาฮิวริสติก

IDENTIFICATION OF BRUSHLESS DC MOTOR WITH METAHEURISTIC METHOD

มนูญ บุญประมุข*, สันญา พรหมภาสิต, วีระพล พลีสัตย์, วสันต์ เพชรพิมูล, วิษณุ บัวเทศ
Manoon Boonpramuk*, Sunya Phomprasit, Weerapon Plesatt, Wasan Phetphimoon,
Witsanu Buathes

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร อ.เมือง จ.กำแพงเพชร ประเทศไทย 62000
Faculty of Industrial Technology, Kamphang Phet Rajabhat University, Muang, Kamphang Phet, Thailand, 62000

*Corresponding author e-mail: amanoonz@gmail.com

วันที่เข้ารับ 24 พฤศจิกายน 2566

วันที่แก้ไขบทความ 13 พฤษภาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 13 พฤษภาคม 2567

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติก โดยมีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อหาวิธีการเมตาฮิวริสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านและ 2) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ผลการทดสอบพบว่า 1) วิธีการเมตาฮิวริสติกที่ใช้มี 3 แบบคือการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับ (ATS), การค้นแบบฝูงอนุภาค (PSO) และการค้นหาแบบกระแสวิ่งข้ามขั้น (ICS) โดยการค้นหาแบบกระแสวิ่งข้ามขั้นจะได้ผลการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดจากการทดสอบด้วยฟังก์ชันมาตรฐาน 2) การทดสอบประสิทธิภาพในการระบุเอกลักษณ์สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านพบว่า วิธีการค้นหาแบบกระแสวิ่งข้ามขั้นสามารถระบุเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ออกมาได้อย่างเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (SSE) ที่น้อยที่สุด

คำสำคัญ: ระบุเอกลักษณ์, เมตาฮิวริสติก, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

Abstract

This paper presents the identification of brushless DC motors using the meta-heuristic method. The objectives are 1) to find the most suitable meta-heuristic method for their identification and 2) to test the identification performance of brushless DC electric motors. The test results found that: 1) the three types of meta-heuristic methods used included: adaptive taboo search (ATS); particle swarm optimization (PSO); and intensified current search (ICS). The ICS could potentially provide the best answer according to standard functions. 2) The identification performance tests for brushless DC motors found that the ICS method could optimally identify the uniqueness of various parameters and make available the least amount of sum squared error (SSE).

Keywords: Identification, Metaheuristic, Brushless DC Motor

1. บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) เป็นมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดหนึ่งที่มีลักษณะที่เหมือนกันคือมีแม่เหล็กถาวรบนโรเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ฮาร์ดดิสก์, หุ่นยนต์, ยานพาหนะ, การบินและอวกาศ, เครื่องใช้ในบ้าน และเครื่องมือวัด ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน มีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่ามอเตอร์กระแสตรงทั่วไปที่มีแปรงถ่าน โดยโครงสร้างมีความเรียบง่าย มีประสิทธิภาพสูง การบำรุงรักษาน้อยกว่าเนื่องจากไม่มีแปรงถ่าน เสียบกวนต่ำขณะทำงาน มีความเร็วและแรงบิดที่สูงกว่า (Moon, 2013)

การนำเอามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องมีวิธีการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ที่สามารถตอบสนองต่อความเร็วและแรงบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัญหาอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการออกแบบระบบควบคุมคือมีความยุ่งยากในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลตอบสนองของระบบค่อนข้างต่ำ (Saleh & Obed, 2014) ส่งผลต่อความผิดพลาดในการออกแบบระบบควบคุมก่อให้เกิดเสถียรภาพในการทำงานที่ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในปัจจุบันแนวคิดการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีเมตาฮิวริสติกเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญในงานด้านวิศวกรรมเป็นอย่างมากเนื่องด้วยมีความยืดหยุ่นต่อการใช้งานเพื่อค้นหาคำตอบโดยใช้แนวคิดกระบวนการของพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตหรือพฤติกรรมทางธรรมชาติ (Sakulin, 2012) อาทิเช่น การค้นหาแบบตาบู่ (tabu search) ที่ใช้หลักการค้นหาแบบปิ่นเขาเพื่อหาคำตอบ, การค้นหาแบบฝูงอนุภาค (Particle

swarm optimization) ใช้หลักการค้นหาแหล่งอาหารแบบฝูง, จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm) ใช้หลักการการกลายพันธุ์และการแลกเปลี่ยนข้ามยีนส์, การค้นหาแบบกระแสวิ่งเข้มข้น (Intensive current search) ใช้หลักการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าในวงจร, การค้นหาแบบอบอ่อนจำลอง (Simulated annealing) ใช้หลักการให้ความร้อนกับโลหะแล้วปล่อยให้เย็นลงตามธรรมชาติ เป็นต้น

ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติกเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อหาวิธีการเมตาฮิวริสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

