

การระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้

Parameter identification of DC motor model by flower pollination algorithm

دنۇپل كۇمپانىا^{1*}

Danupon Kumpanya^{1*}

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้องอาศัยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ถูกต้อง บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงบนพื้นฐานของขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ ซึ่งเป็นเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงฮิวริสติกที่ได้รับความนิยมที่ได้รับการนำเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ. 2012 โดยเลียนแบบกระบวนการผสมเกสรของดอกไม้ตามธรรมชาติผนวกกับการบินแบบเลวี ภายใต้การทดสอบระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ถูกกระตุ้นจากอินพุตแบบขั้นบันไดให้เกิดระดับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ถูกพิจารณาเป็นเอาต์พุตของระบบ ผลการระบุเอกลักษณ์จะเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ได้รับจากการค้นหาแบบนกกาเหว่าพบว่า ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ให้ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่แสดงพลวัตของระบบดีกว่าแบบจำลองที่ได้รับจากการค้นหาแบบนกกาเหว่า รายละเอียดจะได้กล่าวถึงและแสดงไว้ในบทความนี้

คำสำคัญ: การระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ ฮิวริสติก

Abstract

Analysis and design of the direct current (DC) motor speed control system require its accurate model parameters. This paper proposes the parameter identification of the DC motor model based on the flower pollination algorithm (FPA), one of the metaheuristic optimization search techniques. The FPA firstly proposed in 2012, mimics the pollination process of flowering tree in nature associated with Lévy Flight. Under testing, the DC motor system was excited by the step input to generate the specific level of the motor speed considered as the output of the system. As identification results compared with the model obtained by the cuckoo search (CuS), it was found that the FPA gave the model parameters representing system dynamics superior to the model obtained by the CuS. Details are discussed and shown in the paper.

Keywords: parameter identification, DC motor, flower pollination algorithm, metaheuristic

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี 72130

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi campus 72130

* Corresponding author. E-mail: kdanupon@yahoo.com

บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนที่สำคัญอย่างหนึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมเพราะว่ามีคุณสมบัติที่ดีเด่นในด้านการปรับความเร็วได้ตั้งแต่ความเร็วต่ำสุดจนถึงสูงสุด นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม (Yadav, and Tripathi, 2006) ในบริบทที่เกี่ยวกับวิศวกรรมระบบควบคุม การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมความเร็ว มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะต้องอาศัยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ถูกต้อง (Krishnan, 2001) ดังนั้นโดยทั่วไป ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสามารถหาจากการยึดโรเตอร์ (blocked-rotor) การปลดโหลดทางกล (no-load) และการทดสอบความหน่วง (retardation tests) (Vas, 1993) อย่างไรก็ตาม ค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับโดยการทดสอบจากวิธีการเหล่านี้มักจะไม่ต้องอันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนและเกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการทดสอบ (Vas, 1993) อีกวิธีหนึ่งในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคือ วิธีการระบุเอกลักษณ์ (identification method) แบบดั้งเดิมแบบจำลองและการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ต้องการทราบอินพุตและเอาต์พุตของระบบ ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบโดยตรง (Ljung, 1987; Eykhoff, 1974) ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจะได้รับจากการวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis) ด้วยวิธีนี้ แบบจำลองที่ได้รับจะเป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นกล่องดำ (black-box) ประกอบด้วย ARX ARMAX OE และ BJ ตามลำดับ โดยวรรณกรรมที่ผ่านมา การระบุเอกลักษณ์แบบดั้งเดิมได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบเชิงเส้น (Leontaritis and Billings, 1985a) และไม่เชิงเส้น (Leontaritis and Billings, 1985b) ถึงแม้ว่า

รูปแบบที่ถูกปิดจะให้ประโยชน์ในการคำนวณอย่างรวดเร็ว ข้อเสียเปรียบที่สำคัญคือ ข้อจำกัดของประเภทของแบบจำลองที่มีสมการแตกต่างกันและอื่นๆ นอกจากนี้ยังเป็นไปไม่ได้ที่จะประยุกต์วิธีการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองกับรูปแบบอื่นได้ จากที่ผ่านมาเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงอภิศักษาสำนึก (metaheuristics optimization techniques) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในงานวิศวกรรม (Talbi, 2009; Yang, 2010) โดยเฉพาะวิศวกรรมระบบควบคุม (Zakian, 2005; Sandou, 2013) ไม่ว่าจะเป็นการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองของระบบหรือการออกแบบตัวควบคุมต่างๆ จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าอภิศักษาลำนึกสามารถแบ่งออกเป็นอภิศักษาลำนึกแบบอิงวิถีการค้นหา (trajectory-based metaheuristics) หรืออาจจะเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า อภิศักษาลำนึกแบบอิงผลเฉลยเดียว (single-solution based metaheuristics) ซึ่งมีประสิทธิภาพที่โดดเด่นในการค้นหาผลเฉลยเฉพาะที่ (local solution) และอภิศักษาลำนึกแบบอิงประชากร (population-based metaheuristics) ซึ่งมีความโดดเด่นในการค้นหาผลเฉลยวงกว้าง (global solution) โดยทั่วไปอภิศักษาลำนึกจะมีขั้นตอนวิธีที่อาศัยการสร้างผลเฉลยด้วยการสุ่มค่าที่มีลักษณะการแจกแจงแบบเอกรูป (uniformly distribution) นอกจากนี้ หากต้องการให้อภิศักษาลำนึกที่ได้กล่าวมานี้ มีประสิทธิภาพในการค้นหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (optimal solution) เท่าเทียมกันจะต้องให้เวลาที่ใช้ในการค้นหาผลเฉลยที่เพียงพอ

ในบรรดาเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดของอภิศักษาลำนึกแบบอิงประชากร การค้นหาแบบนกกาเหว่า (cuckoo search: CuS) ได้รับการนำเสนอโดย Yang and Deb (2009) ได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีการที่

มีประสิทธิภาพมาก (Yang and Deb, 2009; Yang and Deb, 2010) อัลกอริทึมของ CuS จะเป็นการเลียนแบบเอาพฤติกรรมการวางไข่ของนกกาเหว่าในรังนกชนิดอื่นผสานการบินแบบเลวี (Levi flight) ซึ่งเป็นรูปแบบการบินของแมลงบางชนิด เช่น แมลงวันหรือผีเสื้อ (Pavlyukevich, 2007a; Pavlyukevich, 2007b) ที่มีคุณสมบัติในการแจกแจงค่าได้ดีกว่าการสุ่มแบบเอกรูปนำมาออกแบบเป็นอัลกอริทึม ทั้งนี้ สมรรถนะของ CuS ได้รับการประเมินเปรียบเทียบกับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดกับค่ามาตรฐานจำนวนมาก ทั้งแบบไม่มีเงื่อนไข (unconstraint) มีเงื่อนไข (constraint) การกำหนด (deterministic) การสุ่ม (stochastic) วัตถุประสงค์เดียว (single-objective) และหลายวัตถุประสงค์ (multi-objective) (Yang and Deb, 2010; Yang and Deb, 2013; Yang and Deb, 2014) จากวรรณกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า CuS มีประสิทธิภาพสูงและได้รับความนิยมในอัลกอริทึมของนักศึกษาสำนักแบบอิงประชากรมากกว่าวิธีการอื่นๆ ที่มีอยู่ เช่น จีแนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm: GA) ที่อาศัยหลักการกลายพันธุ์และการแลกเปลี่ยนข้ามยีนส์ เพื่อให้กำเนิดลูกหลานในแต่ละรุ่นของสายพันธุ์ (Goldberg, 1989) และการหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) ที่ตั้งอยู่บนการเคลื่อนของอนุภาคตามเวกเตอร์ที่เหมาะสม (Kennedy and Eberhart, 1995) ปัจจุบัน Yang (2012) ได้นำเสนอเทคนิคการค้นหาแบบนักศึกษาสำนักวิธีการใหม่ ซึ่งเป็นการเลียนแบบกระบวนการผสมเกสรดอกไม้ของไม้ดอกตามธรรมชาติ เรียกว่า ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ (flower pollination algorithm: FPA) ผสานการบินแบบเลวี FPA โดยได้รับการประเมินประสิทธิภาพการค้นหาผลเฉลยกับฟังก์ชัน

มาตรฐานวัตถุประสงค์เดียว (Balasubramani and Marcus, 2014; Sakib, Kabir, Rahman, and Alam, 2014) และหลายวัตถุประสงค์ (Yang, Karamanoglou, and He, 2013; Yang, Karamanoglou, and He, 2014) นอกจากนี้ FPA ได้รับการประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมต่างๆ เช่น การออกแบบท่อความดัน การออกแบบระบบดิสก์เบรก (Yang, Karamanoglou, and He, 2013) การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ (proportional-integral-derivative-acceleration: PIDA) (เดชา พวงดาวเรือง, ไชโย ธรรมรัตน์, อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร, และสาโรจน์ หลั่งน้ำทิพย์, 2559) และการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี (proportional-integral-derivative: PID) (เดชา พวงดาวเรือง, ไชโย ธรรมรัตน์, อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร, และสาโรจน์ หลั่งน้ำทิพย์, 2560; Lastomo, Djalal, Wido, and Robandi, 2015) บทความนี้ อภิศึกษาสำนักทั้ง CuS และ FPA ถูกประยุกต์ใช้ในการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ผลที่ได้รับจากการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงระบบที่เกิดขึ้นจริงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในบทความนี้

วิธีการศึกษา

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แผนภาพพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ควบคุมอาร์เมเจอร์ (armature) ดังแสดงใน (Figure 1) (Ogata, 2010; Ketthong, Kiree, Tunyasritut, and Puangdownreong, 2015) โดยที่ R_a คือ ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature-winding resistance)

L_a คือ ความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature-winding inductance) R_f คือ ความต้านทานขดลวดสนาม (field-winding resistance) L_f คือ ความเหนี่ยวนำขดลวดสนาม (field-winding inductance) J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia) B คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากความหนืด (viscous-friction coefficient) $e_a(t)$ คือ แรงดันของขดลวดอาร์เมเจอร์ (applied armature voltage) $i_a(t)$ คือ กระแสของขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature current) $e_f(t)$ คือ แรงดันของขดลวดสนาม

