

การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน
ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้งที่สามารถปรับค่าของคำตอบได้

ADAPTIVE BEE COLONY OPTIMIZATION METHOD FOR SOLVING ECONOMIC DISPATCH PROBLEM OF A THERMAL POWER PLANT

จิรพันธ์ ทาแกง¹, วันไชย คำเสน², อนุชา สุนันตะ³, กริษรัตน์ อัญญมณีทาน⁴ และ ชุโชค อิมเหว้า⁵
^{1,2}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง
200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000, ¹chiraphon@rmutl.ac.th, ²wanchai_kh@rmutl.ac.th
^{3,4}ครูผู้ช่วย, แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคลำปาง, 15 ถนนท่าครวน้อย ตำบลสบตุ๋ย
อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52100, ³anuchasunanta@gmail.com, ⁴kritbasicboy@hotmail.com
⁵ครูผู้ช่วย, แผนกวิชาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร, 50 ถนนปิ่นดำริห์ ตำบลในเมือง
อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร 62000, raykojang_ka@hotmail.co.th

Chiraphon Takeang¹, Wanchai Khamsen², Anucha Sunanta³,
Kricharat Anyamaneethan⁴ and Chuchok Imwao⁵

^{1,2}Lecturer, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Lampang,
200 Moo 17, Phichai Sub-District, Mueang District, Lampang 52000, Thailand,

¹chiraphon@rmutl.ac.th, ²wanchai_kh@rmutl.ac.th

^{3,4}Contract teachers, Department of Electrical Power, Lampang Technical College
15 Tha Khaw Noi Road, Sop Tui Subdistrict, Mueang District, Lampang 52100, Thailand,

³anuchasunanta@gmail.com, ⁴kritbasicboy@hotmail.com

⁵Assistant Teachers, Department of Electrical, Kamphaeng Phet Technical College,
50 Pin Damri Road, Mueang Subdistrict, Mueang District, Kamphaeng Phet 62000, Thailand,
raykojang_ka@hotmail.co.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการปรับเปลี่ยนกระบวนการทำงานของวิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง (BCO) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงเป็นแบบเรียบ มีวิธีการคือปรับค่าของคำตอบที่ได้จากการหาค่าตอบด้วยวิธีฝูงผึ้งในรอบแรก ทำการกำหนดขอบเขตการค้นหาลรอบ ๆ คำตอบที่ได้ในรอบแรก และใช้คุณสมบัติของวิธีฝูงผึ้งเข้าค้นหาคำตอบใหม่อีกครั้ง ทดสอบกับระบบที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้า 15 หน่วย เปรียบเทียบกับวิธีการ BCO แบบเดิม ในแง่ของผลลัพธ์ที่ดีที่สุด และความเร็วในการหาคำตอบ และเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ในแง่ของผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ผลการทดสอบ วิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ของคำตอบที่ดีกว่า และมีความเร็วในการหาคำตอบที่เร็วกว่าเมื่อเทียบกับวิธี BCO แบบเดิม และวิธีการที่นำเสนอให้ผลของคำตอบที่ดีกว่าวิธีที่การที่นำมาเปรียบเทียบ จึงสรุปได้ว่าวิธีการที่นำเสนอ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ สามารถนำไปเป็นแนวปฏิบัติในการวางแผนการผลิตได้จริง

คำสำคัญ: การจ่ายโหลดอย่างประหยัด, การหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน

ABSTRACT

This article is a modification of the working process of Bee Colony Optimization method (BCO). The objective is to solve the problem of the thermal power plant with the smooth cost function. The method is to adjust the value of the answers obtained from finding the answer by means of the bee swarm in the first round. Setting the search scope around the answers in the first round and use the properties of the bee swarm method to search for answers again. Perform tests on a system that consists of 15 generators and compare with the traditional BCO method in terms of the best results, convergence speed and compare with other methods in terms of the best results. The results of the proposed method that gives a better answer and faster convergence speed when compare with traditional BCO method, In addition, the proposed method provides better results the method of comparison. In conclusion, the proposed method is an effective method that can be used as a practical plan for production planning.

KEYWORDS: Economic Dispatch, Bee Colony Optimization, Thermal power plant

1. บทนำ

การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch: ED) เป็นหนึ่งในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบไฟฟ้า ปัญหา ED มีความสำคัญ เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิตพลังงานโดยรวม ซึ่งหากสามารถลดต้นทุนการผลิตให้มากที่สุด นั้นหมายถึงผลกำไรสูงสุดที่จะเกิดขึ้นกับผู้ผลิตพลังงาน ปัญหา ED นั้นเป็นการลดทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิล และลดต้นทุนราคาเชื้อเพลิงให้ต่ำที่สุด โดยที่ระบบจะต้องตอบสนองเงื่อนไข ข้อบังคับ เช่น ข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าสมมูลของระบบ ข้อจำกัดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข้อจำกัดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมถึง

ความต้องการของระบบ โดยทั่วไปฟังก์ชันค่าใช้จ่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนจะถูกสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันกำลังสอง ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้ด้วยวิธีการทั่วไป เช่น วิธีการทำซ้ำแลมบ์ดา (lambda iteration method) [1] วิธีโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) [2] การเขียนโปรแกรมกำลังสอง (quadratic programming) [3] วิธีเกรเดียนต์ (gradient method) [4] การหาค่าตอบด้วยการผ่อนคลายแบบลากรางจ์ (Lagrangian relaxation) [5, 6] อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้สามารถแก้ปัญหาได้ในระดับหนึ่ง ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของวิธีการเหล่านี้ เป็นเพียงคำตอบเฉพาะถิ่น (Local) เมื่อระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น และเมื่อคำนึงถึงลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นในการสร้างแบบจำลองของต้นทุน เช่น ขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลง (Ramp Rate Limit) ช่วงการทำงานต้องห้าม (Prohibited Operating Zone) วิธีการเดิมๆ ไม่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาได้