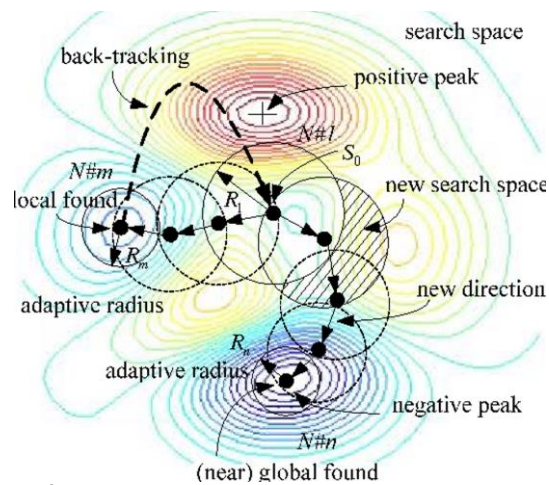
3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การหาวิธีการเมตาฮิวริสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ โดยวิธีการเมตาฮิวริสติกเป็นวิธีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาเพื่อหาคำตอบที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน ใช้หลักการสุ่มเลขเพื่อให้เกิดการค้นหาพื้นที่ของคำตอบให้กว้างที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ วิธีการเมตาฮิวริสติกมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอ 3 รูปแบบด้วยกันได้แก่ การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับ, การค้นหาแบบฝูงอนุภาค และการค้นหาแบบกระแสวิ่งเข้มข้น วิธีการเมตาฮิวริสติกแต่ละแบบนั้นสามารถวัดประสิทธิภาพจากการแก้ปัญหาเดียวกัน โดยวิเคราะห์จากคุณภาพของคำตอบและระยะเวลาการหาคำตอบ

3.1.1 การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับ (Adaptive tabu search : ATS)

เป็นกระบวนการหาคำตอบที่พิจารณาเส้นทางที่จะนำไปสู่ค่าที่เหมาะสมโดยมีการปรับปรุงจากการค้นหาแบบตาบูที่มีการหลบเลี่ยงคำตอบหรือเส้นทางที่ได้ทำการสำรวจไปแล้ว จากนั้นการค้นหาคำตอบจะไม่หยุดอยู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Ketthong, 2017) ดังภาพที่ 1

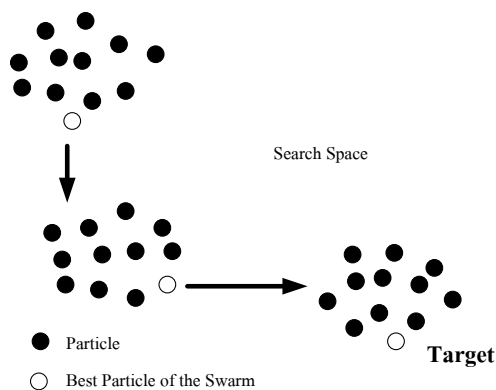
มีการอิงแนวการค้นหาพื้นที่ใกล้เคียงเพื่อแก้ไขปัญหาแบบผสมผสานและไม่เป็นเชิงเส้น กลไกการปรับตามวิธีแบบตาบูเชิงปรับมีขั้นตอนการปรับตัวของรัศมี (Adaptive radius) และการติดตามหลัง (Back tracking) เพื่อเป็นการเร่งกระบวนการหาคำตอบสามารถหลีกเลี่ยงการหาคำตอบเฉพาะถิ่นได้ดีขึ้น (Khalid, 2016)



ภาพที่ 1 พฤติกรรมการค้นหาคำตอบด้วยตาบู่เชิงปรับ

3.1.2 การค้นหาแบบฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization : PSO)

การค้นหาค่าที่เหมาะสมด้วยฝูงอนุภาค เป็นกระบวนการหนึ่งของวิธีการค้นหาที่เหมาะสมแบบกลุ่มประชากร ที่มีพื้นฐานของวิธีการจากธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตที่อยู่รวมกันเป็นฝูงเช่น ฝูงนก และฝูงปลา (AOUF, 2017) โดยการเคลื่อนที่ที่จะรวมกันเป็นเหมือนกลุ่มฝูงอนุภาคในการค้นหาเหยื่อที่อาศัยการอ้างอิงตำแหน่งของตัวเองและตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่บินมาแล้วเพื่อใช้กำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นฝูงอนุภาคต่อไปจนกว่าจะพบกับคำตอบที่เหมาะสมดังภาพที่ 2

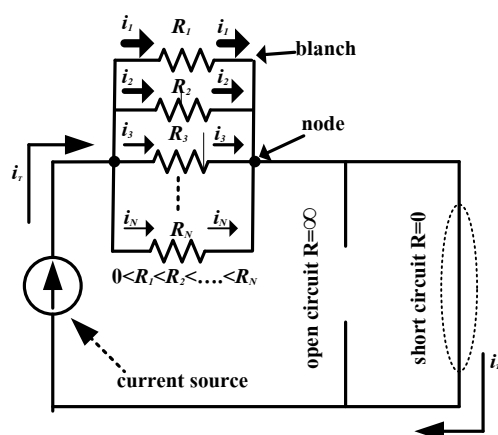


ภาพที่ 2 พฤติกรรมการค้นหาเป้าหมายด้วยฝูงอนุภาค

3.1.3 การค้นหาแบบกระแสเชิงเข้มข้น (Intensive current search: ICS)

