

การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดร่วมกับการปล่อย
ก๊าซเรือนกระจกที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบด้วยการผสมผสาน
วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดและวิธีเชิงแจกแจง

**AN INTEGRATED APPROACH COMBINING COMBINATORIAL
OPTIMIZATION AND EXHAUSTIVE ENUMERATION FOR ECONOMIC
EMISSION DISPATCH WITH NON-SMOOTH COST FUNCTIONS**

จิรพนธ์ ทาแกง¹ วันไชย คำเสน² ทวินันท์ จันทะวัง³ และ เฟลิน จันทรสุยะ⁴

^{1,2,3}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ล้านนา ลำปาง 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000,

¹chiraphon@rmutl.ac.th, ²wanchai_kh@rmutl.ac.th, ³Thawinan_ja@rmutl.ac.th

⁴อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ล้านนา เชียงราย 99 หมู่ 10 ต.ทรายขาว อ.พาน จ.เชียงราย 57120, jansuya@rmutl.ac.th

Chiraphon Takeang¹, Wanchai Khamsen², Thawinan Janthawang³ and Phlearn Jansuya⁴

^{1,2,3} 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, ³thawinan_ja65@rmutl.ac.th

⁴Lecturer, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna ChiangRai,

99 Moo 10, Saikhaw Sub-District, Phan District, Chiang Rai 57120, Thailand,

jansuya@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการผสมผสานการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดร่วมกับการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงแจกแจง เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยร่วมกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงเป็นแบบไม่เรียบ มีวิธีการคือ ใช้คำตอบที่ได้จากวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด ซึ่งก็คือวิธีการ SA เป็นคำตอบเริ่มต้น จากนั้นกำหนดขอบเขตการค้นหาใหม่รอบ ๆ คำตอบเริ่มต้น และใช้วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงแจกแจง ซึ่งก็คือBCO ใช้กรณีศึกษาที่ประกอบด้วยระบบที่มีขนาดใหญ่มีเครื่องกำเนิด 40 หน่วย และเป็นระบบที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบ ผลที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับ SA และ BCO ในแง่

ของคุณภาพของคำตอบ และความเร็วในการหาคำตอบ ซึ่งวิธีที่นำเสนอให้คุณภาพของคำตอบที่ดีที่สุด และหาคำตอบได้เร็วที่สุด และเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ ได้เปรียบเทียบผลกับวิธี GSA และ CFLBO ผลการเปรียบเทียบ วิธีที่นำเสนอให้ผลของคำตอบในแง่ของต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด จึงสรุปได้ว่าวิธีการที่นำเสนอนำไปใช้หาคำตอบในปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงแจกแจง, การจ่ายโหลดอย่างประหยัด

ABSTRACT

This research is a combination of finding the optimal solution by combinatorial optimization and exhaustive enumeration methods. To solve the problem of economical load distribution combined with greenhouse gas emissions with a non-smooth function. The method is to use the answer obtained from the optimal arrangement method, which is the SA method, as the initial answer. It then redefines the search boundary around the initial answer and uses the distributional optimal solution, BCO. Use a case study consisting of a large system with 40 generator units with demand 10500 MW and a system with a non-smooth cost function. The results were compared with SA and BCO in terms of the quality of the answers and the speed of convergence to the answers. The proposed method provides the best quality of answers and converge on the answer as quickly as possible. In addition, to test the efficiency, the results were compared with the GSA and CFLBO methods. The results of the comparison of the proposed methods yielded the answer in terms of the lowest production cost. Therefore, it can be concluded that the proposed method can be used to efficiently find solutions to the economical load distribution problem with a non-smooth fuel price function.

KEYWORDS: combinatorial optimization, exhaustive enumeration, economic dispatch

1. บทนำ

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch: ED) เป็นปัญหาของการวางแผนการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยวัตถุประสงค์หลักของปัญหา ED คือการใช้ต้นทุนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้มีค่าต่ำที่สุด โดยจะต้องตอบสนองความต้องการของระบบไฟฟ้า ตลอดจนเงื่อนไขข้อบังคับของระบบ และข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดแต่ละตัว โดยเครื่องกำเนิดแต่ละตัวจะมีฟังก์ชันค่าใช้จ่ายราคาเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้เครื่องกำเนิดแต่ละตัวมีกำลังการผลิต และมีค่าใช้จ่ายจาก

ราคาเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน แม้ว่าจะมีขอบเขตการผลิตที่เท่ากัน ทำให้ปัญหา ED ยังคงเป็นปัญหาหลักที่น่าสนใจสำหรับนักวิจัยจำนวนมากในการค้นหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบเดิมที่มีอยู่

ปัญหา ED คือฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่แสดงอยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดแต่ละตัวจะไม่เหมือนกัน แม้ว่าการผลิตจะเท่ากันก็ตาม โดยพื้นฐานจะถูกแทนด้วยสมการกำลังสอง โดยมีข้อจำกัดในการผลิตของเครื่องกำเนิด และความต้องการพลังงานของระบบไฟฟ้า เป็นข้อบังคับ ในอดีตที่ผ่านมาการแก้ปัญหา ED จะใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์เข้ามาแก้ปัญหา เช่นการทำซ้ำแลมบ์ดา (Lambda iteration) [1] วิธีการ gradient methods [2] วิธี Lagrangian relaxation [3] และวิธี dynamic programs [4] อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้ไม่สามารถที่จะหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ เมื่อระบบไฟฟ้าเป็นระบบที่ซับซ้อนมากขึ้น และมีขนาดใหญ่ คำตอบที่ได้เป็นเพียงคำตอบเฉพาะถิ่น (local) เท่านั้น ต่อมามีการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหา ED ที่สามารถใช้งานได้จริง เป็นเทคนิคที่สามารถให้คำตอบที่ดี ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นาน เทคนิคนี้เรียกว่า เมต้า-ฮิวริสติกส์ (Meta-heuristic techniques) ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจมาจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ โดยวิธีเมต้า-ฮิวริสติกส์นี้ ยังสามารถที่จะแยกออกมาเป็นสองกลุ่ม ตามลักษณะของการค้นหาคำตอบ คือ วิธีการค้นหาเชิงการจัด (combinatorial optimization method) และวิธีการค้นหาเชิงแจกแจง (exhaustive enumeration method) ตัวอย่างวิธีการค้นหาเชิงการจัด เป็นการสุ่มหาคำตอบเริ่มต้น และหาคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบเดิม เช่น จำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing: SA) [5-7] วิธีการค้นหาแบบตาบ (Tabu Search: TS) [8, 9] เทคนิควิธีการหาคำตอบแบบแมงช้าง (Ant Lion Method: ALM) [10] และวิธีการค้นหาแบบปลาวาฬ (Whale Optimization Method: WOM) [11] ส่วนวิธีการค้นหาเชิงแจกแจงเป็นการสุ่มหาคำตอบครั้งละหลาย ๆ คำตอบ และเลือกคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งแต่ละวิธีการอาจมีเทคนิคการหาคำตอบหลังจากสุ่มค่าเริ่มต้นแตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่นวิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [12-14] วิธีอนุภาคกลุ่ม (Particle Swarm Optimization: PSO) [15-17] วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงมด (Ant Colony Optimization: ACO) [18, 19] และวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง (Bee Colony Optimization: BCO) [20-24] นอกจากนี้ปัจจุบันนี้ยังมีเงื่อนไขของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีความสำคัญในการผลิต นั่นคือการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมากมีงานวิจัยหลายเรื่องที่ยพยายามแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้วิธีเมต้าฮิวริสติกส์ เช่น วิธีแรงบันดาลใจทางชีวภาพ (Bio-Inspired Optimization) [25] วิธีการของคูลอมบ์และกฎของแฟรงคลิน (Coulomb's and Franklin's Law Based Optimization: CFLBO) [26] และวิธีอนุภาคกลุ่มแบบใหม่ (New Particle Swarm Optimization: (NPSO) [27] วิธีการทั้งสองกลุ่มได้รับความนิยมในการนำมาใช้แก้ปัญหา ED ซึ่งวิธีการเหล่านี้สามารถแก้ปัญหาได้ดี ให้คำตอบที่เป็น global คำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ดี และมีคุณภาพ