(field voltage) $i_f(t)$ คือ กระแสของขดลวดสนาม (field current) $e_b(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับ (back electromotive force หรือ back EMF voltage) $T(t)$ คือ แรงบิดของมอเตอร์ (motor torque) $\theta(t)$ คือ การขจัดเชิงมุม (angular displacement) และ $\omega(t)$ คือ อัตราความเร็วเชิงมุม (angular velocity) ตามลำดับ เมื่อ $e_a(t)$ ถูกพิจารณาเป็นอินพุตของระบบและ $\omega(t)$ หมายถึงเอาต์พุตของระบบ

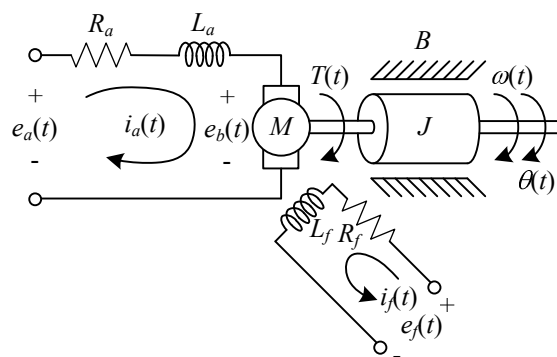


Figure 1 Schematic diagram of DC motor (Ogata, 2010; Ketthong, Kiree, Tunyasirut, and Puangdownreong, 2015).

จาก (Figure 1) แรงดันของขดลวดอาร์เมเจอร์ $e_a(t)$ สำหรับส่วนทางไฟฟ้า (electrical part) แสดงได้ดังสมการที่ (1) โดยที่ K_b คือ ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับ (back EMF constant) สำหรับการหมุนของส่วนทางกล (mechanical part) แรงบิดของมอเตอร์ $T(t)$ แสดงได้ดังสมการที่ (2) โดยที่ K_t คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์ (motor constant) ในทางปฏิบัติมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกขับเคลื่อนด้วยอุปกรณ์

ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronics devices) ซึ่งสามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่ง โดยที่ K_A คือ ค่าคงที่วงจรรขยายกำลัง (power amplifier constant) และ τ_A คือ ค่าคงที่เวลาวงจรรขยายกำลัง (power amplifier time constant) ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมอาร์เมเจอร์ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน แสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_b \omega(t), \quad e_b(t) = K_b \omega(t) \quad (1)$$

$$T(t) = K_i i_a(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (2)$$

$$\frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \left(\frac{K_A}{\tau_A s + 1} \right) \left(\frac{K_i}{JL_a s^2 + (BL_a + JR_a)s + (BR_a + K_i K_b)} \right) \quad (3)$$

2. ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้

ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ (flower pollination algorithm: FPA) (Yang, 2012) ได้รับแรงบันดาลใจจากกระบวนการผสมเกสรดอกไม้ของไม้ดอกตามธรรมชาติ ที่สัปดาห์ออกมาเป็นขั้นตอนวิธีเพื่อหาผลเฉลยที่เหมาะสมกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) สำหรับกระบวนการผสมเกสรดอกไม้ดังแสดงใน (Figure 2) จะแบ่งเป็นการผสมเกสรดอกไม้ในต้นเดียวกัน (self-pollination) คือ การผสมเกสรดอกไม้ในดอกเดียวกัน (autogamy) หรือ คนละดอกแต่ยังอยู่ในต้นเดียวกัน (geitonogamy) (Chittka, Thomson, and Waser, 1999; Willmer, 2011) และการผสมเกสรดอกไม้ข้ามต้น (cross-pollination) คือ การผสมเกสรดอกไม้แบบข้ามดอก (จากดอกหนึ่งไปสู่อีกดอกหนึ่ง) โดยการผสมเกสรดอกไม้จะมีตัวนำพาเกสรดอกไม้ (pollinator) ที่คอยช่วยผสมเกสรให้กับดอกไม้ในต้นเดียวกันและต่างต้นกัน โดยตัวนำพาเกสรดอกไม้มีลักษณะดังนี้ ตัวนำพาเกสรดอกไม้แบบสิ่งมีชีวิต (biotic pollination) ได้แก่ ผึ้ง นก แมลง และค้างคาว เป็นต้น และตัวนำพาแบบสิ่งไม่มีชีวิต (abiotic pollination) ได้แก่ ลมและน้ำ อย่างไรก็ตามการผสมเกสรดอกไม้ในดอกเดียวกันหรือคนละดอกแต่ในต้นเดียวกันที่มีระยะทางใกล้ๆ ไม่จำเป็นต้องพึ่งพาตัวนำพาเรียกว่าการผสมเกสรเฉพาะที่ (local pollination) ส่วนการผสมเกสรดอกไม้ข้ามต้นที่มีระยะทางไกลๆ จำเป็นต้องพึ่งพา

ตัวนำพาแบบสิ่งมีชีวิต (allogamy) เรียกว่าการผสมเกสรวงกว้าง (global pollination) ทั้งนี้ FPA ได้ถูกนำไปใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาการออกแบบในโลกแห่งความเป็นจริงหลายวัตถุประสงค์ (Yang, Karamanoglu, and He, 2014)