การค้นหาแบบกระแสเชิงเข้มข้นเป็นวิธีการค้นหาที่เหมาะสมที่พัฒนามาจากวิธีการค้นหาแบบกระแส (Current search: CS) โดยมีพื้นฐานของพฤติกรรมการไหลกระแสไฟฟ้าใน

วงจรไฟฟ้าในแต่ละสาขาซึ่งจะอาศัยหลักทฤษฎีของเคอร์ชอฟที่ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรไฟฟ้าจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 พฤติกรรมการไหลของกระแสไฟฟ้า

จากภาพที่ 3 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในแต่ละสาขาของวงจรไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าความต้านทาน ยิ่งค่าความต้านทานมีค่าน้อยเท่าไร กระแสไฟฟ้าจะยิ่งไหลมากขึ้นเท่านั้น และถ้าเกิดการลัดวงจรเกิดขึ้น (Short circuit) ค่าความต้านทานในสาขานั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่หากว่าเกิดการเปิดวงจร (Open circuit) ค่าความต้านทานในสาขานั้นจะมีค่าเป็นอนันต์ จากพฤติกรรมการไหลของกระแสไฟฟ้าดังกล่าวนี้ วงจรไฟฟ้าเปรียบเสมือนคำตอบเริ่มต้นที่เป็นไปได้ ในขณะที่การไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อพบกับวงจรเปิดเปรียบเสมือนการติดกับวงจรแคบเฉพาะถิ่น และหากว่ากระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านในสาขานั้นได้เมื่อมีค่าความต้านทานที่เหมาะสมจะเปรียบเสมือนการได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Puangdownreong, 2013) สำหรับในวิธีการค้นหาแบบ ICS เป็นการพัฒนาที่เพิ่มประสิทธิภาพโดยมีการเพิ่มกระบวนการปรับรัศมีการค้นหา (Adaptive radius: AR) และกระบวนการปรับค่าข้างเคียง (Adaptive neighborhood: AN) (Nawikavatan, 2016) การค้นหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติกทั้ง 3 แบบนั้นสามารถลำดับขั้นตอนกระบวนการรหัสเทียม (Pseudo code) ดังภาพที่ 4

3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน เป็นกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางพลวัตของระบบที่ได้มาจากการคำนวณข้อมูลทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของระบบ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีลักษณะที่คล้ายกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป เพียงแต่เป็นมอเตอร์ที่มีขนาด 3 เฟสที่มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบสตาร์ (Poonsawat, 2008) ดังภาพที่ 5

Initialize:

- Objective function $f(s), s=(s_1, s_2, \dots, s_d)$
- Initialize the search space Ω , Tabu list (TL), Search radius R
- Randomly generate initial N solution around s_0 within Ω
- Evaluate $f(s_0)$ via given objective function

while (termination criteria (TC));

- Randomly generate neighborhood solutions s'
- Evaluate $f(s')$ via given objective function
- Find the best neighborhood solution s^*
- if** $f(s^*) < f(s_0)$
- Keep s_0 into TL and update $s_0 = s^*$
- else**
- Keep s^* into TL

end

if (local entrapment occurred)

- Then** activate the backtracking (BT) mechanism.

if (search closes to local solutions)

- Then** invoke the adaptive radius (AR) mechanism to reduce R by adjusting $R = \mu R, 0 < \mu < 1$.

end

-Best solution found.

(ATS)

Initialized:

- Objective function $f(x), x=(x_1, x_2, \dots, x_d)$
- Initialize the parameters $c1, c2, w_{max}, w_{min}$ and population size N
- Maximum iteration $iter_{max}$
- Random initial solution x_i within search space
- Evaluate $f(x_i)$ and set all initial position as $g_{best} = x_0, p_{best} = x_0^j$

while ($i \leq iter_{max}$ or TC (termination criteria));

- Calculate the velocity of particle v_i
- Update the position of particle x_i
- if** $f(x_i) \leq f(x_0)$
- Update $g_{best} = x_i$

end

Update $i=i+1$

end

-Best solution found.

(PSO)

Initialized:

- Objective function $f(x), x=(x_1, x_2, \dots, x_d)$
- Initialize the search space Ω and memory list $ML(\Psi, \Gamma_k, \Xi) = \emptyset$
- Maximum allowance of solution cycling j_{max}
- Number of initial solution (directions of current in network) N
- Number of neighborhood members n and search radius $R, k=j=1$
- Random initial solution X_i within Ω
- Evaluate $f(X_i)$ then rank and X_i store into (Ψ)
- Let $x_0 = X_k$ as selected initial solution
- $X_{global} = X_{local} = x_0$

while ($k \leq N$ or TC (termination criteria));

while ($j \leq j_{max}$);

- Random neighborhood x_i around x_0 within R
- Evaluate $f(x_i)$ and set the best one as x^*
- if** $f(x^*) < f(x_0)$; Update $x_0 = x^*$, set $j=1$ and keep x_0 into Γ_k ,
- else** Update $j=j+1$ and keep x^* into Γ_k **end**
- Activate AR by $R = \rho R, 0 < \rho < 1$.
- Invoke AN by $n = \alpha n, 0 < \alpha < 1$.