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีความพยายามที่จะแก้ปัญหา ED ด้วยวิธีที่เรียกว่าเมตาฮิวริสติกส์ (meta-heuristics) โดยสามารถแก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นของฟังก์ชันต้นทุนการผลิตได้ เช่น วิธีอนุภาคกลุ่ม (Swarm Optimization: PSO) [7, 8] วิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า [Cuckoo Search: CS] [9] วิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบผึ้ง (Bee Colony Optimization: ABC) [10] อัลกอริทึมการค้นหาแบบย้อนรอย (Backtracking Search Algorithm: BSA) [11] และอัลกอริทึมรากต้นไม้ Rooted Tree Algorithm: TRO) [12] อย่างไรก็ตามในบางกรณีอัลกอริทึมเหล่านี้ยังคงให้คำตอบที่เป็นคำตอบเฉพาะถิ่น และการลู่เข้าหาคำตอบที่ค่อนข้างช้าเนื่องจากเป็นอัลกอริทึมที่เริ่มต้นด้วยการสุ่ม ในบรรดาวิธีการค้นหาแบบเมตาฮิวริสติกส์ วิธีการ BCO เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหา ED เนื่องจากเป็นวิธีที่ความซับซ้อนน้อย และใช้พารามิเตอร์ไม่มาก แต่เช่นเดียวกับอัลกอริทึมอื่นๆ วิธีการนี้ยังคงมีข้อบกพร่องที่ขัดขวางการทำงานของมัน การปรับกระบวนการทำงานของอัลกอริทึมจะทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพมากขึ้น และทำให้การลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็ว

บทความนี้นำเสนออัลกอริทึม BCO สำหรับการแก้ปัญหา ED โดยการปรับกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธี BCO ด้วยวิธีการค้นหาคำตอบแบบปรับค่าของคำตอบได้ (Adaptive Bee Colony Optimization: ABCO for Solving Economic Dispatch Problem) ซึ่งมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับ [7-12] คือขอบเขตของการค้นหาคำตอบที่แคบลงอย่างมาก ซึ่งมีวิธีการคือใช้วิธี BCO หาคำตอบในรอบแรก และกำหนดขอบเขตการค้นหารอบๆ คำตอบที่ได้ในรอบแรก ใช้คุณสมบัติของ BCO หาคำตอบรอบใหม่ ภายในขอบเขตที่กำหนดขึ้นมาใหม่ เนื่องจากคำตอบที่ได้ในรอบแรกนั้นอาจเป็นคำตอบที่เป็นคำตอบแบบ local โดยทำการทดสอบกับระบบที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 15 หน่วย ที่เป็นการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดแบบสเตติกส์ ผลการทดสอบ ABCO ได้เปรียบเทียบกับ BCO แบบเดิมในแง่ของต้นทุน และความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบ และเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิมในแง่ของต้นทุนการผลิตที่ได้จากการทดสอบ 100 ครั้ง

2. ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

ED เป็นปัญหาที่มีฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เป็นแบบไม่เชิงเส้น วัตถุประสงค์หลักของปัญหา ED คือการลดต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้ต่ำที่สุดในขณะที่ตอบสนองความต้องการโหลดได้ และจะต้องอยู่บนเงื่อนไข ข้อบังคับต่างๆ ของระบบดังต่อไปนี้

2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของปัญหา ED คือผลรวมของต้นทุนการผลิตที่มีค่าต่ำที่สุด ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นแบบเรียบ (Smooth Cost) จะถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่เป็นฟังก์ชันกำลังสอง (Single Quadratic Function) ดังสมการที่ (1)

$$\text{Minimize : } TC = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) = \sum_{i=1}^N a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (1)$$

โดยที่ TC คือ ต้นทุนรวมในการผลิตกำลังไฟฟ้า i คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i N คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบทั้งหมด $F_i(P_i)$ คือ ต้นทุนของเชื้อเพลิงการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i P_i คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i และ a , b และ c คือ สัมประสิทธิ์ราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

2.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraint) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1) ข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าสมดุลของระบบ (Power Balance Constraint) คือ ความต้องการปริมาณไฟฟ้างดสมการที่ (2) กับกำลังสูญเสียรวมในระบบส่งจ่ายดังสมการที่ (3)

$$\sum_{i=1}^N (P_i) = P_D + P_{\text{loss}} \quad (2)$$

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{j=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (3)$$

โดยที่ P_i คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i P_D คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง และ B_{ij} , B_{0i} และ B_{00} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของสายส่ง

2) ข้อจำกัดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Rating Constraint) คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเครื่องต้องอยู่ในขีดจำกัดกำลังการผลิตต่ำสุดและสูงสุด ดังสมการที่ (4)

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (4)$$

โดยที่ $P_{i,\min}$ และ $P_{i,\max}$ คือกำลังการผลิตต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

3) ข้อจำกัดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Operating Limit Constraint) คือ ข้อจำกัดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีการพิจารณา 2 เงื่อนไข คือ

เงื่อนไขที่ 1 ขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลง (Ramp Rate Limit) ช่วงการผลิตกำลังไฟฟ้าจะถูกจำกัดด้วยขีดจำกัดการเปลี่ยนแปลง 2 สภาวะ ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตจากชั่วโมงที่ $t-1$ ถึง t ซึ่งจะทำให้กำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะอยู่ในช่วงดังสมการที่ (5)

$$\max(P_{i,\min}, P_i^0 - DR_i) \leq P_i \leq \min(P_{i,\max}, P_i^0 + UR_i) \quad (5)$$

โดยที่ P_i^0 คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i ก่อนหน้า DR_i คือ อัตราการลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i UR_i คือ อัตราการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

เงื่อนไขที่ 2 ช่วงการทำงานต้องห้าม (Prohibited Operating Zone) หมายถึงสมรรถนะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนมีช่วงการทำงานต้องห้าม เนื่องจากวาล์วไอน้ำไม่สามารถทำงานได้ในช่วงนี้ หรือทำให้เกิดความสั่นขึ้นที่ ช่วงเวลาการทำงานของเครื่องกำเนิดดังสมการที่ (6)

$$P_i = \begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i,1}^l \\ P_{i,j-1}^u \leq P_i \leq P_{i,j}^l, & j = 2, 3, \dots, n_i \\ P_{i,n}^u \leq P_i \leq P_{i,1}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

3. วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีฝูงผึ้ง (Bee Colony Optimization) [13]

วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีฝูงผึ้ง เป็นวิธีการสมัยใหม่วิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา โดยวิธีฝูงผึ้งเป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่เลียนแบบพฤติกรรมกรหาอาหารของผึ้ง โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการแบ่งฝูงผึ้งออกเป็น 2 ประเภท คือ ผึ้งสอดแนม (Scout Bee) และผึ้งงาน (Employee Bee) เพื่อค้นหาคำตอบ มีขั้นตอนการค้นหาคำตอบโดยสรุปดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของฝูงผึ้ง เป็นการกำหนดค่าจำนวนผึ้งสอดแนม (Bee Scouts) จำนวนเท่ากับ N ตัว ค่าที่ดีจำนวนเท่ากับ M ค่า จากนั้นเลือกค่าที่ดีที่สุดออกมาเท่ากับ E ค่า และกำหนดค่าของจำนวนผึ้งงานจำนวน n_{ep} ตัว ให้เข้าไปค้นหาในส่วนของ E และ

กำหนดค่าของจำนวนผึ้งงานจำนวน n_{sp} ตัว ให้ไปค้นหาในส่วนของ $M-E$ ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง

Parameters	Number
Population size (N)	20
Number of selected sites (M)	10
Number of best sites (E)	5
Number of bees around best sites (n_{ep})	50
Number of bees around other sites (n_{sp})	50

ขั้นตอนที่ 2 สุ่มค่าเริ่มต้นของระบบโดยฝูงสอดแนม ในขั้นตอนนี้ เป็นการสุ่มหาค่าตามจำนวนฝูงสอดแนมที่ส่งออกไป

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินผลของคำตอบจากฝูงสอดแนม คือนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาเรียงคำตอบจากน้อยไปหามากจำนวน N ค่า

ขั้นตอนที่ 4 หลังจากประเมินค่าคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ซึ่ง ขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดให้ฝูงผึ้งเลือกค่าของคำตอบที่ดีที่สุดจำนวน M คำตอบ ซึ่งคำตอบที่ได้จะนำไปพิจารณาในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 ขั้นตอนนี้จะเป็นการแบ่งโซนของคำตอบที่ถูกเลือกไว้ออกเป็นสองกลุ่ม คือ คำตอบที่ดีที่สุดมีจำนวนเท่ากับ E คำตอบ และคำตอบที่ด้อยลงมาจำนวน $M-E$ เพื่อจะได้กำหนดจำนวนผึ้งงานในการเข้าไปค้นหาคำตอบต่อไป

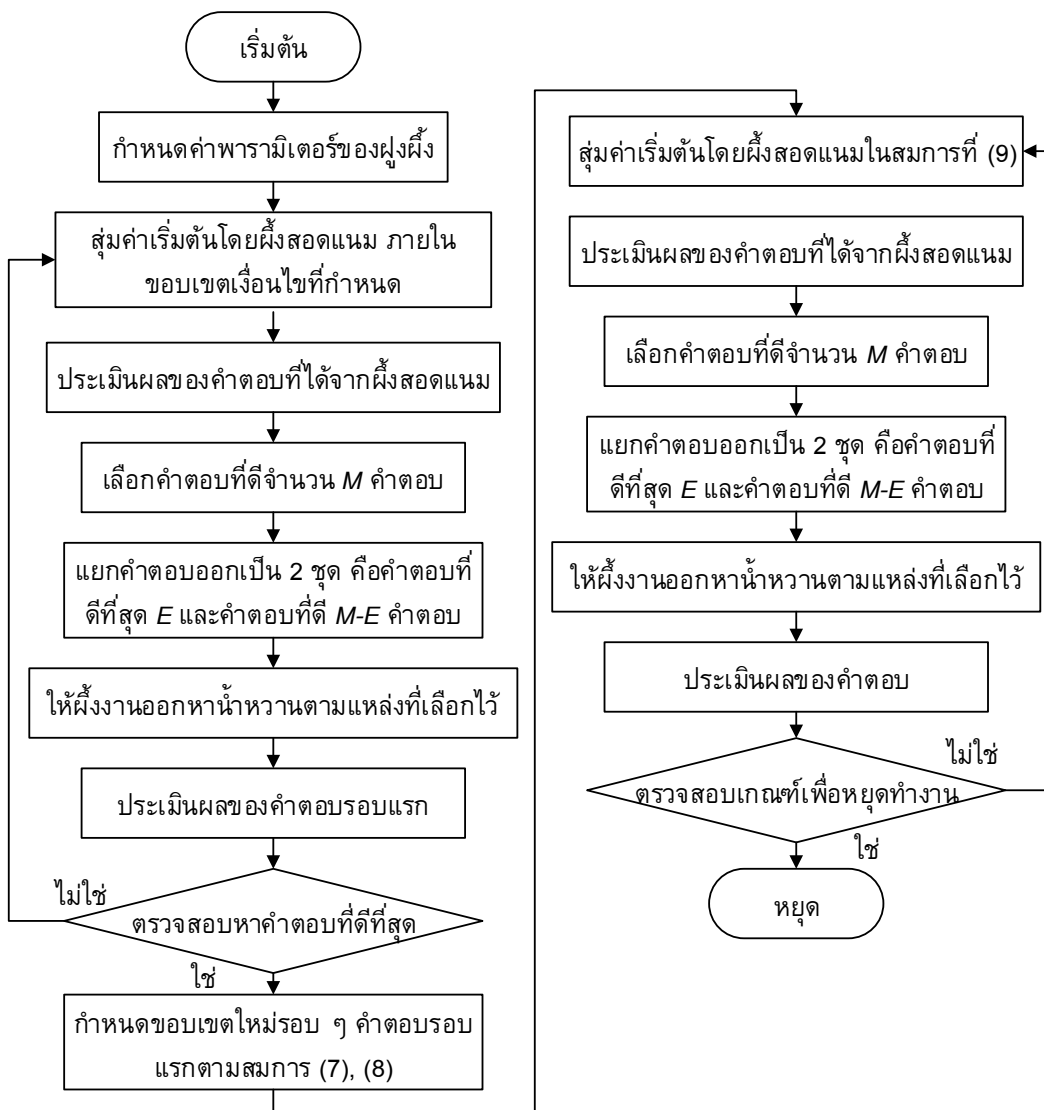
ขั้นตอนที่ 6 ให้ผึ้งงานออกหาน้ำหวานตามแหล่งที่เลือกไว้ในขั้นตอนที่ 5 คือกำหนดให้ผึ้งงานจำนวน n_{ep} ตัวไปค้นหาคำตอบรอบ ๆ บริเวณโซนคำตอบ E และให้ผึ้งงานจำนวน n_{sp} ตัว ออกไปหาคำตอบบริเวณโซนคำตอบ $M-E$ และนำผลมาทำการประเมินเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

