

# การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาค

ประสิทธิ์ สุขเสริม<sup>1</sup> และ เดชา พวงดาวเรือง<sup>2\*</sup>

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) ซึ่งเป็นเทคนิคการค้นหาเชิงอภิศึกษาสำนึกที่มีประสิทธิภาพ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจากห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมได้รับการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลสำคัญสำหรับกระบวนการระบุเอกลักษณ์ได้แก่ สัญญาณแรงดันอินพุตแบบขั้นบันไดและสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด การระบุเอกลักษณ์ได้รับการเปรียบเทียบกับจินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm: GA) และการค้นหาแบบตาบอด (tabu search: TS) จากผลการทดสอบพบว่า PSO สามารถระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างน่าพึงพอใจและมีความถูกต้องกว่า GA และ TS

**คำสำคัญ :** การระบุเอกลักษณ์ระบบ, การหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาค, จินเนติกอัลกอริทึม, การค้นหาแบบตาบอด

---

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

<sup>2</sup> บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: deachap@sau.ac.th รับเมื่อ 25 มิถุนายน 2556 ตอบรับเมื่อ 3 ตุลาคม 2556

## Model Identification of DC Generator using Particle Swarm Optimization

Prasit Sukserm<sup>1</sup> and Deacha Puangdownreong<sup>2\*</sup>

### Abstract

This paper proposes the model identification of a DC generator using the particle swarm optimization (PSO) which is one of the efficient metaheuristic search techniques. A DC generator in the engineering laboratory is tested to collect the useful data for identification process. Such the data are step input voltage and step output responses. For comparison, the genetic algorithm (GA) and the tabu search (TS) are conducted for identification. As results, it was found that the PSO can provide very satisfactory mathematical model of a DC generator with more accurate than GA and TS.

**Keywords :** System identification, Particle swarm optimization, Genetic algorithm, Tabu search

---

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, South-East Asia University.

<sup>2</sup> Graduate School, South-East Asia University.

\* Corresponding author, E-mail: deachap@sau.ac.th Received 25 June 2013, Accepted 3 October 2013

## 1. บทนำ

ในบริบทของวิศวกรรมระบบควบคุม การวิเคราะห์และการออกแบบระบบจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุมเสมอ การก่อรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบภายใต้การควบคุมโดยทั่วไปจะอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ตั้งอยู่บนหลักฟิสิกส์พื้นฐานของระบบที่สนใจ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบรวมทั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ปรากฏในแบบจำลองจะอธิบายความหมายทางฟิสิกส์ของระบบ แบบจำลองในลักษณะที่กล่าวมาข้างต้นในนาม แบบจำลองกล่องขาว (white-box model) [1] อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวอาจประสบปัญหาในกรณีที่ระบบที่สนใจมีความซับซ้อนสูง สำหรับระบบหรือกระบวนการภายใต้การควบคุมที่ไม่สามารถก่อรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีข้างต้นจะอาศัยการระบุเอกลักษณ์ระบบ (system identification) ซึ่งเป็นกระบวนการคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตที่สนใจโดยอาศัยข้อมูลความรู้เกี่ยวกับอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ได้จากการทดสอบ [1] โดยทั่วไปการทดสอบระบบเพื่อการระบุเอกลักษณ์จะใช้สัญญาณอินพุตแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (uniformly distributed random input) หรืออาจใช้สัญญาณทวิภาคสุ่มเทียม (pseudo random binary signal: PRBS) [2] แบบจำลองทั่วไปที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้นในนามแบบจำลองกล่องดำ (black-box model) ซึ่งจะอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบ แต่ค่าพารามิเตอร์ที่ปรากฏในแบบจำลองจะไม่มี

สมการอนุพันธ์แบบเต็มหน่วย อันได้แก่แบบจำลอง ARX, ARMAX, OE, และ BJ การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองอาศัยการวิเคราะห์เชิงถดถอย แนวทางการระบุเอกลักษณ์ดังกล่าวมานี้ได้รับการประยุกต์ใช้พอสมควร [1-3] อย่างไรก็ตามแม้ว่าแนวทางการระบุเอกลักษณ์ดังกล่าวจะมีข้อดีตรงที่สามารถให้การคำนวณเพื่อการระบุเอกลักษณ์หรือประมาณค่าพารามิเตอร์ได้อย่างรวดเร็วแต่มีข้อเสียตรงที่แบบจำลองจะมีลักษณะตายตัวอีกทั้งแบบจำลองกล่องดำในรูปของสมการอนุพันธ์จะไม่สามารถทำการระบุเอกลักษณ์ระบบไม่เชิงเส้นได้