แต่เนื่องจากเป็นเทคนิคการหาคำตอบที่เริ่มต้นด้วยการสุ่ม โดยวิธีการค้นหาคำตอบเชิงการจัด จะสุ่มค่าขึ้นมาค่าหนึ่ง และหาคำตอบใหม่ใกล้ ๆ ค่าเดิม แต่เป็นคำตอบที่ดีกว่าเดิม มีข้อดีคือ มีความเร็วในการค้นหาคำตอบ แต่มักจะมีข้อเสียคือ หากการสุ่มหาคำตอบเริ่มแรกได้คำตอบที่ไม่ดี มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้คำตอบที่ได้เป็นเพียงคำตอบที่เป็น local ส่วนวิธีการหาคำตอบเชิง แจกแจง เป็นการสุ่มหาคำตอบครั้งละหลาย ๆ ค่า และนำเอาทุกค่ามาเปรียบเทียบกันเพื่อหา คำตอบที่ดีที่สุด ข้อดีคือคำตอบที่ได้มักจะเป็นคำตอบที่เป็น global แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาใน การค้นหาคำตอบนาน และมีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ค่อนข้างช้า จากข้อดีและข้อเสียของ การค้นหาคำตอบเชิงการจัดกับการค้นหาคำตอบเชิงแจกแจง ข้อเสียดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการ ผสมผสานวิธีทั้งสอง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการจำลองการอบอุ่น (SA) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการหา คำตอบเชิงการจัด เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความเร็วในการค้นหาคำตอบ แต่เนื่องจากความเร็วใน การค้นหาคำตอบ ทำให้คำตอบที่ได้มักติดอยู่ที่คำตอบแบบ local และใช้วิธีการหาคำตอบที่ เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง (BCO) ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบเชิงแจกแจง เนื่องจากเป็นวิธีการที่ใช้ พารามิเตอร์น้อย และไม่ซับซ้อน แต่ผลของคำตอบอยู่ที่การตั้งค่าประชากรเริ่มต้น หากประชากร เริ่มต้นมีจำนวนน้อย จะทำให้ได้คำตอบที่เป็น local และหากใช้ประชากรเริ่มต้นมาก การลู่เข้าหา คำตอบจะไม่ดี ดังนั้นหากนำเอาข้อดีข้อเสียของทั้งสองวิธีมารวมกัน จะทำให้ได้วิธีการแบบ ผสมผสาน (Hybrid Method) เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิง เป็นแบบไม่เรียบ ซึ่งเป็นการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าแบบสแตติกส์ จะมีวิธีการคือใช้วิธีการ SA หาคำตอบ เมื่อได้คำตอบแล้ว คำตอบนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นค่าเริ่มต้นแทนการสุ่ม จากนั้นกำหนด ขอบเขตใหม่รอบ ๆ คำตอบที่ได้จาก SA และใช้คุณสมบัติที่ดีของวิธี BCO เพื่อค้นหาคำตอบที่ เหมาะสมที่สุดภายในขอบเขตการค้นหาที่กำหนดขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะทำให้ขอบเขตการค้นหาคำตอบ แคบลง เป็นผลให้การลู่เข้าหาคำตอบดีขึ้น และทำให้ได้คำตอบที่เป็น global โดยวิธีที่เสนอ จะนำ ผลเฉลยที่ดีที่สุดหรือคำตอบที่ดีที่สุดมาคำนวณหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเครื่องกำเนิด แต่ละตัว ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิมคือ SA และ BCO ในแง่ของคุณภาพของคำตอบ และความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบ นอกจากนี้เพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอที่เชื่อมโยงกับผลการวิจัยทั่วโลก จึงทำการเปรียบเทียบกับวิธี ซึ่ง ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในระดับนานาชาติ

2. ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการผสมผสานวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด (SA) กับวิธีการหา ค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงแจกแจง (BCO) เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ซึ่งเป็นการ วางแผนการผลิตแบบสแตติกส์ และมีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงเป็นแบบไม่เรียบ โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไข ข้อบังคับต่าง ๆ ของระบบ ที่สำคัญคือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ดังสมการที่ (1)

$$\text{Minimize: } TC = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (1)$$

โดยที่ TC คือ ต้นทุนรวมในการผลิตกำลังไฟฟ้า, i คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i , N คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบทั้งหมด และ $F_i(P_i)$ คือ ต้นทุนของเชื้อเพลิงการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