ขั้นตอนที่ 7 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการหาคำตอบพื้นที่ใกล้เคียง ในการประเมินผลของคำตอบนั้นจะทำการประเมินผลของคำตอบที่ได้จากทั้งสองแหล่ง คือผึ้งงานที่เข้าค้นหาคำตอบจากจำนวนคำตอบที่ดีที่สุด E คำตอบ และผึ้งงานที่เข้าค้นหาคำตอบจากจำนวนคำตอบที่เหลือ $M-E$ คำตอบ ซึ่งการประเมินจะเป็นการนำข้อมูลของคำตอบมาเปรียบเทียบกันและเลือกเอาคำตอบที่ดีที่สุด หรือคำตอบที่ใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่กำหนดมากที่สุด

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเกณฑ์เพื่อหยุดทำงาน ถ้าเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ได้ตั้งไว้เป็นจริง ให้แสดงคำตอบที่เหมาะสมที่สุด มิฉะนั้นให้กลับไปขั้นตอนที่ 2

4. กระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้งด้วยการปรับค่าของคำตอบ

การปรับเปลี่ยนกระบวนการที่นำเสนอ เป็นการค้นหาคำตอบแบบ 2 ชั้น โดยชั้นแรก ใช้ BCO เพื่อหาคำตอบรอบแรก เมื่อได้คำตอบแล้ว จะนำคำตอบที่ได้มากำหนดขอบเขตการค้นหาใหม่ และใช้วิธีการของ BCO ค้นหาคำตอบในของเขตที่กำหนดใหม่ วิธีการนี้เรียกว่า การปรับกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธี BCO ด้วยวิธีการค้นหาคำตอบแบบปรับค่าของคำตอบได้ (Adaptive Bee Colony Optimization: ABCO) มีลำดับขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้งด้วยการปรับค่าของคำตอบ

จากรูปที่ 1 ทั้ง 8 ขั้นตอนอธิบายในหัวข้อที่ 3 ซึ่งก็คือกระบวนการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฟุ้ง จนกระทั่งได้คำตอบที่ดีที่สุดในการค้นหาคำตอบรอบแรก จากนั้นเป็นการนำเอาคำตอบในรอบแรกเป็นค่าเริ่มต้นเพื่อหาคำตอบรอบๆ ค่าเริ่มต้นใหม่ด้วยการกำหนดขอบเขตใหม่ ดังสมการที่ (7)-(8)

$$(new)P_i^{\max} = P_{li} + (P_{li} \times rank) \quad (7)$$

$$(new)P_i^{\min} = P_{li} - (P_{li} \times rank) \quad (8)$$

โดยที่ P_{li} คือผลลัพธ์ของการหาคำตอบที่ดีที่สุดในรอบแรก $(new)P_i^{\max}$ คือขอบเขตสูงสุดใหม่ $(new)P_i^{\min}$ คือขอบเขตต่ำสุดใหม่ และ $rank$ คือค่าตัวคูณที่ใช้กำหนดขอบเขตการค้นหา ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

สมการที่ (7) และสมการที่ (8) เป็นการกำหนดขอบเขตการค้นหาใหม่ จากขอบเขตเดิมที่ถูกกำหนดด้วยข้อจำกัดฟิสิกส์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นขอบเขตใหม่ที่อยู่รอบๆ คำตอบที่ดีที่สุดในรอบแรก ซึ่งกล่าวได้ว่า สมการที่ (7) เป็นการกำหนดกำลังการผลิตสูงสุดที่เครื่องกำเนิดแต่ละตัวจะสามารถผลิตได้ และสมการที่ (8) เป็นการกำหนดกำลังการผลิตต่ำสุดที่เครื่องกำเนิดแต่ละตัวจะเริ่มผลิตได้ ตัวแปรสำคัญคือค่าของ $rank$ ที่จะเป็นตัวกำหนดระยะของขอบเขต อย่างไรก็ตามในสมการที่ (7) หากค่าสูงสุดใหม่สูงกว่าข้อจำกัดฟิสิกส์ของเครื่องกำเนิด ก็จะถูกกำหนดให้เท่ากับฟิสิกส์ของเครื่องกำเนิด และในสมการที่ (8) หากค่าต่ำสุดใหม่ ต่ำกว่าฟิสิกส์ของเครื่องกำเนิด ก็จะถูกกำหนดให้เท่ากับฟิสิกส์ของเครื่องกำเนิดเช่นกัน เมื่อได้ขอบเขตการค้นหาใหม่แล้ว จากนั้นจะใช้วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฟุ้งเพื่อค้นหาคำตอบภายในขอบเขตที่ถูกกำหนดขึ้นมาใหม่ ด้วยวิธีการสุ่ม ดังสมการที่ (9)

$$P_i = (new)P_i^{\min} + (((new)P_i^{\max} - (new)P_i^{\min}) \times rand(1)) \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) เป็นการสุ่มค่าเริ่มต้นใหม่ภายในขอบเขตใหม่ที่ถูกกำหนดขึ้นรอบ ๆ คำตอบที่ได้จากการค้นหาในรอบแรก ขอบเขตของการค้นหาใหม่จะแคบลง ซึ่งจะทำให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็ว และลู่เข้าหาคำตอบได้เร็วขึ้น

5. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

เนื่องจากฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิง และเงื่อนไขข้อบังคับต่าง ๆ ได้ถูกกำหนดโดยผู้ผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิด จะมีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่ต่างกัน ในงานวิจัยนี้จึงทำการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของระบบที่เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนเท่านั้น โดยระบบนี้เป็นระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนขนาดปานกลางที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดจำนวน 15 หน่วย มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดของระบบคือ 2630 MW เครื่องกำเนิดทั้งหมดมีคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวดังตารางที่ 2 และมีเงื่อนไขที่ต้องพิจารณา คือ ขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดแต่ละตัว (ramp-rate limits) ดังตารางที่ 3 และหน่วยการผลิต 2, 5, 6 และ 12 เป็นช่วงการปฏิบัติการที่ไม่ได้รับอนุญาต (prohibited operating zone) ดังตารางที่ 2 การสูญเสียในสายส่งดังต่อไปนี้ [14]

$$B_{0i} = [-0.0001 \ -0.0002 \ 0.0028 \ -0.0001 \ 0.0001 \ -0.0003 \ -0.0002 \ -0.0002 \ 0.0006 \ 0.0039 \ -0.0017 \ 0.0000 \ -0.0032 \ 0.0067 \ -0.0064]$$

$$B_{00} = 0.0055$$

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0.0014 & 0.0012 & 0.0007 & -0.0001 & -0.0003 & -0.0001 & -0.0001 & -0.0001 & -0.0003 & 0.0005 & -0.0003 & -0.0002 & 0.0004 & 0.0003 & -0.0001 \\ 0.0012 & 0.0015 & 0.0013 & 0.0000 & -0.0005 & -0.0002 & 0.0000 & 0.0001 & -0.0002 & -0.0004 & -0.0004 & 0.0000 & 0.0004 & 0.0010 & -0.0002 \\ 0.0007 & 0.0013 & 0.0076 & -0.0001 & -0.0013 & -0.0009 & -0.0001 & 0.0000 & -0.0008 & -0.0012 & -0.0017 & 0.0000 & -0.0026 & 0.0111 & -0.0028 \\ -0.0001 & 0.0000 & -0.0001 & 0.0034 & -0.0007 & -0.0004 & 0.0011 & 0.0050 & 0.0029 & 0.0032 & -0.0011 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0001 & -0.0026 \\ -0.0003 & -0.0005 & -0.0013 & -0.0007 & 0.0090 & 0.0014 & -0.0003 & -0.0012 & -0.0010 & -0.0013 & 0.0007 & -0.0002 & -0.0002 & -0.0024 & -0.0003 \\ -0.0001 & -0.0002 & -0.0009 & -0.0004 & 0.0014 & 0.0016 & 0.0000 & -0.0006 & -0.0005 & -0.0008 & 0.0011 & -0.0001 & -0.0002 & -0.0017 & 0.0003 \\ -0.0001 & 0.0000 & -0.0001 & 0.0011 & -0.0003 & 0.0000 & 0.0015 & 0.0017 & 0.0015 & 0.0009 & -0.0005 & 0.0007 & 0.0000 & -0.0002 & -0.0008 \\ -0.0001 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0050 & -0.0012 & -0.0006 & 0.0017 & 0.0168 & 0.0082 & 0.0079 & -0.0023 & -0.0036 & 0.0001 & 0.0005 & -0.0078 \\ -0.0003 & -0.0002 & -0.0008 & 0.0029 & -0.0010 & -0.0005 & 0.0015 & 0.0082 & 0.0129 & 0.0116 & -0.0021 & -0.0025 & 0.0007 & -0.0012 & -0.0072 \\ -0.0005 & -0.0004 & -0.0012 & 0.0032 & -0.0013 & -0.0008 & 0.0009 & 0.0079 & 0.0116 & 0.0200 & -0.0027 & -0.0034 & 0.0009 & -0.0011 & -0.0088 \\ -0.0003 & -0.0004 & -0.0017 & -0.0011 & 0.0007 & 0.0011 & -0.0005 & -0.0023 & -0.0021 & -0.0027 & 0.0140 & 0.0001 & 0.0004 & -0.0038 & 0.0168 \\ -0.0002 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0002 & -0.0001 & 0.0007 & -0.0036 & -0.0025 & -0.0034 & 0.0001 & 0.0054 & -0.0001 & -0.0004 & 0.0028 \\ 0.0004 & 0.0004 & -0.0026 & 0.0001 & -0.0002 & -0.0002 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0007 & 0.0009 & 0.0004 & -0.0001 & 0.0103 & -0.0101 & 0.0028 \\ 0.0003 & 0.0010 & 0.0111 & 0.0001 & -0.0024 & -0.0017 & -0.0002 & 0.0005 & -0.0012 & -0.0011 & -0.0038 & -0.0004 & -0.0101 & 0.0578 & -0.0094 \\ -0.0001 & -0.0002 & -0.0028 & -0.0026 & -0.0003 & 0.0003 & -0.0008 & -0.0078 & -0.0072 & -0.0088 & 0.0168 & 0.0028 & 0.0028 & -0.0094 & 0.1283 \end{bmatrix}$$

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 15 หน่วย

Unit no.	c_i	b_i	a_i	P_{min}	P_{max}
1	0.000299	10.1	671	150	455
2	0.000183	10.2	574	150	455
3	0.001126	8.8	374	20	130
4	0.001126	8.8	374	20	130
5	0.000205	10.4	461	150	470
6	0.000301	10.1	630	135	460
7	0.000364	9.8	548	135	465
8	0.000338	11.2	227	60	300
9	0.000807	11.2	173	25	162
10	0.001203	10.7	175	25	160
11	0.003586	10.2	186	20	80
12	0.005513	9.9	230	20	80
13	0.000371	13.1	225	25	85
14	0.001929	12.1	309	15	55
15	0.004447	12.4	323	15	55

ตารางที่ 3 ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาต้องห้าม

Unit	P_o^j	UR_i	DR_i	Prohibited zone		
				Zone 1	Zone 2	Zone 3
1	400	80	120			
2	300	80	120	[185-225]	[305-335]	[420-450]
3	105	130	130			
4	100	130	130			
5	90	80	120	[180-200]	[305-335]	[390-420]
6	400	80	120	[230-255]	[365-395]	[430-455]
7	350	80	120			