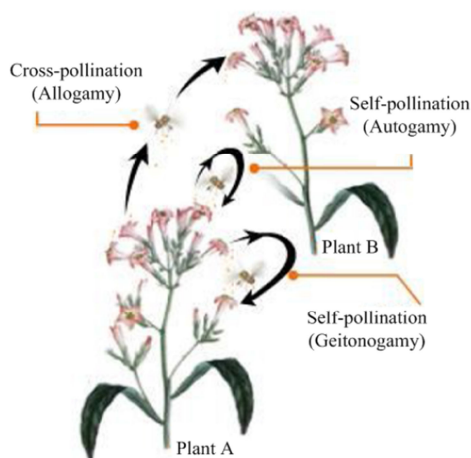


Figure 2 Flower pollination (เดชา พวงดาวเรือง, ไชโย ธรรมรัตน์, อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร, และ สาริจน์ หลั่งน้ำทิพย์, 2559; Yang, 2012).

จากกระบวนการผสมเกสรดอกไม้ของไม้ดอกตามธรรมชาติ Yang (2012) ได้คิดค้นขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ (FPA) โดยใช้หลักการผสมเกสรดอกไม้จากดอกหนึ่งไปสู่อีกดอกหนึ่งกับการบินแบบเลวี่ สำหรับการหาวิธีการเดินทางจากดอกหนึ่งไปสู่อีกดอกหนึ่ง สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \gamma L(\lambda)(g_* - x_i^{(t)}) \quad (4)$$

โดยที่ $x_i^{(t+1)}$ คือ ค่าของเกสรดอกไม้ที่ i หรือ ผลเฉลี่ยของตัวแปร x_i ที่รอบการทำงานของ t และ g_* คือผลเฉลี่ยที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน และ γ คือตัวแปรที่มีผลกระทบต่อขนาดที่ใช้ควบคุมการเดินทาง ส่วน $L(\lambda)$ คือ ค่าพารามิเตอร์ของการเดินทางในรูปแบบการบินแบบเลวี โดยที่ $L > 0$ สามารถหาได้ดังสมการที่ (5)

$$L \approx \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\pi\lambda/2)}{\pi} \frac{1}{s^{(1+\lambda)}}, (s \gg s_0 > 0) \quad (5)$$

โดยที่ ค่า $\Gamma(\lambda)$ คือ ค่าฟังก์ชันแกมมามาตรฐาน (standard gamma function) และค่า s คือขนาดขั้นการค้นห (step size) โดยใช้ค่าจากการแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian distribution) ของ u และ v แสดงได้ดังสมการที่ (6)

$$s = \frac{u}{|v|^{1/\lambda}} \quad (6)$$

โดยที่ $u \approx N(0, \sigma^2)$ มาจากค่าเฉลี่ยรูปแบบของการแจกแจงแบบเกาส์อยู่ระหว่าง 0 ถึงค่าความแปรปรวนของ σ^2 และค่า $v \approx N(0, 1)$ เมื่อ N คือการแจกแจงแบบปกติ สำหรับค่า σ^2 สามารถหาได้จากสมการที่ (7)

$$\sigma^2 = \left[\frac{\Gamma(1+\lambda)}{\lambda \Gamma[(1+\lambda)/2]} \cdot \frac{\sin(\pi\lambda/2)}{2^{(\lambda-1)/2}} \right]^{1/\lambda} \quad (7)$$

นอกจากจะมีการผสมเกสรดอกไม้ภายในแล้ว ยังมีการผสมเกสรดอกไม้ภายนอกอีกด้วย ซึ่งหาได้จากรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \varepsilon(x_j^{(t)} - x_k^{(t)}) \quad (8)$$

โดยที่ $x_j^{(t)}$ และ $x_k^{(t)}$ คือค่าเกสรจากดอกไม้ที่มีความแตกต่างกันทั้ง 2 ดอก และใช้หลักการสร้างผลเฉลี่ยโดยการสุ่มแบบเอกรูป เมื่อ ε คือการสุ่มแบบเอกรูป ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $[0, 1]$

ขั้นตอนวิธีของ FPA (เดชา พวงดาวเรือง, ไซโย ธรรมรัตน์, ธรรมรัตน์ นาวิกาวตาร, และสาโรจน์ หลั่งน้ำทิพย์, 2559; Yang, 2012) อาศัยกฎพื้นฐานดังต่อไปนี้

กฎข้อที่ 1 การผสมเกสรดอกไม้แบบข้ามดอก จะต้องพึ่งพาตัวนำพาแบบสิ่งมีชีวิต วิธีการเดินทางของตัวนำพาแบบสิ่งมีชีวิตจะใช้วิธีการเดินทางด้วยการบินแบบเลวี ดังแสดงในสมการที่ (5)

กฎข้อที่ 2 การผสมเกสรดอกไม้ในต้นเดียวกัน จะต้องพึ่งพาตัวนำพาแบบสิ่งไม่มีชีวิต

กฎข้อที่ 3 ตัวนำพาการผสมเกสรดอกไม้แบบข้ามดอก สามารถพัฒนาดอกไม้ให้มีความคงตัวที่สมดุลกันกับความน่าจะเป็นในการขยายพันธุ์ที่เป็นสัดส่วนใกล้เคียงกันกับดอกไม้ทั้งสองดอกที่เกี่ยวข้องกัน