ปัจจุบันได้มีการประยุกต์เทคนิคการค้นหาแบบอภิศักยภาพ (metaheuristic search technique) ซึ่งเป็นแขนงหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัต เช่น การประยุกต์จินเนติกอัลกอริทึม (GA) เพื่อระบุเอกลักษณ์ระบบลูกตุ้มผกผัน [4] การประยุกต์ GA เพื่อระบุเอกลักษณ์เครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัส [5] การประยุกต์ GA เพื่อระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [6] การประยุกต์การค้นหาแบบตราบู (TS) เพื่อระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [7] การประยุกต์ TS เพื่อระบุเอกลักษณ์ระบบไฟฟ้ากำลังและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง [8] และการประยุกต์ TS เพื่อระบุเอกลักษณ์กระบวนการทางความร้อน [9] เป็นต้น

การหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) เป็นเทคนิคการค้นหาเชิงอภิศักยภาพที่ได้รับการนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Reynolds ในปี ค.ศ.1987 [10-11] และได้รับการพัฒนาจนเป็นเครื่องมือสำหรับการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดโดย Kennedy และ Eberhart ในปี ค.ศ.1995 [12]

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า PSO ได้รับการประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น การประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง [13-14] ระบบควบคุม [15-16] ระบบพีซี [17] และระบบชาญฉลาด [18] เป็นต้น

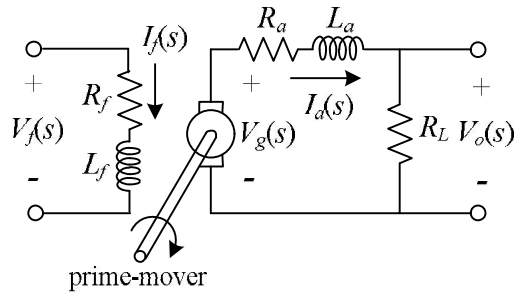
บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงด้วย PSO เพื่อเปรียบเทียบกับการระบุเอกลักษณ์ด้วย GA และ TS ในหัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึงการก่อรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง หัวข้อที่ 3 กล่าวถึงแนวคิดและอัลกอริทึมของวิธี PSO หัวข้อที่ 4 กล่าวถึง การทดสอบและการอภิปรายผล และหัวข้อที่ 5 กล่าวถึงบทสรุป

## 2. การก่อรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC generator) คือเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลจากตัวต้นกำลัง (prime-mover) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปของแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น (separately-excited DC generator) จะมีวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 1 [19] ที่ซึ่ง

- $R_f$  คือความต้านของขดลวดสนาม
- $L_f$  คือความเหนี่ยวนำของขดลวดสนาม
- $I_f(s)$  คือกระแสของขดลวดสนาม
- $V_f(s)$  คือแรงดันของขดลวดสนาม (อินพุต)
- $V_g(s)$  คือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- $R_a$  คือความต้านของขดลวดอาร์เมเจอร์
- $L_a$  คือความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์

- $R_L$  คือความต้านของโหลด
- $I_a(s)$  คือกระแสของขดลวดอาร์เมเจอร์
- $V_o(s)$  คือแรงดันของขดลวดอาร์เมเจอร์ (เอาต์พุต)



รูปที่ 1 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง แบบแยกกระตุ้น

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในส่วนของขดลวดสนามแสดงดังสมการที่ (1)

$$V_f(s) = (R_f + L_f s) I_f(s) \tag{1}$$

$$V_g(s) = K_g \omega I_f(s) \tag{2}$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $V_g(s)$  จะมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (2) [19] เมื่อ  $K_g$  คือคงตัวของเครื่องกำเนิด และ  $\omega$  คือความเร็วเชิงมุมจากรูปที่ 1 เราสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของ  $V_g(s)$  ได้ดังสมการที่ (3) และแรงดันของขดลวดอาร์เมเจอร์  $V_o(s)$  ดังสมการที่ (4)

$$V_g(s) = (R_a + R_L + L_a s) I_a(s) \tag{3}$$

$$V_o(s) = R_L I_a(s) \tag{4}$$

จากสมการที่ (1) – (4) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) เมื่อสัญญาณอินพุตคือ  $V_f(s)$  และสัญญาณเอาต์พุตคือ  $V_o(s)$  ดังสมการที่ (5)

