

การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยจินเนติกอัลกอริทึม

Identification for Direct Current Motor with Genetic Algorithm

เจิมธง บรรณารักษ์¹* และจิระพล ศรีเสริฐผล²¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
38 หมู่ 8 ตำบลนาวัน อำเภอมือง จังหวัดเพชรบุรี 76000² สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย อำเภอมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: chermthong@hotmail.com, 032-414455

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ โดยใช้ค้นหาสัมประสิทธิ์ที่เป็นลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้แก่ ความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์ ความเหนี่ยวนำ ค่าคงที่แรงบิด ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ และค่าความหน่วงแรงบิดผลการค้นหาและเปรียบเทียบผลการทดสอบพบว่า การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมสามารถค้นหาสัมประสิทธิ์ที่เป็นคำตอบของมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเมื่อนำสัมประสิทธิ์ดังกล่าวไปจำลองการตอบสนองในรูปของความเร็วรอบพบที่มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดจากการวัดไม่เกิน 0.9 เปอร์เซ็นต์

คำหลัก: จินเนติกอัลกอริทึม, การระบุเอกลักษณ์ของระบบ, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Abstract

This research attempts to identify parameters of Direct Current Motor by using Genetic Algorithm (GA) search. The GA is a searching method in Artificial Intelligence. It is used to searching 6 parameters which are characteristics of DC motor such as armature resistance, armature inductance, torque constant, back e.m.f. constant, moment of inertia of rotor and damping torque. The results show that the GA can efficiently search for the system parameters with maximum error less than 0.9 percent for all the tested speeds.

Keywords: Genetic Algorithm, System Identification, Direct Current Motor

1. บทนำ

ปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น เครื่องขึ้นสกรูในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แขนกลของหุ่นยนต์ เป็นต้น โดยการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์เพื่อ

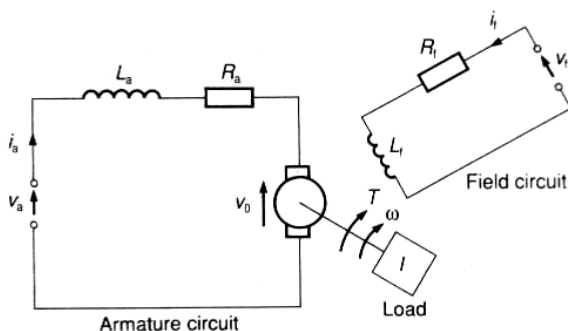
นำไปใช้งานนั้น ในเบื้องต้นจำเป็นที่เราจะต้องทราบคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ ซึ่งบางครั้งเราไม่อาจทราบพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการนำไปออกแบบและใช้งาน ดังนั้น งานวิจัยนี้จะนำเสนอผลการค้นหาสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยวิธีทางปัญญาเชิงคำนวณ โดยใช้เทคนิคจินเนติก

อัลกอริทึม (Genetic Algorithm) เพื่อค้นหาสัมประสิทธิ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอาร์เมเจอร์คอนโทรล เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปสร้างระบบควบคุมต่อไป

2. แบบจำลองของมอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current, D.C. Motor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยทั่วไปมอเตอร์จะประกอบด้วยส่วนหมุนที่เป็นขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Coil) ซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก โดยอาจจะเป็นแม่เหล็กถาวร หรือจะเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าก็ได้ เมื่อมีกระแสไฟฟ้า i_a ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ก็จะทำให้เกิดแรงผลักดันให้อาร์เมเจอร์นี้เกิดการหมุน ซึ่งโดยทั่วไปสามารถจำแนกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ 2 แบบ ตามลักษณะการควบคุม คือ Armature – Controlled Motor และ Field – Controlled Motor

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ควบคุมด้วยวิธี Armature Control จะใช้การปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Circuit) เพื่อควบคุมความเร็วรอบ โดยที่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดสนาม (Field Circuit) คงที่ ทำให้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์มีค่าคงที่ไปด้วย ดังนั้นการควบคุมจะทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์



รูปที่ 1 วงจรมอเตอร์กระแสตรงแบบ Armature Controlled [1],[3]

ในวงจรของอาร์เมเจอร์นั้น จะประกอบด้วยความต้านทาน R_a และความเหนี่ยวนำ L_a ตามรูปที่ 1 ซึ่ง

จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ Back e.m.f , v_b ขึ้น โดยที่

$$v_b = K_e \omega \quad (1)$$

ดังนั้นหากเราให้ความต่างศักย์ v_a กับวงจรเราจะได้

$$v_a - v_b = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \quad (2)$$

กระแส i_a ในขดลวดอาร์เมเจอร์จะทำให้เกิดแรงบิด T ซึ่งมีค่า เป็น

$$T = K_t i_a \quad (3)$$

เมื่อ K_t เป็นค่าคงที่แรงบิด และระบบมีค่าความบิดหน่วง (Damping Torque) เท่ากับ $B\omega$ เมื่อระบบมีโหลดแรงบิด T_f มากระทำ จากกฎข้อที่ 2 เราจะได้

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_t i_a - B\omega - T_f \quad (4)$$

จากสมการที่ (2) และ (4) จะจัดสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะได้

$$\begin{Bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{\omega} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_a \\ \omega \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_a \\ T_f \end{Bmatrix} \quad (5)$$

เมื่อ B = ความหน่วง (N·m·s/rad)

i_a = กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)

J = โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

K_e = ค่าคงที่ของ Electromotive Force (V·s/rad)

K_t = ค่าคงที่ของแรงบิด (N·m/A)

L_a = ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)

R_a = ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)

T_f = ภาระแรงบิดภายนอกที่กระทำ (N·m)

v_a = ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)

ω = ความเร็วรอบ (rad/s)

สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปของความเร็รรอบภายใต้อินพุตแรงดันคือ

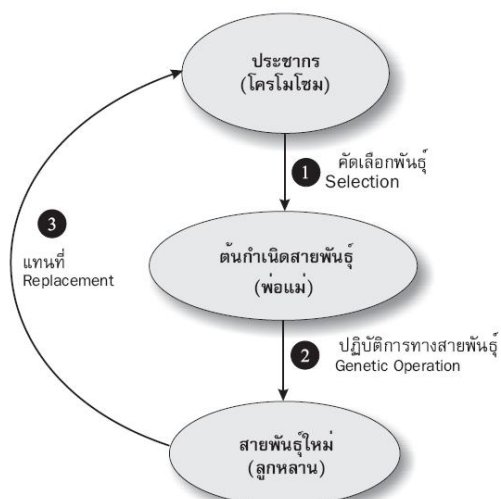
$$\frac{\omega(s)}{v_a(s)} = \frac{K_{add}K_t / J}{s^2 + s\left[\frac{R_a}{L_a} + \frac{B}{J}\right] + \left[\frac{R_a B}{L_a J} + \frac{k_e k_t}{L_a J}\right]} \quad (6)$$

โดยที่ K_{add} คือเกนชดเชยการเปลี่ยนหน่วยความเร็ว
รอบ rad/s ไปเป็น rpm

3 ระเบียบวิธีพันธุกรรม (GA)

ระเบียบวิธีทางปัญญาเชิงคำนวณ หรือปัญญาประดิษฐ์นั้น เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยอมรับกันมากในงานวิจัยในปัจจุบัน โดยสามารถนำมาใช้เป็นวิธีการในการแก้ปัญหา หรือค้นหาข้อแก้ไข หรือคำตอบของปัญหาต่างๆ ได้เป็นอย่างดี จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) ก็เป็นอีกหนึ่งวิธีการแก้ปัญหา (Problem Solving) หรือการค้นหา (Search) คำตอบ หรือข้อแก้ปัญหามาเหมาะสมที่สุด (Optimum) โดยการเลียนแบบวิธีการวิวัฒนาการ (Evolution) ของสิ่งมีชีวิต

วัฏจักรของ GA ประกอบด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ คือการคัดเลือกสายพันธุ์, ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ และการแทนที่ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วัฏจักรของ Genetic Algorithm [2]

ขั้นตอนการทำงานของ GA

1. สร้างประชากร โดยปกติจะใช้การสุ่ม (random)

2. ประเมินค่าประชากร (ประชากร 1 คนประกอบด้วย 1 โครโมโซม ซึ่งแต่ละโครโมโซมแทนชุดค่าคงที่ของแบบจำลอง และยีนแต่ละตัวใน 1 โครโมโซม เป็นตัวแทนของค่าคงที่แต่ละพจน์ของแบบจำลอง) ของกลุ่มประชากรทั้งหมดที่สุ่มได้จากข้อ 1 ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในที่นี้ คือ ค่าน้อยที่สุดของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานระหว่างแบบจำลองและผลการทดลอง
3. คำนวณค่าความเหมาะสมแล้วส่งกลับไปยัง GA
4. ใช้ค่าความเหมาะสมทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่ม เพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ และใช้เป็นตัวแทนในการถ่ายทอดสายพันธุ์ให้กับรุ่นถัดไป
5. นำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำการสร้างลูกหลานด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์ โครโมโซมที่ได้ในขั้นตอนนี้ก็คือโครโมโซมลูกหลาน
6. คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลาน โดยใช้ขั้นตอนเดียวกับข้อ 3
7. โครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยลูกหลานที่ได้จากข้อ 5 ประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ
8. เริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนในข้อ 2 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ คำตอบที่ได้จะมาจากโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มประชากร โดยที่สามารถใช้ค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการประเมินว่าคำตอบที่ได้เป็นที่ต้องการแล้วหรือไม่