end

Update $X_{local} = x_0$

Keep X_{global} into high level $ML(\Xi)$

if $f(X_{local}) = f(X_{global})$; Update $X_{global} = X_{local}$ **end**

Update $k=k+1$ and set $j=1$

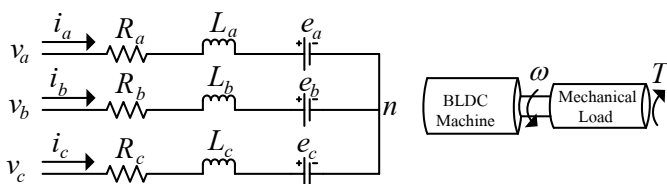
Let $x_0 = X_k$ as selected initial solution

end

-Best solution found.

(ICS)

ภาพที่ 4 รหัสเทียมของ ATS, PSO และ ICS



ภาพที่ 5 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน 3 เฟสและแบบจำลองทางกล



การอธิบายการทำงานทางพลวัตของมอเตอร์ จะใช้รูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าเบื้องต้นของมอเตอร์พิจารณาในรูปของสมการแรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ (1) ซึ่งเป็นสมการเฉพาะเฟส A

$$v_{an}(t) = v_s(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (1)$$

สมการคณิตศาสตร์ความสัมพันธ์ระหว่างทางเชิงกลกับความเร็วเชิงมุมที่มีความเกี่ยวข้องกับแรงบิดโหลดและแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (2)

$$T_e(t) = B_v \omega(t) + J \frac{d\omega}{dt} + T_l(t) \quad (2)$$

จากสมการที่ (1) และ (2) สามารถอธิบายแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับได้ในสมการที่ (3) และ (4)

$$T_e(t) = K_T i_a(t) \quad (3)$$

$$e_a(t) = K_b \omega(t) \quad (4)$$

สมการแรงดันไฟฟ้าในสมการที่ (1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปการแปลงลาปลาซได้ในสมการที่ (5)

$$V(s) = R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + K_b \omega(s) \quad (5)$$

แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในสมการที่ (2) และ (3) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปการแปลงลาปลาซได้ในสมการที่ (6) และ (7)

$$T_e(s) = B_v \omega(s) + J s \omega(s) + T_l(s) \quad (6)$$

$$T_e(s) = K_T I_a(s) \quad (7)$$



จากสมการที่ (6) และ (7) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์กับสมการกระแสไฟฟ้าดังสมการที่ (8)

$$I_a(s) = \frac{B_v \omega(s)}{K_T} + \frac{Js\omega(s)}{K_T} \quad (8)$$

นอกจากนี้สมการที่ (6) และ (7) ยังสามารถเขียนอธิบายเพิ่มในรูปของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าดังสมการที่ (9)

$$T_e(s) = K_T \frac{V(s) - K_b \omega(s)}{R_a + sL_a} \quad (9)$$

จากสมการที่ (5) ถึงสมการที่ (9) สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านดังสมการที่ (10)

$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \left(\frac{K_T}{(L_a J)s^2 + (R_a J + L_a B_v)s + (R_a B_v + K_b K_T)} \right) \quad (10)$$

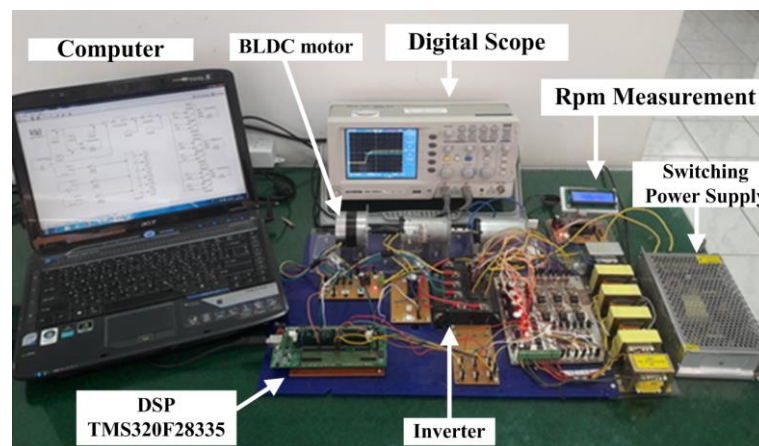
เนื่องด้วยระบบมอเตอร์ถูกขับเคลื่อนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งสามารถประมาณโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 1 (D. Kumpanya, 2015) ดังนั้นสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ที่สมบูรณ์แสดงในสมการที่ (11)

$$G_p(s) = \left(\frac{K_A}{\tau_A s + 1} \right) \left(\frac{K_T}{(L_a J)s^2 + (R_a J + L_a B_v)s + (R_a B_v + K_b K_T)} \right) \quad (11)$$