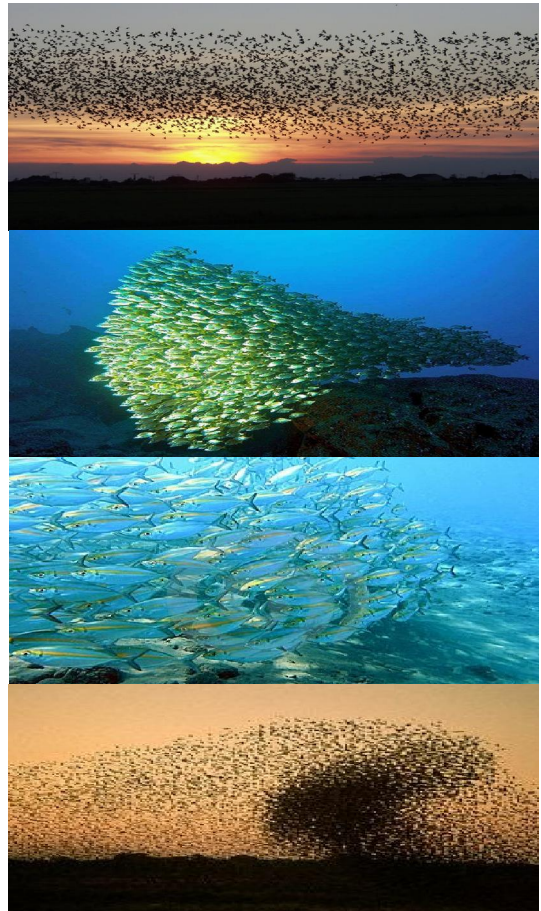
$$\frac{V_o(s)}{V_f(s)} = \frac{K_g R_L \omega}{(R_f + L_f s)(R_a + R_L + L_a s)} \quad (5)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงในสมการที่ (5) เป็นแบบจำลองกล่องขาว ที่ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ปรากฏภายในแบบจำลองจะอธิบายความหมายทางฟิสิกส์ของระบบ ปัญหาการระบุเอกลักษณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงในงานวิจัยนี้คือ กระบวนการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จำนวน 6 ตัว ได้แก่  $R_f, L_f, R_a, R_L, L_a$  และ  $K_g$  ที่เหมาะสมสำหรับการอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบอย่างถูกต้อง

### 3. อัลกอริทึมของ PSO

ต้นกำเนิดของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค หรือ PSO ได้รับการพัฒนาขึ้น Reynolds ในปี ค.ศ.1987 [10-11] ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากรูปแบบหรือกระแสน (pattern) การเคลื่อนที่ของฝูงสัตว์ เช่น ฝูงนก ฝูงปลา และฝูงแมลง เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2 การเคลื่อนที่ดังกล่าวจะตั้งอยู่บนหลักการใหญ่ ๆ 3 ประการ ได้แก่ การหลีกเลี่ยงการปะทะกันของฝูง การควบคุมความเร็วที่ตรงกันภายในฝูงและการเคลื่อนที่สู่ศูนย์กลางของฝูง หลักการดังกล่าวนำไปสู่พฤติกรรมของฝูงในธรรมชาติ นั่นคือการป้องกันตัวจากการล่า และการ

ค้นหาแหล่งอาหารอย่างมีประสิทธิภาพต่อมา Kennedy และ Eberhart ได้พัฒนา PSO ขึ้นในฐานะเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในปี ค.ศ.1995 [12]



รูปที่ 2 ฝูงสัตว์นำเสนอฟlockingอนุภาค

อัลกอริทึมของ PSO จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ กล่าวคือจะมีการสร้างกลุ่มประชากรขึ้น โดยเรียกว่า อนุภาค (particle) ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปทั่วปริภูมิการค้นหา (search space) อนุภาค