GA จะดำเนินการไปเรื่อยๆ ให้ออกคำตอบที่ดีขึ้นจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local solution) ไปยังคำตอบวงกว้าง (Global solution) รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมจะยุติเมื่อเงื่อนไขการค้นหาสอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยทั่วไปจะอาศัยเงื่อนไข

เกี่ยวกับจำนวนรุ่นที่ต้องการ หรือความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ในการสิ้นสุดกระบวนการ คำตอบที่ดีที่สุดที่พบคือโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มของประชากร

4. วิธีการดำเนินงาน

4.1 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

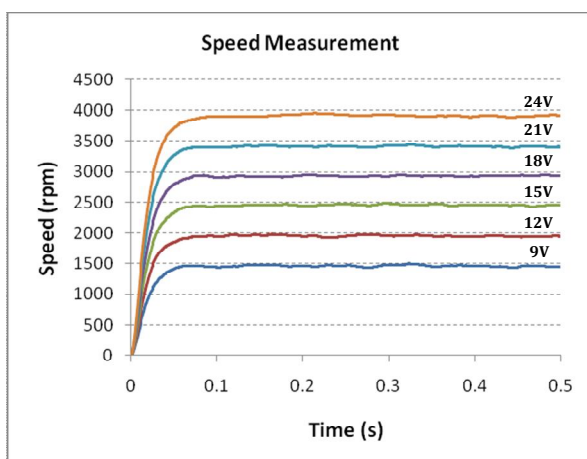
งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะค้นหาสัมประสิทธิ์ที่เป็นลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้แก่ 1.ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (R_a) 2.ความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ (L_a) 3.ค่าคงที่แรงบิด (K_t) 4.ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า (K_e) 5.โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ (J) และ 6.ค่าความหน่วงแรงบิด (B) โดยมอเตอร์ที่นำมาใช้ในการทดสอบหาเอกลักษณ์จะมีค่าจำเพาะต่างๆ ดังนี้

$$R_a = 1.596 \, \Omega \quad B = 0.000165 \, \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$$

$$L_a = 0.00614 \, \text{H} \quad K_e = 0.05368 \, \text{V}\cdot\text{s}/\text{rad}$$

$$K_t = 0.056 \, \text{N}\cdot\text{m}/\text{A} \quad J = 0.0000388 \, \text{kg}\cdot\text{m}^2$$

ในเบื้องต้นทำการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต 9, 12, 15, 18, 21, และ 24V ด้วยอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล (Data Acquisition) ที่สภาวะไร้ภาระแรงบิดจากภายนอกกระทำ ($T_f = 0$) โดยใช้อัตราการสุ่มสัญญาณ 1000 ครั้ง/วินาที ผลการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์แสดงดังกราฟในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลการวัดความเร็วรอบที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ

การทดสอบการค้นหาสัมประสิทธิ์เฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะกระทำโดยใช้ระเบียบวิธีทางปัญญาเชิงคำนวณแบบระเบียบวิธีพันธุกรรม โดยเปรียบเทียบผลการตอบสนองในรูปความเร็วรอบที่ได้จากการวัดกับผลการตอบสนองจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แรงดันอินพุต 9, 12, 15, 18, 21, และ 24V ตามลำดับ จากนั้นจะคำนวณความคลาดเคลื่อนของการตอบสนองรวมทั้งแรงดันอินพุตต่างๆ ที่ได้จากการค้นหาสัมประสิทธิ์ในแต่ละชุด