กฎข้อที่ 4 การผสมเกสรดอกไม้ในต้นเดียวกัน (การผสมเกสรเฉพาะที่) และการผสมเกสรดอกไม้แบบข้ามต้น (การผสมเกสรวงกว้าง) อาจจะถูกกำหนดด้วยค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยน (switch probability) $p \in [0, 1]$ ในทางปฏิบัติดอกไม้ที่อยู่ติดกันหรืออยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกันมักมีแนวโน้มในการผสมเกสรเฉพาะที่ ค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยนจะมีผลไปทางการผสมเกสรดอกไม้ในต้นเดียวกันเล็กน้อย

ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ของ FPA สำหรับการประยุกต์ใช้งานทั่วไปได้รับการนำเสนอโดย Yang

กำหนดให้ n คือจำนวนเกสรดอกไม้ p คือค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยนระหว่างการผสมเกสรวงกว้าง และ λ คือการผสมเกสรเฉพาะที่ ขั้นตอนวิธีของ FPA สามารถหลุดรอดจากการติดกับเฉพาะที่ (local entrapment) และค้นหาผลเฉลยวงกว้างได้

อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ สามารถแสดงขั้นตอนวิธีของ FPA ได้ด้วยแผนภูมิ (flowchart) ของ FPA ดังแสดงใน (Figure 3) เมื่อ TC คือ เกณฑ์ยุติการค้นหา (termination criteria)

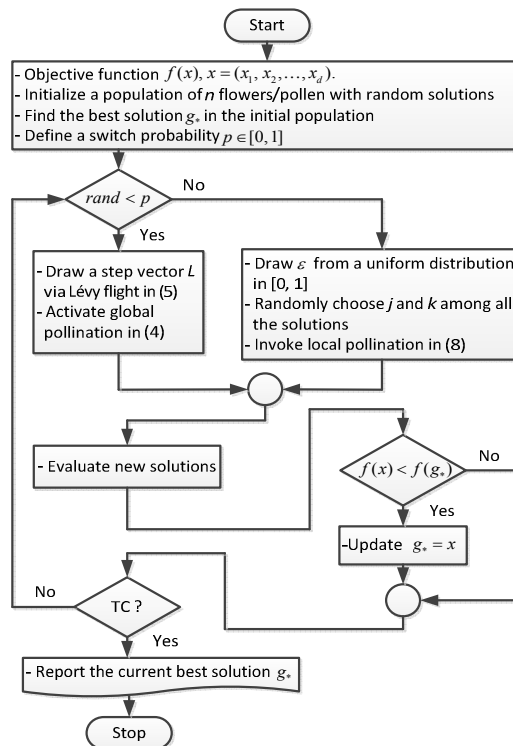


Figure 3 Flowchart of FPA (เดชา พวงดาวเรือง, ไชโย ธรรมรัตน์, อรรถรัตน์ นาวิกาวดาร, และสาโรจน์ หลั่งน้ำทิพย์, 2559; Yang, 2012).

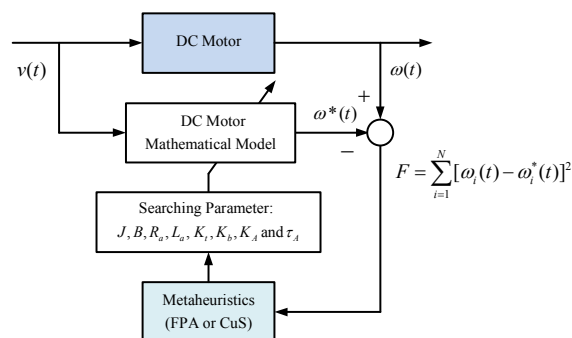


Figure 4 FPA-based parameter identification (Ketthong, Kiree, Tunyasirut, and Puangdownreong, 2015).

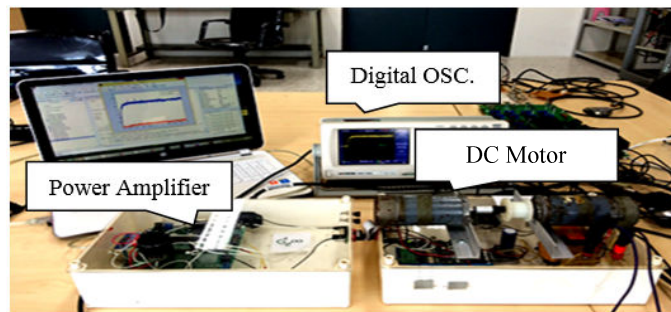


Figure 5 DC motor testing rig (Ketthong, Kiree, Tunyasrirut, and Puangdownreong, 2015).

การระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์บนพื้นฐาน
 อภิศักขานักของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
 สามารถแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรม (Figure 4) จากฟังก์ชัน
 ถ่ายโอนของแบบจำลองในสมการที่ (3) การระบุเอกลักษณ์
 ของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถหา
 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด จำนวน 8 ตัว ได้พร้อมกัน
 ทั้งหมด เมื่อพิจารณาจาก (Figure 4) จะพบว่า F คือ
 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ที่อยู่ในรูป
 ผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (sum squared
 error, SSE) หาได้จากผลรวมของค่าผลต่างกำลังสอง
 ระหว่างข้อมูลความเร็วจริง $\omega(t)$ และข้อมูลความเร็ว
 การจำลอง $\hat{\omega}(t)$ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F จะถูกป้อนกลับ
 จาก CuS หรือ FPA ทำให้มีค่าน้อยที่สุดในการค้นหา
 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อที่จะได้รับคำตอบที่ดี
 ระหว่างการทดลองจริงกับแบบจำลองของมอเตอร์
 ไฟฟ้ากระแสตรง การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
 ขนาดพิกัด 48 วัตต์ในห้องปฏิบัติการแสดงใน (Figure 5)
 ในบทความนี้ได้กำหนดระดับความเร็วรอบของมอเตอร์-
 ไฟฟ้ากระแสตรงที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และ
 1600 รอบต่อนาที ทดสอบและบันทึกค่าด้วยดิจิทัล
 ออสซิลโลสโคปยี่ห้อ SIGLENT รุ่น SDS 1304CFL ความถี่
 300 MHz ข้อมูลความเร็วจริงที่ 1600 รอบต่อนาที จะ

ถูกใช้ในการระบุเอกลักษณ์ ในขณะที่ข้อมูลความเร็ว
 จริงที่ 600 รอบต่อนาที จะถูกใช้ในการตรวจสอบ
 ความถูกต้อง (validate identification) ของวิธีการระบุ
 เอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์
 ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีของ CuS และ FPA

ผลการศึกษา

ขั้นตอนวิธีของ FPA ได้รับการพัฒนาเป็น
 โปรแกรมการค้นหาดูด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK
 บนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง
 ขนาด 2 แกน ที่มีสัญญาณนาฬิกา 2 กิกะเฮิรตซ์ และ
 มีหน่วยความจำหลักชนิด DDR3 ขนาดความจุ 3
 กิกะไบต์ ที่คาบเวลาชักตัวอย่าง (sampling period) 1
 มิลลิวินาที การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของ FPA เบื้องต้น
 ทำได้ดังนี้จำนวนเกสรตอกไม้ $n = 22$ ค่าความน่าจะเป็น
 ในการสับเปลี่ยนระหว่างการผสมเกสรวงกว้างและการ
 ผสมเกสรเฉพาะที่ $p = 0.8$ และ $\lambda = 1.5$ (Yang, 2012)
 จำนวนรอบสูงสุด (MaxGen) = 1000 รอบ ถูกกำหนด
 ให้เป็น TC ซึ่งอยู่ภายใต้ขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดของ
 ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
 ที่กำหนดขอบเขตไว้แล้ว และดำเนินการให้สอดคล้อง
 กับปริภูมิการค้นหา (search space) แสดงได้ดัง

สมการที่ (9) เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด จำนวน 8 ตัว ดังแสดงใน (Table 1) ตามลำดับ

ผลการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีของ CuS และ FPA ที่ความเร็ว

1600 รอบต่อนาที แสดงใน (Figure 6) และตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที แสดงใน (Figure 7)

$$\begin{aligned} R_a &= [0, 5.0], & L_a &= [0, 0.05], & K_t &= [0, 0.5], & K_b &= [0, 0.05], \\ J &= [0, 0.0005], & B &= [0, 0.0005], & K_A &= [0, 0.5], & \tau_A &= [0, 0.0005] \end{aligned} \quad (9)$$

Table 1 Identified parameters of DC motor.

methods	model parameters								SSE	SSE	search time
	R_a	L_a	K_t	K_b	J	B	K_A	τ_A	(iden)	(valid)	(sec.)
CuS	3.9427	0.0107	0.2316	0.0410	0.0002	0.0005	0.1518	0.0004	0.0144	0.0185	2.8227
FPA	2.6256	0.0086	0.1148	0.0021	0.0001	0.0005	0.0342	0.0001	0.0059	0.0077	1.6131

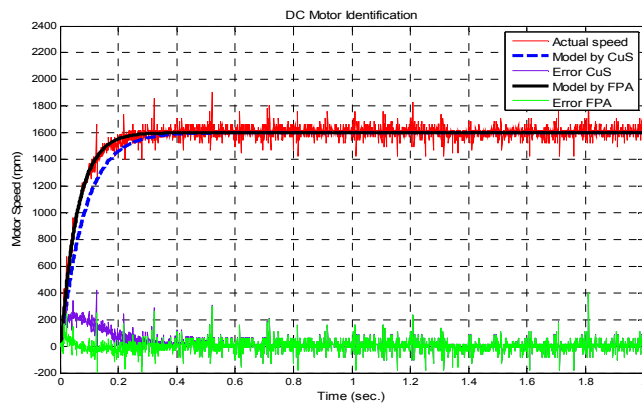


Figure 6 Identification results of DC motor by CuS and FPA.