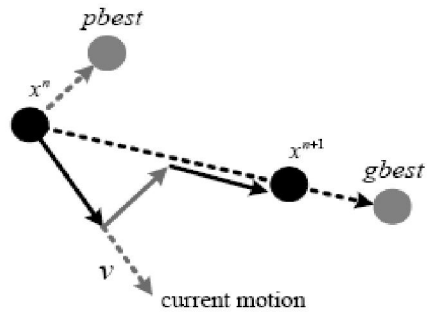
แต่ละตัวจะมีเวกเตอร์ความเร็ว และมีหน่วยความจำที่ใช้สำหรับเก็บค่าตอบที่ดีในอดีต โดยกำหนดให้  $pbest$  คือค่าตอบที่ดีในรอบการค้นหาปัจจุบัน และกำหนดให้  $gbest$  คือค่าตอบวงกว้าง (global solution) อนุภาคทั้งหมดจะเคลื่อนที่ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน อนุภาคที่อยู่ใกล้เป้าหมายที่สุดจะมีความแข็งแรงมากที่สุด และด้วยหลักการเคลื่อนที่แบบฝูงอนุภาคที่เหลือจะถูกปรับปรุงให้มีทิศทางการเคลื่อนที่คล้ายคลึงตามอนุภาคที่แข็งแรงมากที่สุด ซึ่งจะทำให้อนุภาคทั้งฝูงสามารถเคลื่อนที่สู่เป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในกรณีที่ฝูงอนุภาคมีจำนวน  $n$  ตัว พิจารณาปฏิภูมิการค้นหามิติ  $d$  และอนุภาคตัวที่  $i$  ภายในฝูง กำหนดให้เป็น  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$  ซึ่งมีเวกเตอร์ความเร็วเป็น  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$  และกำหนดให้ตำแหน่งของอนุภาคภายในฝูงเป็น  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$  การปรับปรุงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและค่าตอบที่พบแสดงดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ [17] เมื่อ  $x$  คืออนุภาคหรือค่าตอบ  $v$  คือเวกเตอร์ความเร็วที่แสดงทิศทางที่ได้รับการปรับปรุง  $w$  คือน้ำหนักความเฉื่อย  $c_1$  คือค่าความเร่งเชิงรู้จำ  $c_2$  คือค่าความเร่งของฝูง  $r_1$  และ  $r_2$  คือค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติภายในช่วง  $[0,1]$

ในกรณี 2 มิติ การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ได้รับการปรับปรุงทิศทางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3

$$v_{id}^{n+1} = wv_{id}^n + c_1r_1^n(x_{id}^{pbest} - x_{id}^n) + c_2r_2^n(x_{id}^{gbest} - x_{id}^n) \quad (6)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (7)$$



รูปที่ 3 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในปฏิภูมิ 2 มิติ

ค่าน้ำหนักความเฉื่อย  $w$  สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8) เมื่อ  $w_{max}$  คือค่าน้ำหนักมากที่สุด  $w_{min}$  คือค่าน้ำหนักน้อยที่สุด  $k_{max}$  คือจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดที่กำหนด และ  $k$  คือจำนวนรอบการค้นหาปัจจุบันสำหรับค่าที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานคือค่า  $c_1$  และ  $c_2$  ควรมีความอยู่ระหว่าง  $[1-2]$  ส่วนค่า  $w_{min}$  และ  $w_{max}$  ควรเท่ากับ 0.4 และ 0.9 ตามลำดับ [20] อัลกอริทึมของ PSO มีรายละเอียดดังนี้

$$w_i = w_{max} - k \left( \frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} \right) \quad (8)$$

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้น ได้แก่ปฏิภูมิการค้นหา จำนวนอนุภาค และ จำนวนรอบการค้นหาสูงสุด

ขั้นตอนที่ 2 สร้างอนุภาคด้วยกระบวนการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติตามจำนวนที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินความแข็งแรงของอนุภาคแต่ละตัวด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

ขั้นตอนที่ 4 ปรับปรุงทิศทางการเคลื่อนที่ให้คล้ายคลึงตามอนุภาคที่แข็งแรงที่สุดด้วยสมการที่ (6) และ (8)

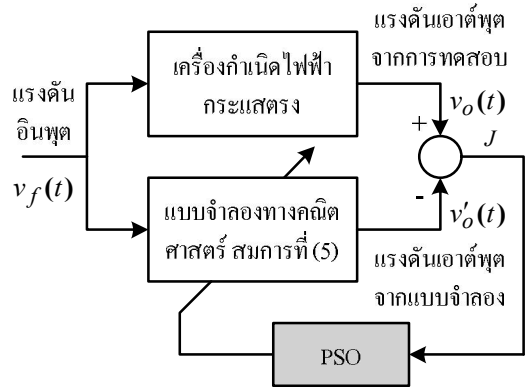
ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าคำตอบ (อนุภาค) ในรอบการค้นหาปัจจุบันด้วยสมการที่ (7)

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบเงื่อนไขยุติการค้นหาถ้าสอดคล้องแสดงว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้รับการค้นพบและให้ยุติการค้นหาไม่เช่นนั้นแล้วให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 3 เพื่อดำเนินการในรอบการค้นหาถัดไป