4.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขทางพันธุกรรม

ผู้วิจัยใช้ Genetic Algorithm Tool ของโปรแกรม MATLAB โดยสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) หรือฟังก์ชันค่าความเหมาะสมในรูปของ m-file และใช้การประมาณค่าสมการอนุพันธ์แบบเรียง-คู่ทหาอันดับสี่ (Fourth Order Runge-Kutta) เนื่องจากให้ผลการประมาณค่าอนุพันธ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง[4] จึงทำให้มีความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดกับความเร็วรอบที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 5 น้อยที่สุด และใช้ตัวอย่าง (ประชากร) 500 จุด โดยกำหนดจำนวนการสุ่มประชากรครั้งละ 100 จุด ใช้การคัดเลือกสายพันธุ์แบบจัดอันดับ (Ranking Selection) ชักตัวอย่างแบบเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล (Stochastic Universal Sampling) โดยมีการครอสโอเวอร์แบบกระจัดกระจาย (Scattered Crossover) และกำหนดจำนวนโครโมโซมสูงสุด 1000 รุ่น โดยในการทดสอบจะเก็บสัมประสิทธิ์ของโครโมโซมที่ดีที่สุดคือในรุ่นที่ 1000 มาเป็นคำตอบ

5. ผลการค้นหาสัมประสิทธิ์

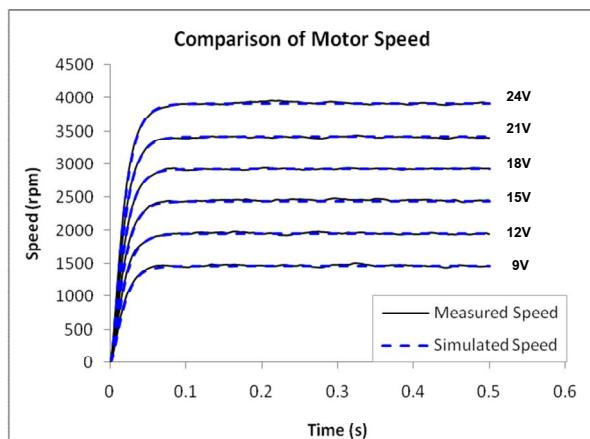
ผลการค้นหาสัมประสิทธิ์เฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันอินพุตต่างๆ จะแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับสัมประสิทธิ์ของโครโมโซม (สัมประสิทธิ์เฉพาะของมอเตอร์ทั้ง 6 ค่า) แต่ละชุดที่ได้จากการค้นหาที่แรงดันต่างๆ เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการที่ 6 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่แรงดันอินพุตต่างๆ ที่ใช้

ทดสอบ โดยชุดสัมประสิทธิ์ที่เลือกเป็นคำตอบคือ ชุดสัมประสิทธิ์เฉพาะที่ทำให้การตอบสนองต่อแรงดันอินพุตทั้ง 6 ระดับแรงดันของฟังก์ชันถ่ายโอน มีความคลาดเคลื่อนรวมต่ำที่สุด สำหรับชุดสัมประสิทธิ์คำตอบที่ให้ความคลาดเคลื่อนรวมต่ำที่สุด คือ ชุดสัมประสิทธิ์คำตอบที่ได้จากการวัดที่แรงดัน 24 V (ชุดคำตอบที่ 6) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 0.52443 % ดังแสดงในตารางที่ 2

ฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปของความเร็รรอบภายใต้อินพุตแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์เฉพาะที่เป็นคำตอบชุดที่ 6 ซึ่งได้จากการค้นหาและแทนค่าลงในสมการที่ 6 คือ

$$G(s) = \frac{2239854.91502338}{s^2 + 268.85043056s + 13582.65756859} \quad (7)$$

ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนข้างต้นเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ 9, 12, 15, 18, 21, และ 24V ตามลำดับ จะให้ผลการตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความเร็รรอบของมอเตอร์ที่ได้การวัดเปรียบเทียบกับความเร็รรอบที่ได้จากการจำลองที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ

6. สรุป

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการค้นหาแบบจีน

เนติกอัลกอริทึม ซึ่งผลการค้นหาชุดสัมประสิทธิ์คำตอบที่ถูกต้องที่สุดคือ ชุดสัมประสิทธิ์ที่ได้จากข้อมูลการวัดที่แรงดันไฟฟ้า 24 V ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานอาร์เมเจอร์ ความเหนี่ยวนำ โมเมนต์ความเฉื่อย ค่าคงที่แรงบิด ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า และค่าความหน่วงแรงบิด เท่ากับ 1.5999999 Ω , 0.0060385 H, 0.0000397 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, 0.05623 $\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$, 0.05352 $\text{V}\cdot\text{s}/\text{rad}$, 0.0001635 $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ ตามลำดับ โดยความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์ที่เป็นคำตอบดังกล่าวจะแสดงในตารางที่ 3