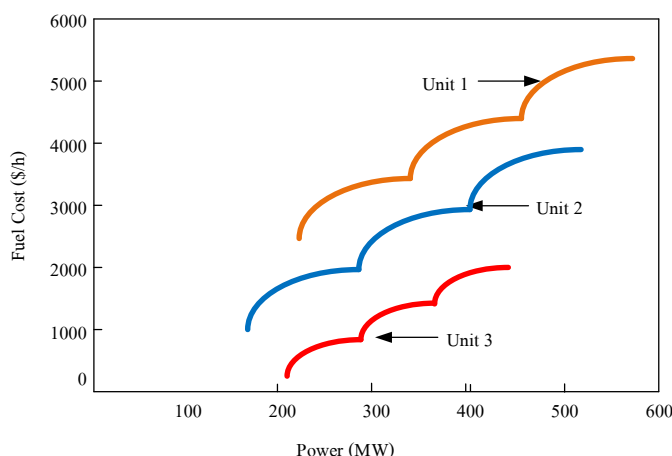
นอกจากนี้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดยังมีเงื่อนไข ข้อบังคับที่สำคัญดังต่อไปนี้

2.1 ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิด

ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ เป็นฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่เป็นแบบไม่เรียบ (Non-Smooth Cost Function) ลักษณะเด่นคือมีความไม่ต่อเนื่อง เกิดขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดบางประการในการปฏิบัติงานจริง เช่น ผลกระทบของจุดวาล์ว (valve-point effects) การเปลี่ยนเชื้อเพลิง (fuel switching) และต้นทุนการเริ่มเดินเครื่อง (start-up costs) ซึ่งทำให้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด มีความซับซ้อนมากขึ้นและยากต่อการหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยในการควบคุมวาล์วที่ใช้กับกังหันไอน้ำในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน เมื่อมีการเปิดวาล์ว ฟังก์ชันต้นทุนจะแสดงลักษณะเป็นคลื่นหรือฟันเลื่อย เนื่องจากผลกระทบของจุดวาล์ว ซึ่งแสดงออกในรูปของสมการคณิตศาสตร์ที่เป็น Sinusoidal Function ดังสมการที่ (2) และมีลักษณะดังรูปที่ 1

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + \left| e_i \times \sin \left(f_i \times (P_i^{\min} - P_i) \right) \right| \quad (2)$$

โดยที่ a_i , b_i , c_i , e_i และ f_i คือ สัมประสิทธิ์ราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i



รูปที่ 1 ลักษณะของฟังก์ชันค่าใช้จ่ายแบบไม่เรียบ

2.2 เงื่อนไข ข้อบังคับของเครื่องกำเนิด

ในการแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ที่สำคัญที่สุดจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าสมดุล และข้อจำกัดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าสมดุลของระบบ (Power Balance Constraint)

คือ อัตราการผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวต้องมีค่าเท่ากับความต้องการปริมาณไฟฟ้า (Demand) ดังสมการที่ (3) รวมกับกำลังสูญเสียรวมในระบบส่งจ่าย (Power Losses) ดังสมการที่ (4)

$$\sum_{i=1}^N (P_i) = P_D + P_{loss} \quad (3)$$

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{j=1}^N B_{0j} P_j + B_{00} \quad (4)$$

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

2.2.2 ข้อจำกัดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Rating Constraint)

เครื่องกำเนิดแต่ละตัวจะมีข้อจำกัดพิกัดการผลิตแตกต่างกัน แม้ว่าจะมีพิกัดกำลังการผลิตเท่ากัน ดังนั้นในการผลิตกำลังไฟฟ้า จะต้องอยู่ในข้อจำกัดพิกัดของเครื่องกำเนิด ดังสมการที่ (5)

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (5)$$

2.3 เงื่อนไขการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเครื่องกำเนิด

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากเครื่องกำเนิดพลังงานความร้อน เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ หรือน้ำมัน เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ในเตาเผา จะปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญออกมา มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยการปล่อยก๊าซเหล่านี้จะเพิ่มความร้อนในบรรยากาศและส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน การปล่อยมลพิษเหล่านี้สามารถแสดงเป็นผลรวมของฟังก์ชันกำลังสองและฟังก์ชันเลขชี้กำลังดังสมการที่ (6)

$$E_i(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 + \eta_i \exp(\delta_i P_i) \quad (6)$$

โดย α_i , β_i , γ_i , η_i และ δ_i คือ สัมประสิทธิ์การปล่อยมลพิษของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

3. การผสมผสานวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงแจกแจง

ในการผสมผสานกันของวิธีการเชิงการจัดและวิธีการเชิงแจกแจงในงานวิจัยนี้ใช้วิธี SA ผสมผสานกับวิธี BCO โดยได้ทำการเปรียบเทียบในแง่ของคุณภาพของคำตอบ และความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบกับวิธีการ SA และ BCO แบบดั้งเดิม ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

3.1 การจำลองการอบอุ่น

การจำลองการอบอุ่น Simulated Annealing (SA) เป็นวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากกระบวนการทำให้โลหะเย็นลงอย่างช้า ๆ ในกระบวนการหลอมโลหะของแข็งจะถูกหลอมที่อุณหภูมิสูงจนกระทั่งโมเลกุลทั้งหมดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จากนั้นจึงดำเนินการทำให้เย็นลง SA เป็นวิธี meta-heuristic โดยทั่วไปขั้นตอนวิธีการจำลองการอบอุ่นจะสุ่มเลือกคำตอบที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อบังคับของระบบ จากนั้นจะประเมินคุณภาพของคำตอบ และจะตัดสินใจว่าย้ายไปยังคำตอบใหม่ที่ดีกว่าเดิมหรืออยู่กับคำตอบปัจจุบันโดยพิจารณาจากความน่าจะเป็น และเงื่อนไขต่าง ๆ กลไกเพิ่มเติมสำหรับวิธี SA พารามิเตอร์ที่ต้องควบคุม ซึ่งรวมถึงอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสุดท้าย การลดอุณหภูมิและการทำซ้ำในแต่ละอุณหภูมิซึ่งอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

3.1.1 อุณหภูมิเริ่มต้น

จะต้องตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มต้นให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มโอกาสในการสุ่มคำตอบเริ่มแรกที่ดี หากตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นสูงเกินไป จะทำให้การลู่เข้าหาคำตอบช้าลงเนื่องจากกระบวนการในการสุ่มที่ทำให้พื้นที่ในการสุ่มหาคำตอบกว้างมากขึ้น และในทางกลับกันหากตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำเกินไปจะทำให้ได้คำตอบที่ติดอยู่ใน local ซึ่งไม่มีวิธีการเฉพาะในการค้นหาอุณหภูมิเริ่มต้นที่เหมาะสมกับแต่ละปัญหา ปกติจะตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นไว้สูงพอที่จะยอมรับคำตอบที่เลวร้ายที่สุด แต่ยังคงอยู่ในขอบเขตเงื่อนไข ข้อบังคับ จากนั้นจึงค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลง

3.1.2 อุณหภูมิต่ำสุด

ในระหว่างการหาคำตอบของวิธี SA ปกติจะปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงศูนย์องศา แต่อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับเกณฑ์การหยุดทำงาน ซึ่งอาจหยุดทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า หรือจุดที่สูงกว่า เมื่อได้คำตอบที่เหมาะสม หรือเมื่อระบบแข็งตัว

3.1.3 การลดอุณหภูมิ

เมื่อตั้งอุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิสุดท้ายแล้วจำเป็นต้องหาวิธีเปลี่ยนจากอุณหภูมิเริ่มต้นเป็นอุณหภูมิสุดท้าย วิธีที่อุณหภูมิลดลงมีความสำคัญมากต่อความสำเร็จของวิธีการ SA ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการลดอุณหภูมิแบบลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Chain) เนื่องจากการลดอุณหภูมิแบบเร็ว ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการความเร็วในการคำตอบ ดังสมการที่ (7)

$$T(k) = \frac{T(0)}{\log(1+k)}, k = 1, 2, \dots \quad (7)$$

โดยที่ k คือ จำนวนรอบที่กำลังทำซ้ำ

$T(k)$ คือ อุณหภูมิในจำนวนรอบที่ k

$T(0)$ คือ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น

$T(0)$ เป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ควรมีค่าบวกและมากเพียงพอ วิธีการ SA รับประกันว่าจะเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ เมื่อ $k \rightarrow \infty$ หรือในรูปแบบการลดอุณหภูมิอย่างง่าย ๆ ดังเช่นสมการที่ (8)

$$T(k) = \alpha T(k-1) \quad (8)$$

โดยที่ α คือค่าคงที่ที่มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่ง α เรียกว่าการลดอุณหภูมิแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Cooling Scheme หรือ ECS) นำเสนอครั้งแรกด้วยการใช้ค่า $\alpha = 0.95$ ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองปรับค่าตั้งแต่ 0.8 จนถึง 0.99 และเลือกค่าที่ 0.89 เนื่องจากได้ทดสอบจนเป็นค่าที่เหมาะสม