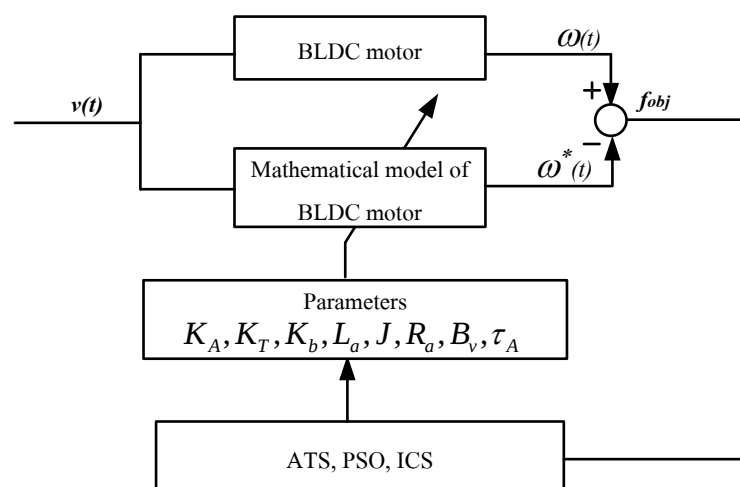
โดยที่	K_A	คือ ค่ากำลังวงจรรขยายคงที่
	τ_A	คือ ค่าเวลากำลังวงจรรขยายคงที่
	B_v	คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
	R_a	คือ ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์
	J	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย
	L_a	คือ ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดมอเตอร์
	K_T	คือ ค่าแรงบิดคงตัว

K_b คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

สมการฟังก์ชันถ่ายโอนประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้งหมด 8 ตัวของมอเตอร์ที่ใช้สำหรับระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติกทั้ง 3 รูปแบบ ขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ เริ่มจากเก็บข้อมูลผลการทดสอบความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านขนาดแรงดัน 24 โวลต์ที่ 2,400 รอบต่อนาที ควบคุมผ่านบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320F28335 ดังภาพที่ 6 จากนั้นทำการระบุเอกลักษณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ฟังก์ชันถ่ายโอนแล้วเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ได้ทำการระบุเอกลักษณ์กับแบบจำลองที่ได้ทำการพิสูจน์ ลักษณะกระบวนการระบุเอกลักษณ์แบบ ATS, PSO และ ICS แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ระบบควบคุมมอเตอร์

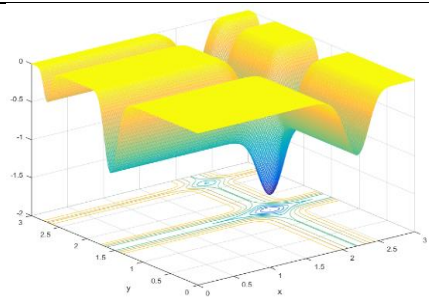
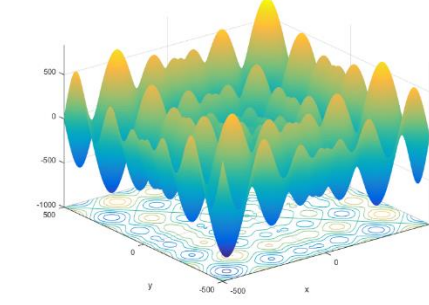


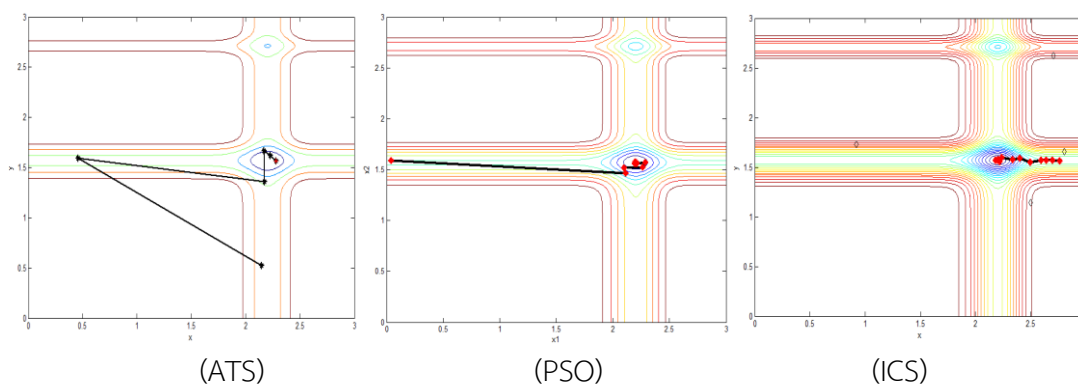
ภาพที่ 7 การระบุเอกลักษณ์ด้วย ATS, PSO และ ICS