ผลของชุดสัมประสิทธิ์ที่ค้นหาได้ข้างต้น ทำให้ทราบว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบมีค่าดังสมการที่ 7 ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าว จะให้การตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ดังรูปที่ 4 โดยความคลาดเคลื่อนของความเร็รรอบที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ มีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.9 % คือมีความเร็รรอบคลาดเคลื่อนสูงสุดที่แรงดันอินพุต 9 V ซึ่งมีค่าเพียง 0.868488 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนและสัมประสิทธิ์ที่เป็นคำตอบมีความแม่นยำสูงมาก จึงแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการค้นหาคำตอบของจีนเนติกอัลกอริทึมได้เป็นอย่างดี

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การค้นหาสัมประสิทธิ์ด้วย GA นั้นเป็นการค้นหาแบบสุ่ม ค่าการประมาณของสัมประสิทธิ์ที่ได้จึงแตกต่างกันบ้าง ดังนั้นการกำหนดขอบเขตของคำตอบ และพารามิเตอร์อื่นๆ ต้องมีความเข้าใจ และต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ของคำตอบ

2. ความถูกต้องของคำตอบขึ้นอยู่กับความแม่นยำของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดสอบ เช่น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ระเบียบวิธีการประมาณค่าแบบรังกุททออันดับสี่ ย่อมให้คำตอบที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงกว่าระเบียบวิธีของออยเลอร์ ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ด้วยเช่นกัน

3. ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จะเป็นชุดคำตอบที่เหมาะสมในสถานะหนึ่งของระบบ ดังนั้นหากมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ คำตอบชุดนี้จะไม่ใช้ชุดคำตอบที่

ดีที่สุดอีกต่อไป และชุดคำตอบนี้ไม่สามารถนำไปใช้กับมอเตอร์อื่นๆได้ เนื่องจากมอเตอร์แต่ละรุ่น แต่ละชนิดนั้นมีความแตกต่างกัน

7. เอกสารอ้างอิง

[1] จิระพล ศรีเสริฐผล. (2548). *ระบบควบคุมอัตโนมัติ*, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[2] อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552) *ปัญญาเชิงคำนวณ*, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[3] Chee-Mun Ong. (1998). *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Prentice Hall PTR

[4] Chapra, S. C. and Canel, R. P. (1989). *Numerical method for engineer*, McGraw-Hill Book Company, New York.

ตารางที่ 1 ชุดสัมประสิทธิ์คำตอบที่ค้นหาได้จากข้อมูลการวัดที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ

Parameters	Exact Values	Approximate Values					
		Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6
		9 V	12 V	15 V	18 V	21 V	24 V
R_a	1.596	1.5800798	1.6100587	1.5997163	1.5912453	1.5845632	1.5999999
L_a	0.00614	0.00578299	0.0059031	0.0059726	0.0060589	0.0061468	0.0060385
J	0.0000388	0.0000357	0.0000297	0.0000361	0.0000389	0.0000342	0.0000397
K_t	0.056	0.05756	0.06009	0.0001474	0.05228	0.05228	0.05623
K_e	0.05368	0.05151	0.05352	0.05309	0.05151	0.05334	0.05352
B	0.000175	0.0001494	0.0001504	0.05623	0.0001594	0.0001594	0.0001635

ตารางที่ 2 ความคลาดเคลื่อนของการตอบสนองต่อแรงดันอินพุตต่างๆ ของชุดสัมประสิทธิ์คำตอบ

Voltage Input	Percent Error					
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6
9 V	0.23459	0.55251	0.82352	0.62125	0.88242	0.86849
12V	0.69897	0.15636	0.54510	0.89225	0.52523	0.54094
15V	0.76990	0.72426	0.24133	0.42536	0.62425	0.57724
18V	0.23569	0.71633	0.72342	0.24541	0.37534	0.29557
21V	0.86966	0.62523	0.62624	0.81212	0.42621	0.26951
24V	0.83265	0.82354	0.63442	0.62323	0.42322	0.33183
Average	0.66351	0.63725	0.62604	0.64177	0.56948	0.52443

หมายเหตุ ความคลาดเคลื่อนที่ใช้เป็นแบบ Root Mean Square

ตารางที่ 3 ความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์คำตอบที่ค้นหาได้ (ชุดคำตอบที่ 6)

Parameters	Exact Values	Approximate Values	Percent Error
R_a	1.596	1.5999999	0.250620
L_a	0.00614	0.0060385	1.653094
J	0.0000388	0.0000397	2.319588
K_t	0.056	0.05623	0.410714
K_e	0.05368	0.05352	0.298063
B	0.000175	0.0001542	6.571429