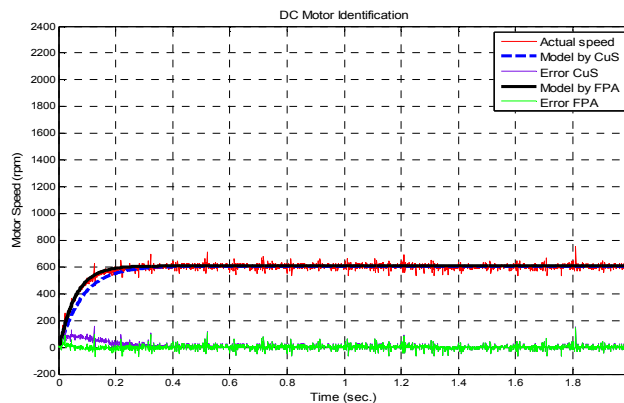


Figure 7 Validation results of DC motor by CuS and FPA.

จาก (Figure 6) และ (Figure 7) การระบุเอกลักษณ์และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีของ FPA ที่ความเร็วรอบ 1600 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที สามารถแสดงผลที่ได้จากระบบจริงและผลการประมาณหาแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากระบบจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อภิปรายผล

จาก (Table 1) ในการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีของ CuS และ FPA สามารถค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด จำนวน 8 ตัว ได้แก่ R_a , L_a , L_b , K_t , K_b , J , B , K_A และ τ_A พร้อมกันทั้งหมดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างน่าพึงพอใจ การระบุเอกลักษณ์และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่าข้อมูลที่ความเร็วรอบ 1600 รอบต่อนาที สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ (SSE_iden) และข้อมูลที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้อง (SSE valid) วิธีของ FPA มีค่า SSE น้อยกว่าวิธีของ CuS โดยสามารถสังเกตได้จากผลการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลอง แสดงใน (Figure 6) และตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แสดงใน (Figure 7) ตามลำดับ ทั้งนี้ (Figure 6) และ (Figure 7) แสดงให้เห็นถึงคุณภาพที่ดีในการยอมรับระหว่างพฤติกรรมทางพลวัตระบบจริงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการทดสอบ และค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่

ได้รับโดย FPA จากการจำลองแบบจำลอง นอกจากนี้การรู้เข้าหาผลเฉลยของปัญหาตามกลไกของ FPA จะดำเนินการค้นหาทั้งหมด 40 ตัวอย่าง จำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 1000 รอบ ถูกกำหนดให้เป็น TC ค่าเริ่มต้นกำหนดจากขอบเขตการค้นหาตามสมการที่ (9) หลังจากยุติการค้นหาด้วย FPA พบว่า ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F จากทั้งหมด 40 ตัวอย่าง จะมีเพียงตัวอย่างเดียวที่รู้เข้าหาผลเฉลยวงกว้างได้รวดเร็วและมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F น้อยที่สุดในรอบที่ 9 มีค่าเท่ากับ 0.005868 แสดงใน (Figure 8) โดยได้รับการยืนยันแล้วว่าสามารถหาคำตอบอย่างเหมาะสมด้วย FPA

สรุป

ในบทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วย FPA วิธีการระบุเอกลักษณ์สามารถเข้าถึงการพิจารณาปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จำเป็นวิธีของ FPA ได้ถูกประยุกต์ใช้เพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง จากผลการศึกษาพบว่า วิธีของ FPA สามารถค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด จำนวน 8 ตัวของแบบจำลองที่แสดงพลวัตของระบบที่มีความแม่นยำสูง โดยยอมรับว่ามีคุณภาพดีมาก ระหว่างพฤติกรรมทางพลวัตจริงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการทดสอบ และค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ได้รับโดย FPA จากผลการจำลองของแบบจำลองได้รับการยืนยันอย่างครบถ้วน ในงานวิจัยนี้การระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีของ FPA ถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีของ CuS ในการระบุเอกลักษณ์ของ

แบบจำลองพบว่า ทั้งวิธีของ CuS และ FPA สามารถค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จำนวน 8 ตัว ที่อยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ได้อย่างน่าพึงพอใจ แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับแสดงพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สอดคล้องกับพลวัตจริงที่ได้จากการทดสอบเป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม วิธีของ FPA สามารถค้นหา

ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้รวดเร็วกว่าวิธีของ CuS ดังนั้นสรุปได้ว่าวิธีของ FPA เป็นหนึ่งในบรรดาเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดของอภิศึกษาสำนักแบบอิงประชากรที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับปัญหาการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวิธีอื่นๆ ในโลกของความเป็นจริงได้

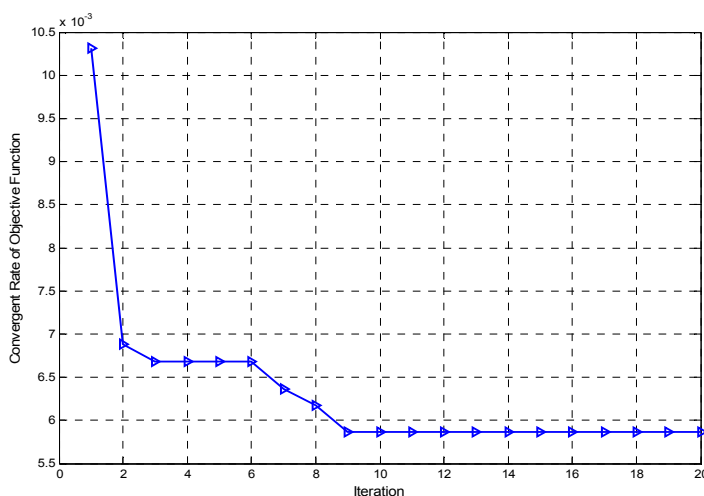


Figure 8 Convergent rate of search process by FPA.