4. ผลการวิจัย

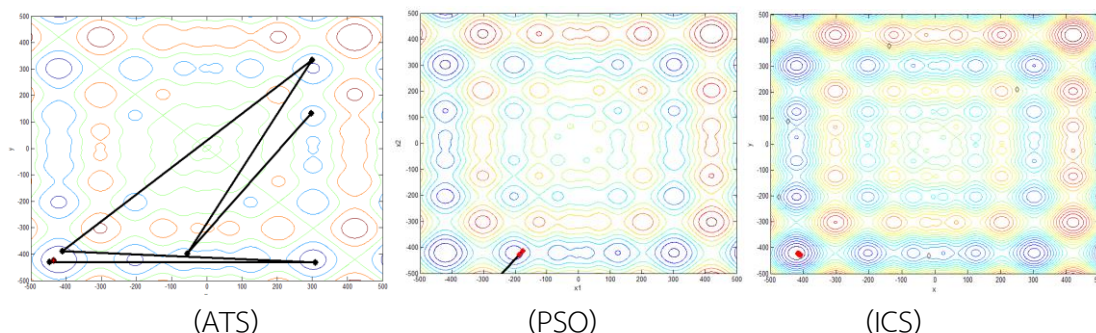
4.1 ผลการหาวิธีการเมตาฮีริสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยทำการวัดประสิทธิภาพจากการแก้ปัญหาเดียวกัน โดยวิเคราะห์จาก คุณภาพของคำตอบและระยะเวลาการหาคำตอบทั้ง 3 รูปแบบคือ การค้นหาแบบตาปูเชิงปรับ, การ ค้นหาแบบฝูงอนุภาคและการค้นหาแบบกระแสน้ำไหลเชี่ยว ซึ่งใช้กับฟังก์ชันมาตรฐานเปรียบเทียบเพื่อ หาคำตอบดังตารางที่ 1 และทดสอบสมรรถนะการค้นหาคำตอบและอัตราการใช้หาคำตอบแบบ ICS ,PSO และ ATS ด้วยโปรแกรม MATLAB ดังภาพที่ 8 – 9

ตารางที่ 1 ฟังก์ชันมาตรฐาน

ฟังก์ชัน มาตรฐาน	สมการและขอบเขตการค้นหา	รูปแบบ 3 มิติ
Michalewicz(MF)	$\min f(x, y) = -\sin(x)\sin^{20}(x^2/\pi) - \sin(y)\sin^{20}(2y^2/\pi)$ Subject to $0 \leq x, y \leq 3$	
Schwefel (SF)	$\min f(x, y) = 418.982 - \sum_{i=1}^n (x_i \sin \sqrt{ x_i })$ Subject to $-500 \leq x, y \leq 500$	



ภาพที่ 8 การเคลื่อนที่ของการค้นหาคำตอบฟังก์ชัน Michalewicz



ภาพที่ 9 การเคลื่อนที่ของการค้นหาคำตอบฟังก์ชัน Schwefel

ผลการทดสอบสมรรถนะของวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยโปรแกรม MATLAB กำหนดค่าการวนซ้ำในการหาคำตอบจำนวน 100 รอบ นำผลการทดสอบที่ได้นำมาเปรียบเทียบ ดังตารางที่ 2 พบว่าการค้นหาแบบ ICS ได้ผลการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยดูจากค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถนำเอาวิธีดังกล่าวไปใช้ในการระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านได้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบฟังก์ชันมาตรฐาน

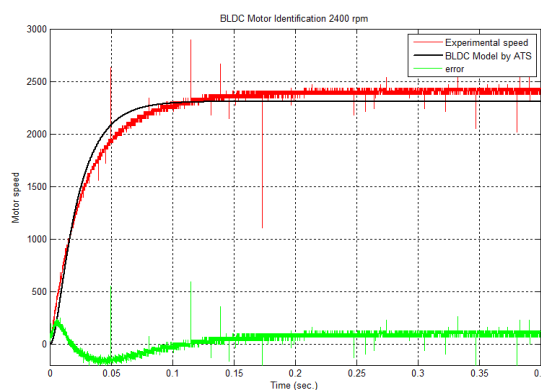
ฟังก์ชันมาตรฐาน	พารามิเตอร์	รูปแบบการค้นหา		
		ATS	PSO	ICS
Michalewicz	$f(x, y)$	-1.560	-1.713	-1.801
	x	2.192	2.126	2.202
	y	1.652	1.574	1.570
Schwefel	$f(x, y)$	-7.852×10^2	-1.805×10^3	-2.352×10^3
	x	-4.238×10^2	-7.170×10^2	1.319×10^3
	y	-4045×10^2	-1.092×10^3	-1.108×10^3

4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์โดยกำหนดรูปแบบการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับ, การค้นหาแบบฝูงอนุภาคและการค้นหาแบบกระแสน้ำแบบผสมผสาน ดังภาพที่ 6 ซึ่งเป็นไปตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (12) โดยที่ f_{obj} เป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบความเร็วมอเตอร์จากผลการทดสอบระบบจริง $\omega(t)$ กับความเร็วมอเตอร์ที่ได้จากแบบจำลอง $\omega^*(t)$ ผลการเปรียบเทียบความเร็วทั้งสองส่วนจะถูกทำให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของการระบุเอกลักษณ์ตามขอบเขตพื้นที่การค้นหาที่กำหนดไว้ดังสมการที่ (13)