#### 4. การทดสอบและการอภิปรายผล

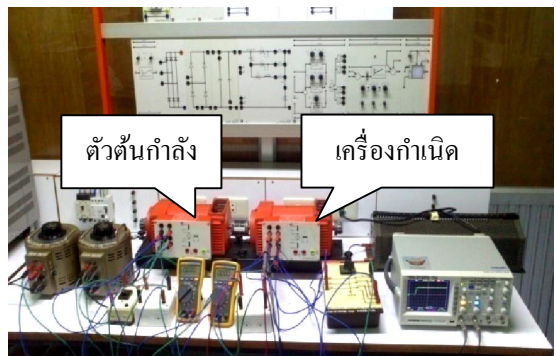
กระบวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงด้วย PSO สามารถอธิบายได้ดัง รูปที่ 4 กล่าวคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้จะได้รับการทดสอบด้วยการกระตุ้นแรงดันอินพุต  $v_f(t)$  และบันทึกแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดที่ได้จากการทดสอบ  $v_o(t)$  จากนั้นทำการจำลองระบบด้วยการกระตุ้นแรงดันอินพุต  $v_f(t)$  เข้ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงดังสมการที่ (5) เพื่อผลิตแรงดันเอาต์พุตจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์  $v'_o(t)$  กำหนดให้  $J$  คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาที่มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่าง  $v_o(t)$  และ  $v'_o(t)$  ดังสมการที่ (9)  $J$  จะถูกทำให้มีค่าน้อยที่สุดด้วยการป้อนให้กับ PSO เพื่อ คำนวณ การ ค้นหา ค่า พารามิเตอร์  $R_f, L_f, R_a, R_L, L_a$  และ  $K_g$  ที่เหมาะสม และถึงแม้ว่าค่าพารามิเตอร์บางตัว อย่างเช่น  $R_f$  และ  $R_a$  จะสามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือวัดโดยตรง แต่ในงานวิจัยนี้จะตั้งข้อกำหนดว่าค่าพารามิเตอร์ทุกตัวไม่สามารถวัดได้โดยตรง ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ

$$J = \sum_{i=1}^N \|v_o(i) - v'_o(i)\| \quad (9)$$



รูปที่ 4 การระบุเอกลักษณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย PSO

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัท LEYBOLD-DIDACTIC GMBH TYP731-91 พิกัด 220V, 2.2A, 0.3kW, 2000 min<sup>-1</sup> และใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของบริษัท LEYBOLD-DIDACTIC GMBH TYP731-91 พิกัด 220V, 2.2A, 0.3kW, 2000 min<sup>-1</sup> เป็นตัวต้นกำลัง การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อการระบุเอกลักษณ์แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อการระบุเอกลักษณ์

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะได้รับ การทดสอบที่จุดปฏิบัติการทั้งหมด 3 ระดับ นั่นคือที่ ระดับแรงดันเท่ากับ 60 V, 100 V และ 140 V ตามลำดับ เพื่อเก็บข้อมูลสำคัญสำหรับกระบวนการระบุเอกลักษณ์ ได้แก่สัญญาณแรงดันอินพุตแบบขั้นบันไดและสัญญาณ แรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด

การระบุเอกลักษณ์ระบบ โดยทั่วไปจะต้องแบ่ง ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบออกเป็นสองส่วน ข้อมูล ส่วนแรกจะถูกใช้เพื่อการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองของ ระบบ (model identification) ในขณะที่ข้อมูลส่วนหลัง จะถูกใช้เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (model validation) [1-2] แนวทางดังกล่าวจะทำให้กับ ระบบที่จุดปฏิบัติการเดียว ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลอง ออกมาเพียงชุดเดียวเท่านั้น โดยที่สัญญาณอินพุตที่ใช้ ทดสอบระบบจะต้องเป็นสัญญาณสุ่มที่มีการกระจาย แบบสม่ำเสมอ หรือสัญญาณ PRBS อย่างไรก็ตาม สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นระบบใน งานวิจัยนี้ไม่สามารถใช้สัญญาณดังกล่าวเป็นสัญญาณ อินพุตได้ และการที่ระบบมีความไม่เชิงเส้นในลักษณะ “เชิงเส้นเป็นช่วง” (piecewise linear) จึงเลือกใช้ สัญญาณแบบขั้นบันได (step input) เป็นสัญญาณอินพุต จำนวน 3 ระดับ เพื่อทำการทดสอบ ซึ่งจะทำให้ได้ แบบจำลองออกมาจำนวน 3 ชุด สำหรับใช้อธิบายระบบ ในแต่ละจุดปฏิบัติการ

กำหนดให้ปริภูมิการค้นหาของค่าพารามิเตอร์แต่ละ ตัวในสมการที่ (5) มีค่าเป็น  $R_f \in [400, 450]$ ,  $L_f \in [0, 30]$ ,  $R_a \in [0, 10]$ ,  $R_L \in [0, 100]$ ,  $L_a \in [0, 1]$ , และ  $K_g \in [0, 20]$  การระบุเอกลักษณ์ของเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้ากระแสตรงจะดำเนินการเปรียบเทียบกันระหว่าง PSO, GA และ TS การกำหนดค่าตัวประกอบการค้นหา ของอัลกอริทึมแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