เอกสารอ้างอิง

เดชา พวงดาวเรือง, ไชโย ธรรมรัตน์, อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร, และสาโรจน์ หลั่งน้ำทิพย์. (2559). การประยุกต์ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้เพื่อออกแบบตัวควบคุม PIDA อย่างเหมาะสม. ใน *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 39 (EECON-39)* (น. 533-538). โรงแรมเดอะวีเจนท์ ชะอำบีช หัวหิน เพชรบุรี: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เดชา พวงดาวเรือง, อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร, ไชโย ธรรมรัตน์, และสาโรจน์ หลั่งน้ำทิพย์. (2560). การสังเคราะห์ตัวควบคุม PID แบบแอนะล็อกด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้. ใน *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า*

ครั้งที่ 40 (EECON-40) (น. 451-454). โรงแรมเดอะชาयน์ ชลบุรี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- Balasubramani, K., & Marcus, K. (2014). A study on flower pollination algorithm and its applications. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIE)*, 3, 320-325.
- Chittka, L., Thomson, J. D., & Waser, N. M. (1999). Flower constancy, insect psychology, and plant evolution. *Naturwissenschaften*, 86: 361-377.
- Eykhoﬀ, P. (1974). *System identification: Parameter and state estimation*. New Jersey: John Wiley & Sons.

- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithm in search, optimization, and machine learning*. Boston, USA: Addison-Wesley Publishing.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks (ICNN'95)* (pp. 1942-1948). Perth, WA, Australia: IEEE.
- Krishnan, R. (2001). *Electric motor drives modeling, analysis, and control*. New Jersey: Prentice-Hall International.
- Keththong, T., Kiree, C., Tunyasirirut, S., & Puangdownreong, D. (2015). Parameter identification of DC-servo motor by adaptive tabu search. In *The International Annual Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE19)* (pp. 79-83). Ubon Ratchathani: Ubon Ratchathani University.
- Lastomo, D., Djalal, M. R., Wido, D., & Robandi, I. (2015). Optimization of PID controller design for DC motor based on flower pollination algorithm. In *The International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM2015)*. Aryaduta Hotel, Medan: University of Sumatera Utara.
- Leontaritis, I. J., & Billings, S. A. (1985a). Input-output parametric models for nonlinear systems (part I: deterministic nonlinear systems). *Int. J. Control*, 41(2), 303-328.
- Leontaritis, I. J., & Billings, S. A. (1985b). Input-output parametric models for nonlinear systems (part II: stochastic nonlinear systems), *Int. J. Control*, 41(2), 329-344.
- Ljung, L. (1987). *System identification: Theory for the user*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Pavlyukevich, I. (2007a). Lévy Flights, non-local search and simulated annealing. *Journal of Computational Physics*, 226, 1830-1844.
- Pavlyukevich, I. (2007b). Cooling down Lévy Flights. *Journal of Phys. A: Math, Theor.*, 40, 12299-12313.
- Sandou, G. (2013). *Metaheuristic optimization for the design of automatic control laws*. New Jersey: Wiley.
- Sakib, N., Kabir, Md. W., Rahman, Md. S., & Alam, M. S. (2014). A comparative study of flower pollination algorithm and bat algorithm on continuous optimization problems. *International Journal of Applied Information Systems*, 7, 13-19.
- Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics form design to implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Vas, P. (1993). *Parameter estimation, condition monitoring and diagnosis of electrical machines*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Willmer, P. (2011). *Pollination and floral ecology*. New Jersey: Princeton University Press.
- Yadav, S. P., & Tripathi, V. K. (2006). A case study of DC motor speed control with PID controller through MATLAB. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5(5), 1008-1011.
- Yang, X. S. (2010). *Engineering optimization, an introduction with metaheuristic applications*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Yang, X. S., & Deb, S. (2009). Cuckoo search via Lévy flights. In *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing* (pp. 210-214). Coimbatore, India: IEEE.
- Yang, X. S. & Deb, S. (2010). Engineering optimisation by cuckoo search. *Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 1(4), 330-343.

- Yang, X. S. (2012). Flower pollination algorithm for global optimization. *Unconventional Computation and Natural Computation, Lecture Notes in Computer Science*, 7445, 240-249.
- Yang, X. S., & Deb, S. (2013). Multiobjective cuckoo search for design optimization. *Computers and Operations Research*, 40(6), 1616-1624.
- Yang, X. S., Karamanoglua, M., & He, X. (2013). Multi-objective flower algorithm for optimization. *International Conference on Computational Science, Procedia Computer Science*, 18, 861-868.
- Yang, X. S. (2014). *Cuckoo search and firefly algorithm: overview and analysis. Studied in computational intelligence: Cuckoo search and firefly algorithm theory and applications*. London: Springer.
- Yang, X. S., Karamanoglua, M., & He, X. (2014). Flower pollination algorithm: a novel approach for multiobjective optimization. *Eng Optim*, 46(9), 1222-1237.
- Zakian, V. (2005). *Control systems design, A New Framework*. London: Springer-Verlag.