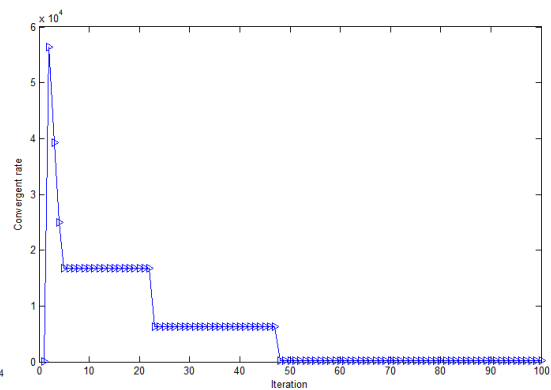
$$f_{obj} = \sum_{i=1}^N [\omega(t) - \omega^*(t)]^2 \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq K_A \leq 20 \\ 0 &\leq K_T \leq 1 \\ 0 &\leq K_b \leq 1 \\ 0 &\leq L_a \leq 0.1 \\ 0 &\leq J \leq 0.1 \\ 0 &\leq R_a \leq 20 \\ 0 &\leq B_v \leq 1 \\ 0 &\leq \tau_A \leq 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

การประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาข่ายเชิงปรับ, การค้นหาแบบฝูงอนุภาคและการค้นหาแบบกระแสน้ำไหลขึ้น สำหรับระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ BLDC เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ทำการโปรแกรมด้วย MATLAB ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง Corei5-2450M ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.5 GHz มีหน่วยความจำหลักชนิด DDR ขนาด 6GB โดยใช้ข้อมูลความเร็วรอบที่ 2,400 รอบต่อนาที กำหนดการค้นหาค่าตอบจำนวน 100 รอบ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 10-12 และค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ดังตารางที่ 3

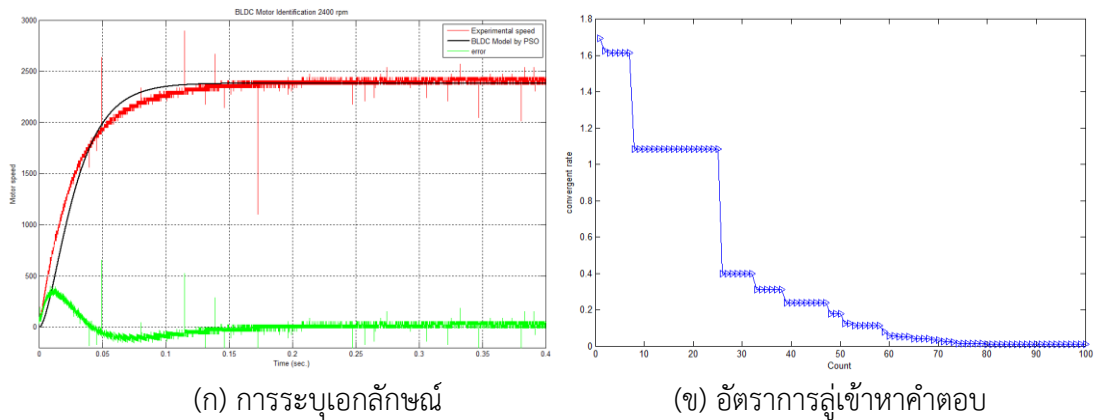


(ก) การระบุเอกลักษณ์

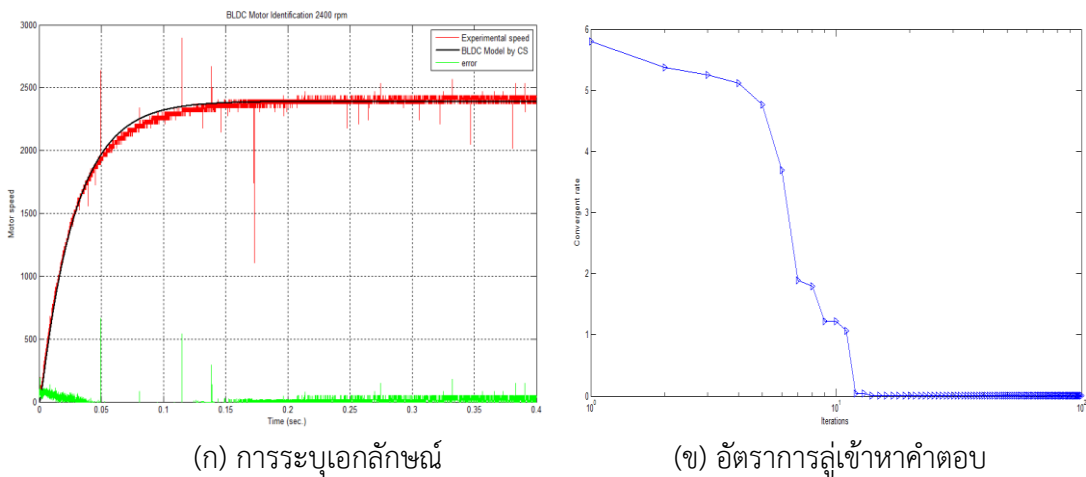


(ข) อัตราการลู่เข้าหาคำตอบ

ภาพที่ 10 ผลการทดสอบด้วย ATS



ภาพที่ 11 ผลการทดสอบด้วย PSO



ภาพที่ 12 ผลการทดสอบด้วย ICS

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ได้จากการระบุเอกลักษณ์

พารามิเตอร์	ICS	PSO	ATS
$R_o(\Omega)$	18.6987	8.4903	2.8975
$L_o(H)$	0.0632	0.0847	0.0154
$K_T(N.m/A)$	0.9675	1.1042	0.8062
K_A	11.1648	15.7513	12.1016
$\tau_A(sec)$	0.0278	0.0731	0.0189
$J(kg.m^2)$	0.0001	0.0211	0.0010
$B_v(N.m/(rad/sec))$	0.1527	0.8648	0.9995
$K_b(V/(rad/sec))$	0.8775	0.7875	0.6530
SSE	585.48	740.41	886.80

จากผลการทดสอบระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านดังภาพที่ 10 -12 จะประกอบด้วยผลการระบุเอกลักษณ์และอัตราการรู้เข้าหาคำตอบ การระบุเอกลักษณ์เป็นผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบของมอเตอร์กับผลที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วย ATS, PSO และ ICS พบว่ารูปแบบการค้นหาคำตอบด้วย ICS จะให้ผลการระบุเอกลักษณ์ที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์มากที่สุดโดยมีค่าของรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (sum-squared error: SSE) อยู่ที่ 585.48 ซึ่งน้อยกว่า ATS และ PSO

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 การหาวิธีการเมตาฮิวริสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยกระบวนการค้นหามีวิธีการเมตาฮิวริสติกทั้งหมด 3 รูปแบบคือ การค้นหาแบบดาวยุเชิงปรับ, การค้นหาแบบฝูงอนุภาคและการค้นหาแบบกระแสน้ำไหลเชี่ยว พบว่าเมื่อได้นำกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาทดสอบกับฟังก์ชันมาตรฐาน Michalewicz และ Schwefel ด้วยการค้นหาแบบกระแสน้ำไหลเชี่ยว ได้ผลการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยดูจากค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุดซึ่งสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกเพื่อใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้

5.2 การทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ในขั้นตอนที่ทดสอบกับมอเตอร์ขนาดแรงดัน 24 โวลต์ที่ความเร็ว 2,400 รอบต่อนาที โดยใช้การค้นหาแบบดาวยุเชิงปรับ, การค้นหาแบบฝูงอนุภาคและการค้นหาแบบกระแสน้ำไหลเชี่ยว พบว่าการค้นหาแบบกระแสน้ำไหลเชี่ยวจะให้ผลการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ที่ดีที่สุดโดยมีค่าผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (SSE) ที่น้อยที่สุด ส่งผลทำให้ได้ค่าของพารามิเตอร์ที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์

6. เอกสารอ้างอิง

- AOUF, A., BOUSSAID, L., & Sakly, A. (2017, May). **A PSO algorithm applied to PID controller for motion mobile robot in complex dynamic environment.** International Conference on Engineering & MIS, Monastir, Tunisia. Doi: 10.1109/ICEMIS.2017.8273012
- Ketthong, T., Tunyasirut, S., & Puangdownreong, D. (2017). Design and Implementation of I-PD Controller for DC Motor Speed Control System by Adaptive Tabu search. **International Journal Intelligent Systems and Application**, 9, 69-78. Doi: 10.5815/ijisa.2017.09.08

- Khalid, S. (2016). Optimized Aircraft Electric Control System Based on Adaptive Tabu Search Algorithm and Fuzzy Logic Control. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics**, 4(3), 149-164. Doi: 10.11591/ijeei.v4i3.221
- Kumpanya, D., Thaiparnat, S., & Puangdownreong, D. (2015). Parameter Identification of BLDC Motor via Metaheuristic Optimization Techniques. **International Conference on Industrial Engineering and Service Science**, 4, 322-327. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.047>
- Moon, J.J., Im, W.S., & Kim, J.M. (2013, March). **Novel Phase Advance Method of BLDC motors for wide range speed operations**. 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Long Beach, USA. Doi: 10.1109/APEC.2013.6520622
- Nawikavatan, A., Tunyasirirut, S., & Puangdownreong, D. (2016). Application of Intenified Current Search to Multiobjective PID Controller Optimization. **International Journal of Intelligent Systems and Applications**, 11, 51-60. Doi: 10.5815/ijisa.2016.11.06
- Poonsawat, S., & Kulworawanichpong, T. (2008). Speed Regulation of a Small BLDC Motor using Genetic-Based Proportional Control. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, 2(5), 203-208.
- Puangdownreong, D. (2013). Current search: performance evaluation and application to DC motor speed control system design. **Intelligent Control and Automation**, 4(1), 42-54. Doi: 10.4236/ica.2013.41007
- Sakulin, A., & Puangdownreong, D. (2012, February). **A novel meta-huristic optimization algorithm current serach**. WSEAS International Conference on Articial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases, Wisconsin, United States.
- Saleh, A.L. & Obed, A.A. (2014). Speed Control of Brushledd DC Motor Based on Feactional order PID Controller. **International Journal of Computer Applications**, 95(4), 1-6.