อัลกอริทึมของ PSO กำหนดให้จำนวนอนุภาค ทั้งหมดเท่ากับ 300 ตัว  $c_1 = c_2 = 1.8$ ,  $w_{\min} = 0.4$  และ  $w_{\max} = 0.9$  ค่าพารามิเตอร์ของ PSO ดังกล่าวข้างต้น ได้มาจากคำแนะนำที่ปรากฏใน [20] ซึ่งถือเป็นค่าทั่วไป ที่สามารถใช้ได้กับทุกปัญหา กำหนดจำนวนรอบการ ค้นหาสูงสุดเท่ากับ 1,000 รอบ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขยุติ การค้นหา

อัลกอริทึมของ GA (สำหรับผู้อ่านที่สนใจสามารถ ศึกษาได้จาก [4-6]) กำหนดให้จำนวนประชากรทั้งหมด เท่ากับ 300 ตัว การแลกเปลี่ยนโครโมโซมเท่ากับ 75% การกลายพันธุ์ 25% และใช้หลักการแทนที่ตำแหน่ง เดียว ค่าพารามิเตอร์ของ GA ดังกล่าวได้มาจาก คำแนะนำที่ปรากฏใน [5-6] ซึ่งถือเป็นค่าทั่วไปที่ สามารถใช้ได้กับทุกปัญหา กำหนดให้จำนวนรอบการ ค้นหาสูงสุดเท่ากับ 1,000 รอบ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขยุติ การค้นหาเช่นเดียวกัน

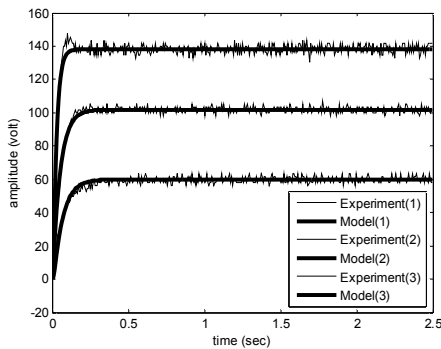
อัลกอริทึมของ TS (สำหรับผู้อ่านที่สนใจสามารถ ศึกษาได้จาก [7-9]) กำหนดให้ค่าใกล้เคียงทั้งหมด เท่ากับ 300 ตัว รัศมีการค้นหาเท่ากับ 20% ของปริภูมิ การค้นหาพารามิเตอร์ของ TS ดังกล่าวได้มาจาก คำแนะนำที่ปรากฏใน [8-9] ซึ่งถือเป็นค่าทั่วไปที่ สามารถใช้ได้กับทุกปัญหาและกำหนดให้จำนวนรอบ การค้นหาสูงสุดเท่ากับ 1,000 รอบ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไข ยุติการค้นหาเช่นเดียวกัน

อัลกอริทึมของ GA, TS และ PSO ได้รับการพัฒนา เป็นโปรแกรมการค้นหาด้วย MATLAB เพื่อการ



ประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel Core2 Duo 2.0 GHz, 3 Gbytes DDR-RAM

ผลการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรงด้วย GA แสดงดังรูปที่ 6 ตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า GA สามารถระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรงได้อย่างน่าพึงพอใจ และแบบจำลองที่ได้สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 6 ผลการระบุเอกลักษณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย GA

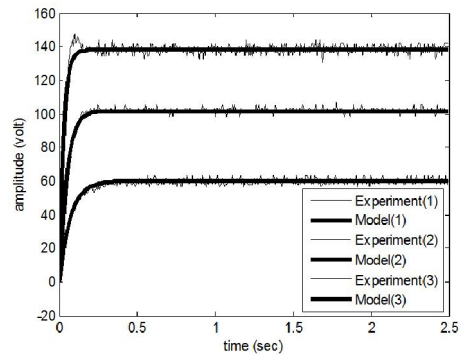
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก GA

แรงดัน	$K_g$	$R_L$	$R_f$	$L_f$	$R_a$	$L_a$
60V(1)	10.86	84.51	407.49	28.43	7.91	0.25
100V(2)	9.62	91.20	441.79	20.01	7.77	0.47
140V(3)	7.67	69.10	421.54	18.03	8.32	0.18

ตารางที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จาก GA

แรงดัน	ฟังก์ชันถ่ายโอน (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์)
60V(1)	$\frac{2.562 \times 10^4}{7.133s^2 + 2729s + 3.766 \times 10^4}$
100V(2)	$\frac{2.449 \times 10^4}{9.496s^2 + 2189s + 4.372 \times 10^4}$
140V(3)	$\frac{1.480 \times 10^4}{3.185s^2 + 1470s + 3.263 \times 10^4}$

ผลการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรงด้วย TS แสดงดังรูปที่ 7 ตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า TS สามารถระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรงได้อย่างน่าพึงพอใจ และสามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้อง เช่นเดียวกับ GA



รูปที่ 7 ผลการระบุเอกลักษณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย TS

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก TS

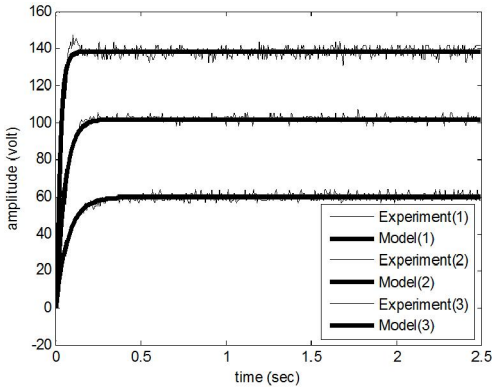
แรงดัน	$K_g$	$R_L$	$R_f$	$L_f$	$R_a$	$L_a$
60V(1)	10.87	75.70	402.02	24.75	8.35	0.81
100V(2)	10.67	51.64	447.13	22.09	9.82	0.03
140V(3)	7.29	50.14	401.40	11.37	5.96	0.75

ตารางที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จาก TS

แรงดัน	ฟังก์ชันถ่ายโอน (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์)
60V(1)	$\frac{2.298 \times 10^4}{19.95s^2 + 2404s + 3.379 \times 10^4}$
100V(2)	$\frac{1.539 \times 10^4}{0.7066s^2 + 1372s + 2.748 \times 10^4}$
140V(3)	$\frac{1.012 \times 10^4}{8.519s^2 + 938.4s + 2.252 \times 10^4}$

ผลการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรงด้วย PSO แสดงดังรูปที่ 8 ตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า PSO สามารถระบุเอกลักษณ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อย่างน่าพึงพอใจ และสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องเช่นเดียวกับ GA และ TS



**รูปที่ 8** ผลการระบุเอกลักษณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย PSO

**ตารางที่ 5** ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก PSO

แรงดัน	$K_g$	$R_L$	$R_f$	$L_f$	$R_a$	$L_a$
60V(1)	10.84	90.42	406.84	29.96	8.50	0.01
100V(2)	9.41	93.17	438.70	20.68	6.47	0.40
140V(3)	8.20	52.12	443.37	13.29	7.24	0.94

**ตารางที่ 6** แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จาก PSO

แรงดัน	ฟังก์ชันถ่ายโอน (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์)
60V(1)	$\frac{2.737 \times 10^4}{0.3884s^2 + 2969s + 4.025 \times 10^4}$
100V(2)	$\frac{2.448 \times 10^4}{8.348s^2 + 2237s + 4.371 \times 10^4}$
140V(3)	$\frac{1.193 \times 10^4}{12.53s^2 + 1207s + 2.632 \times 10^4}$

**ตารางที่ 7** การเปรียบเทียบผลการทดสอบค่า  $J$

แรงดัน	อัลกอริทึม		
	GA	TS	PSO
60V(1)	290.71	305.38	284.21
100V(2)	256.22	255.90	253.54
140V(3)	414.07	386.41	372.87
ค่า $J$ เฉลี่ย	<b>320.33</b>	<b>315.90</b>	<b>303.54</b>

**ตารางที่ 8** การเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าเวลาค้นหา

แรงดัน	อัลกอริทึม		
	GA	TS	PSO
60V(1)	281.81	280.46	268.64
100V(2)	276.47	273.54	265.01
140V(3)	276.62	273.88	267.87
ค่าเวลาค้นหาเฉลี่ย (วินาที)	<b>278.30</b>	<b>275.96</b>	<b>267.17</b>

จากผลการเปรียบเทียบค่า  $J$  ในตารางที่ 7 พบว่า PSO สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องกว่า TS และ GA เนื่องจากค่า  $J$  ที่ได้จาก PSO มีค่าน้อยกว่าค่า  $J$  ที่ได้จาก TS และ GA ตามลำดับ และจากผลการเปรียบเทียบค่าเวลาในการค้นหาค่าตอบดังตารางที่ 8 พบว่า PSO จะใช้เวลาในการค้นหาค่าตอบที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ GA และ TS ในทุกระดับแรงดัน