ตารางที่ 3 ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาต้องห้าม (ต่อ)

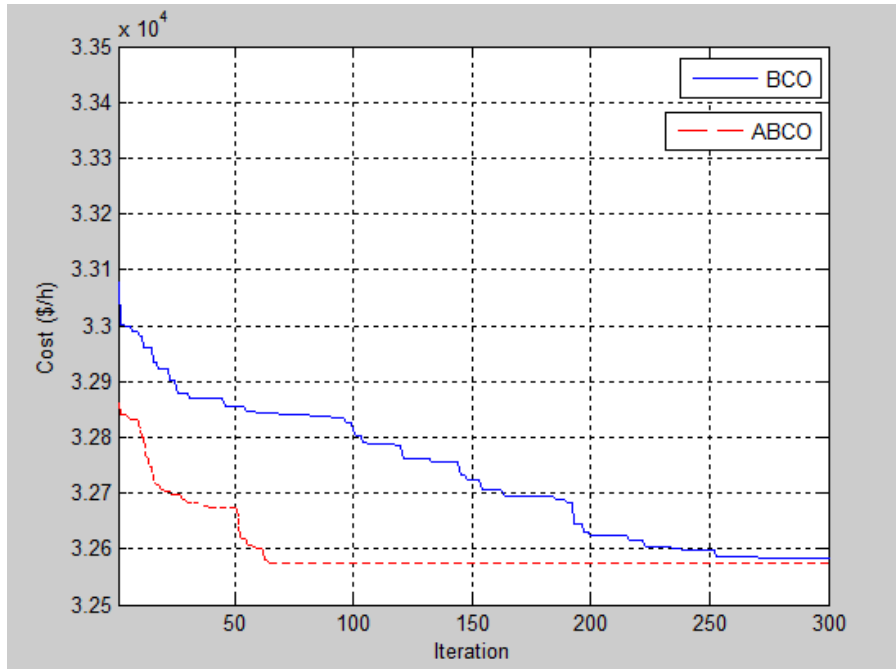
Unit	P_i^j	UR_i	DR_i	Prohibited zone		
				Zone 1	Zone 2	Zone 3
8	95	65	100			
9	105	60	100			
10	110	60	100			
11	60	80	80			
12	40	80	80	[30-40]	[55-65]	
13	30	80	80			
14	20	55	55			
15	20	55	55			

6. ผลการจำลองสถานการณ์และการเปรียบเทียบผล

ในการจำลองใช้โปรแกรม MATLAB คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Intel(R) Core(TM) i5 2.30 GHz แรม 8 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 7 ทำการทดสอบจำนวน 100 รอบ แบ่งผลการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบความเร็วในการหาคำตอบ ระหว่างวิธี BCO ปกติ และวิธี ABCO ซึ่งนอกจากเปรียบเทียบความเร็วในการหาคำตอบแล้ว ยังเปรียบเทียบกันในเรื่องของคุณภาพของคำตอบ ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนการผลิตรวม และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ผลการเปรียบเทียบความเร็วในการหาคำตอบ ดังรูปที่ 2 และผลการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างวิธี BCO ปกติ และวิธี ABCO ดังตารางที่ 4

จากรูปที่ 2 เมื่อทดสอบการทำงานของวิธี ABCO เปรียบเทียบกับวิธี BCO แล้ว จะเห็นได้ว่าวิธี BCO เริ่มหาคำตอบที่ Iteration ประมาณ 250 ถึง 260 อันเนื่องมาจากวิธี BCO เป็นวิธีการที่เริ่มต้นด้วยการสุ่มหาคำตอบ เมื่อสุ่มหาคำตอบในรอบแรกได้คำตอบที่อยู่ใกล้กับค่าที่เหมาะสม ทำให้การหาคำตอบก็เป็นไปอย่างช้าๆ เพราะจะต้องเริ่มต้นกระบวนการสุ่มใหม่ทั้งหมด ซึ่งขอบเขตของการสุ่มนี้ค่อนข้างจะกว้าง ตามขอบเขตกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดแต่ละตัว ในขณะที่วิธี ABCO เริ่มหาคำตอบที่ Iteration ประมาณ 60 ซึ่งเร็วกว่าอย่างเห็นได้ชัด อันเนื่องมาจากช่วง 50 Iteration แรกเป็นช่วงของการค้นหาคำตอบในรอบแรกๆ ของวิธีฟูลล์ จากนั้นเป็นการนำเอาคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ว่าจะเหมาะสมมาเป็นค่าเริ่มต้นในการค้นหาคำตอบรอบใหม่ โดยทำการกำหนดของการค้นหาใหม่รอบๆ คำตอบเดิม เป็นผลให้ขอบเขตการค้นหาแคบลงอย่างมาก ทำให้การค้นหาคำตอบรอบต่อไปอยู่ในช่วงที่แคบ การสุ่มหาคำตอบในช่วงที่กำหนดจึงทำให้

ได้คำตอบที่เหมาะสมอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้วิธี ABCO สามารถที่จะหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบลักษณะการหาคำตอบของวิธีที่นำเสนอกับวิธี BCO ปกติ

ตารางที่ 4 เป็นตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของผลลัพธ์ของคำตอบจากวิธี BCO และวิธี ABCO ในแง่ของต้นทุนการผลิตรวม และค่าความสูญเสียในสายส่ง จากตารางวิธี BCO ให้ค่าของต้นทุนการผลิตต่ำสุดที่ 32583.24 \$/h มีความสูญเสียในสายส่งอยู่ที่ 27.41 MW ในขณะที่วิธี ABCO ให้ผลลัพธ์ของคำตอบเป็นค่าต้นทุนการผลิตรวมอยู่ที่ 32574.80 \$/h มีความสูญเสียในสายส่งอยู่ที่ 21.75 MW จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธีที่นำเสนอนี้มีผลลัพธ์ของคำตอบที่ดีกว่า และมีค่าความสูญเสียในสายส่งที่น้อยกว่าวิธี BCO เนื่องจากวิธีที่นำเสนอเป็นการค้นหาคำตอบรอบๆ คำตอบ ที่ได้จากวิธี BCO ซึ่งทำให้ได้ผลของคำตอบที่ดีกว่าวิธี BCO นั้นเอง