### 5. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอภิศักยภาพ (PSO) ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมสำหรับการอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้อง ผลการทดสอบการระบุเอกลักษณ์ด้วย PSO ได้รับการเปรียบเทียบกับจินเนติกอัลกอริทึม (GA) และ การค้นหาแบบตาบอด (TS) จากผลการทดสอบพบว่าทั้ง GA, TS และ PSO สามารถระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างน่าพึงพอใจ แบบจำลองที่ได้จาก GA สามารถอธิบาย

พฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่แบบจำลองที่ได้จาก TS สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตได้อย่างถูกต้องกว่า GA อีกทั้งใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยกว่า GA และแบบจำลองที่ได้จาก PSO สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องกว่า GA และ TS โดยใช้เวลาเฉลี่ยในการค้นหาคำตอบที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ GA และ TS

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Ljung, “*System identification: Theory for the user*”, Prentice-Hall, 1987.
- [2] P. Eykhoff, “*System identification: Parameter and State Estimation*”, John Wiley & Sons, 1974.
- [3] J. Leontaritis and S. A. Billings, “Input-Output Parametric Models for Nonlinear Systems (Part I: Deterministic Nonlinear Systems, and Part II: Stochastic Nonlinear Systems)”, *Int. J. Control* 41(2), 1985, pp. 303-328 and 329-344.
- [4] D. Puangdownreong, “Model identification of Cart-plus-Pendulum system using genetic algorithm”, *International Conference of IEEE-TENCON 2006*, Hong Kong, 2006.
- [5] P. Pao-la-or, T. Kulworawamichpong, and A. Ooonsivilai, “Frequency domain parameter estimation of a synchronous generator using bi-objective genetic algorithms”, *The 7<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization*, Beijing, China, 2007, pp.429-433.
- [6] N. Naewngerndee and T. Kulworawamichpong, “Voltage-dependent parameter refinement for single-phase induction motors using genetic algorithms”, *WSEAS Transactions on Systems and Control* 1(4), 2009, pp. 45-54.
- [7] T. Kulworawamichpong, K.L. Areerak, K.N. Areerak, P. Pao-la-or, D. Puangdownreong, and S. Sujitjorn, “Dynamic parameter identification of induction motors using intelligent search techniques”, *The 24<sup>th</sup> IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC2005)*, Innsbruck, Austria, 2005, pp. 328-332.
- [8] D. Puangdownreong, K.N. Areerak, K.L. Areerak, T. Kulworawamichpong, and S. Sujitjorn, “Application of adaptive tabu search to system identification”, *The 24<sup>th</sup> IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC2005)*, Innsbruck, Austria, 2005, pp. 178-183.
- [9] D. Puangdownreong, K.N. Areerak, A. Srikaew, S. Sujitjorn, and P. Totarong, “System identification via adaptive tabu search”, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT’02)*, Bangkok, Thailand, vol. 2, 2002, pp. 915-920.
- [10] C. W. Reynolds, “Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model”, *Computer Graphics*, 1987, pp.25-34.

- [11] J. Kennedy and R. Eberhart, “*Swarm Intelligence*”, Morgan Kaufman, 2001.
- [12] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization”, Proceeding of IEEE Conference on Neural Networks, vol. IV, 1995, pp.1942-1948.
- [13] J.B. Park, K. S. Lee, J. R. Shin, and K. Y. Lee, “A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost function”, IEEE Transaction on Power Systems 20 (1), 2005, pp.34-42.
- [14] W. Krueasuk, W. Chankaipol, S. Hintamai, and K. Chayakulkheeree, “Particle swarm optimization for optimal dg placement in distributed system”, Proceeding of ECTI2007, vol. 1, 2007, pp.293-296.
- [15] Z.L. Gaing, “A particle swarm optimization approach for optimum design of pid controller in avr system”, IEEE Transaction on Energy Conversion 19 (2), 2006, pp.384-391.
- [16] S.P. Ghoshal, “Optimization of PID gains by particle swarm optimizations in fuzzy based automatic generation control”, Electric Power System Research 72, 2007, pp.203-212.
- [17] K.S. Kumar, K.K. Aggarwal, and J. Singh, “Design of fuzzy models through particle swarm optimization”, Integrated Intelligent Systems for Engineering Design, IOS Press, 2006, pp.43-62.
- [18] R. Eberhart and Y. Shi, “Particle swarm optimization: Developments, applications and resources”, Proceeding of the Congress on Evolutionary Computation, 2001, pp.81-86.
- [19] M.E. Downs, “The design of a direct current generator field controller”, Master Thesis, Mechanical Engineering, University of Missouri-Rolla, 1996.
- [20] R. Eberhart and Y. Shi, “Comparing inertial weights and constriction factor in particle swarm optimization”, Proceeding of International Congress on Evolutionary Computation, 2000, pp.84-88.