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องของวิธีที่นำเสนอกับวิธี BCO ปกติ

Unit Output	BCO	ABCO
P_1 (MW)	451.38	439.13
P_2 (MW)	442.83	441.47
P_3 (MW)	124.18	108.28
P_4 (MW)	128.59	119.46
P_5 (MW)	240.99	296.53
P_6 (MW)	451.98	452.82
P_7 (MW)	459.32	443.46
P_8 (MW)	68.37	98.95
P_9 (MW)	36.04	28.03
P_{10} (MW)	65.62	32.89
P_{11} (MW)	51.02	65.61
P_{12} (MW)	73.05	53.10
P_{13} (MW)	31.02	34.00
P_{14} (MW)	16.95	15.49
P_{15} (MW)	16.06	20.00
TP (MW)	2657.41	2649.24
Total cost (\$/h)	32583.24	32561.50
Power Loss	27.41	19.24

ผลการทดลองส่วนที่ 2 เป็นการนำทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการอื่น ๆ ซึ่งจะเป็นการยืนยันคุณภาพของผลลัพธ์ของคำตอบ การเปรียบเทียบในส่วนที่ 2 นี้ ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบกับวิธี A hybrid differential evolution algorithm based on particle swarm optimization (DEPSO) [15] วิธี Optimization using civilized swarm (CSO) [16] และวิธี Antlion optimization technique (ALO) [17] ได้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องของวิธีที่นำเสนอกับวิธีการอื่นๆ

Unit Output	DEPSO	CSO	ALO	ABCO
P_1 (MW)	455.00	454.70	372.44	439.13
P_2 (MW)	420.00	380.00	450.60	441.47
P_3 (MW)	130.00	130.00	125.83	108.28
P_4 (MW)	130.00	129.53	127.83	119.46
P_5 (MW)	270.00	170.00	253.85	296.53
P_6 (MW)	460.00	460.00	458.11	452.82
P_7 (MW)	430.00	429.71	462.44	443.46
P_8 (MW)	60.00	75.35	63.80	98.95
P_9 (MW)	25.00	34.96	25.62	28.03
P_{10} (MW)	62.966	160.00	89.72	32.89
P_{11} (MW)	80.00	79.75	66.39	65.61
P_{12} (MW)	80.00	80.00	76.38	53.10
P_{13} (MW)	25.00	34.21	28.34	34.00
P_{14} (MW)	15.00	21.14	36.73	15.49
P_{15} (MW)	15.00	21.02	16.81	20.00
TP (MW)	2657.97	2660.36	2652.91	2649.24
Total cost (\$/h)	32588.81	32732.95	32572.55	32561.50
Power Loss	27.97	30.36	22.91	19.24

ตารางที่ 5 เป็นตารางการเปรียบเทียบผลของการหาคำตอบโดยได้นำผลของวิธีการ ABCO เปรียบเทียบผลกับวิธี DEPSO วิธี CSO และ วิธี ALO โดยวิธี ABCO ที่นำเสนอให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหรือค่าของค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 32561.50 \$/h โดยมีค่าสูญเสียในสายส่ง 19.24 MW วิธีการ DEPSO ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหรือค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 32588.81 \$/h ในขณะที่มีค่าสูญเสียในสายส่งที่ 27.97 MW วิธีการ CSO ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือค่าของค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 32732.95 และมีค่าสูญเสียในสายส่งที่ 30.36 MW และวิธี ALO ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือค่าของค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 32572.55 และมีค่าสูญเสียในสายส่งที่ 22.91 MW ผลการ

เปรียบเทียบ แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธีการ ABCO ให้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุด และมีค่าพลังงานสูญเสียในสายส่งต่ำที่สุดเช่นกัน ซึ่งถือได้ว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ สามารถนำมาใช้กับการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่พิจารณาขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลง และช่วงเวลาต้องห้ามได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. สรุปผล

การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยเทคนิคของการปรับเปลี่ยนกระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฟุ้งเฟื่อง โดยการปรับค่าของคำตอบได้ เป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบที่เลียนแบบการหาอาหารของฝูงผึ้งในการหาคำตอบรอบแรก และใช้คำตอบที่ได้ในรอบแรกเป็นค่าเริ่มต้นในการค้นหาคำตอบรอบต่อไป ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดช่วงในการค้นหาคำตอบรอบ ๆ คำตอบเริ่มต้นดังกล่าวเพื่อลดขอบเขตในการค้นหาคำตอบให้แคบลง เนื่องจาก การค้นหาคำตอบโดยวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฟุ้งเฟื่องนั้น เป็นการค้นหาคำตอบแบบสุ่ม ในรอบแรกจะทำการสุ่มในวงกว้าง ตามเงื่อนไขของเครื่องกำเนิดแต่ละตัว ซึ่งคำตอบที่ได้อาจจะจะเป็นเพียงคำตอบเฉพาะถิ่น (Local) ในการค้นหาในรอบที่สองนั้นจึงได้จำกัดขอบเขตให้แคบลง เป็นผลให้การค้นหาในรอบที่สองใช้เวลาน้อย และค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว ทำให้การลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็ว ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบกับระบบที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 15 หน่วยที่มีความซับซ้อนของระบบคือขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลง และช่วงเวลาดังห้าม เปรียบเทียบการลู่เข้าหาคำตอบกับวิธี BCO แบบดั้งเดิม ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีที่นำเสนอสามารถลู่เข้าหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว ลู่เข้าหาคำตอบที่ประมาณ 60 Iteration และในแง่ของต้นทุนการผลิตรวมเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างวิธี BCO และวิธี ABCO วิธีที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ของคำตอบที่ดีกว่า และมีกำลังสูญเสียในสายส่งน้อยกว่า และเพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของคำตอบกับวิธี DEPSO, CSO และ ALO จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอให้ค่าของคำตอบที่ดีกว่า ในแง่ของต้นทุนการผลิตรวม และกำลังสูญเสียในสายส่ง อันเนื่องมาจากข้อได้เปรียบของวิธีที่นำเสนอที่สามารถลดขอบเขตการค้นหาให้แคบลง ซึ่งทำให้มีข้อดีคือ ทำให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็ว จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอให้ค่าของคำตอบที่ดีกว่า จากการทดสอบวิธีที่นำเสนอมีโอกาสได้ค่าที่เหมาะสมมากกว่าเดิม ค่าที่ได้นี้เป็นที่ยอมรับได้ และมีคำตอบที่ดีกว่า ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการผลิตกำลังงานไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ อย่างไรก็ตาม วิธีการที่นำเสนอ ยังคงสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม ซึ่งจากการสุ่มหาคำตอบในเบื้องต้น เป็นการสุ่มที่ไม่มีแบบแผน ทำให้มีการกระจายของคำตอบกว้าง หากทำให้ระบบการสุ่มสามารถที่จะสุ่มหาคำตอบได้ในคำตอบที่ใกล้เคียงกัน อาจทำให้การลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าวิธีการที่นำเสนอ

References

- [1] Wood AJ, Wollenberg BF. Power generation, operation, and control. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons; 1984.
- [2] Fanshel S, Lynes ES. Economic power generation using linear programming. Power Appar Syst IEEE Trans 1964;83:347-56.
- [3] Reid GF, Hasdorff L. Economic dispatch using quadratic programming. Power Appar Syst IEEE Trans 1973;PAS-92:2015-23.
- [4] Chang Y-C, Chan T-S, Lee W-S. Economic dispatch of chiller plant by gradient method for saving energy. Application Energy 2010;87:1096-101.
- [5] Hindi KS, Ab Ghani MR. Dynamic economic dispatch for large scale power systems: a Lagrangian relaxation approach. Int J Electr Power Energy System 1991;13:51-6.
- [6] El-Keib AA, Ma H, Hart JL. Environmentally constrained economic dispatch using the LaGrangian relaxation method. IEEE Trans Power System 1994;9:1723-9.
- [7] H. Zhang. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Dynamic Economic Dispatch Problems. International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM). 2016;3(4):264-6.
- [8] H. Lotfi, A. Dadpour, M. Samadi. Solving Economic Dispatch in Competitive Power Market Using Improved Particle Swarm Optimization Algorithm. International Journal of Smart Electrical Engineering 2017;6(1):35-41.
- [9] N. Karthik, A.K. Parvathy RA. Non-convex Economic Load Dispatch using Cuckoo Search Algorithm. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJEECS) 2017;5:48–57.
- [10] Aydin D, Özyön S, Yaşar C, Liao T. Artificial bee colony algorithm with dynamic population size to combined economic and emission dispatch problem. Int J Electr Power Energy System 2014;54:144–53.
- [11] Modiri-Delshad M, Aghay Kaboli SH, Taslimi-Renani E, Rahim NA. Backtracking search algorithm for solving economic dispatch problems with valve-point effects and multiple fuel options. Energy 2016;116:637–49.
- [12] Labbi Y, Attous D Ben, Gabbar HA, Mahdad B, Zidan A. A new rooted tree optimization algorithm for economic dispatch with valve-point effect. Int J Electr Power Energy System 2016;79:298–311.

- [13] Chiraphon T, Wanchai K, Apinan Au. Multiple Bee Colony Optimization Technique for Economic Dispatch Problem with Ramp Rate Limit and Prohibited Operating Zone. Kasem Bundit Engineering Journal 2017;7(2):29-44. (in Thai).
- [14] Zwe-Lee Gaing. Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints. IEEE Transactions on Power Systems 2002;18(3):1187-95.
- [15] Samir Sayah, Abdellatif Hamouda. A hybrid differential evolution algorithm based on particle swarm optimization for non-convex economic dispatch problems. Science Direct, Applied Soft Computing 2013;13(4):1608-19.
- [16] Immanuel SA, Thanushkodi BK. Optimization using civilized swarm: Solution to economic dispatch with multiple minima. Science Direct, Electric Power Systems Research 2009;79(1):8-16.
- [17] Chiraphon T, Wanchai K, Apinan Au. Solving economic dispatch problem of a thermal power plant using antlion optimization technique. Kasem Bundit Engineering Journal 2018;8(3):167-85. (In Thai).

ประวัติผู้เขียนบทความ



จิรพนธ์ ทาแกง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง เลขที่ 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000 โทรศัพท์ 054 342547 โทรสาร 054 342549 E-mail: chiraphon@rmutl.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy)



รศ.วันชัย คำเสน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง เลขที่ 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000 โทรศัพท์ 054 342547 โทรสาร 054 342549 E-mail: wanchai_kh@rmutl.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch)



อนุชา สุนันตะ ครูประจำแผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิค
ลำปาง 15 ท่าครวน้อย ต.สบตุ๋ย อ.เมืองลำปาง จ.ลำปาง 52100 โทรศัพท์
054 223 006 E-mail: anuchasunanta@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) พลังงานทดแทน
(Renewable Energy)



กฤษรัตน์ อัญญมณีทาน ครู (คศ.1) ประจำแผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง
วิทยาลัยเทคนิคลำปาง 15 ท่าครวน้อย ต.สบตุ๋ย อ.เมืองลำปาง จ.ลำปาง
52100 โทรศัพท์ 054 223 006 E-mail: kritbasicboy@hotmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) การออกแบบระบบ
ไฟฟ้า (Electrical system design) หม้อแปลง และระบบจำหน่าย
(Transformers and distribution systems)



ชูโชค อิ่มเหว่า ครูผู้ช่วย แผนกวิชาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิค
กำแพงเพชร 50 ถ.ปิ่นดำริห์ ต.ในเมือง อ.เมืองกำแพงเพชร จ.กำแพงเพชร
62000 โทรศัพท์ 055 711 090 E-mail: raykojang_ka@hotmail.co.th
งานวิจัยที่สนใจ: ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) เครื่องจักรกลไฟฟ้า
(Electrical machinery) การควบคุมระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม
(Control of industrial automation)

Article History:

Received: August 15, 2019

Revised: April 27, 2020

Accepted: April 28, 2020