3.1.4 การทำซ้ำในแต่ละอุณหภูมิที่ลดลง

การปรับจำนวนการทำซ้ำของวิธีการ SA ให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญมาก การใช้การวนซ้ำของแต่ละอุณหภูมิที่ลดลงจะทำให้การหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วซึ่งจะต้องสอดคล้องกับความเร็วในการลดลงของอุณหภูมิด้วยซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การลดอุณหภูมิแบบเชิงเส้น (Linear Cooling Scheme หรือ LCS) กำหนดการลดค่าอุณหภูมิดังสมการ (9)

$$T(k) = T(k-1) - T' \quad (9)$$

โดยที่ T' เป็นค่าอุณหภูมิที่ลดลงไปในช่วงจำนวนการวนรอบที่กำหนด

3.2 การหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง

หลักการเบื้องต้นของวิธีฝูงผึ้ง เป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่เลียนแบบพฤติกรรม การหาน้ำหวานของผึ้ง ซึ่งมีผึ้งเป็นตัวดำเนินการ โดยแบ่งชนิดของผึ้งออกเป็น 2 ประเภท คือ ผึ้ง สอดแนม (Scout Bee) และ ผึ้งงาน (Employee Bee) เพื่อค้นหาคำตอบ สมมุติให้คำตอบที่ต้องการ คือ แหล่งน้ำหวาน หน้าที่ของผึ้งสอดแนม คือ ค้นหาแหล่งน้ำหวานในขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้ (Search Space) เมื่อผึ้งสอดแนม ค้นหาคำตอบได้ ก็จะบินกลับมาที่รังผึ้ง เพื่อสื่อสารกับ ผึ้งตัวอื่น ๆ ภายในรังผึ้ง การสื่อสารของผึ้งจะใช้วิธีการเด่นลักษณะต่าง ๆ เพื่อบอกปริมาณ น้ำหวาน ทิศทางของแหล่งน้ำหวาน จากนั้น ผึ้งงานก็จะไปทำหน้าที่ขนน้ำหวานในแหล่งน้ำหวาน โดยจำนวนผึ้งงานจะแปรตามปริมาณแหล่งน้ำหวาน และระยะทาง ข้อดีของวิธีการนี้ คือ มี โครงสร้างที่ง่าย และสามารถหาคำตอบได้ดี ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฝูงผึ้งนี้ จะต้องมีการกำหนดค่าของพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่

n คือ จำนวนของผึ้งสอดแนม (Number of Scout Bee)

m คือ จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีการเลือกแล้วจากทั้งหมด จากการหาของผึ้งสอดแนม n ตัว

e คือ จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีปริมาณน้ำหวานมากที่สุด จากที่เลือกแล้ว m แหล่ง

n_{ep} คือ จำนวนผึ้งงานที่กำหนดให้ไปหาที่แหล่งน้ำหวาน e แหล่ง

n_{sp} คือ จำนวนผึ้งงานที่กำหนดให้ไปหาที่แหล่งน้ำหวาน $m-e$ แหล่ง

ระเบียบวิธีฝูงผึ้งมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง

ขั้นตอนที่ 2 ให้ผึ้งสอดแนมจำนวน n ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้น ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็น คำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคือ อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด และสอดคล้องกับเงื่อนไข

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสอดแนม พร้อมทั้งจัดเรียงลำดับ จากคำตอบที่มีคุณภาพดีที่สุดไปหาคำตอบที่มีคุณภาพต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 4 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี m คำตอบ

ขั้นตอนที่ 5 คัดแยกคำตอบ e คำตอบนี้ ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกมีคำตอบที่ดีที่สุด e คำตอบ และกลุ่มที่ 2 มีคำตอบที่ด้อยลงมา $m-e$ คำตอบ

ขั้นตอนที่ 6 ให้ผึ้งงานจำนวน n_{ep} ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ e คำตอบ และผึ้งงานจำนวน n_{sp} ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ $m-e$ คำตอบ

ขั้นตอนที่ 7 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งงานในแต่ละแหล่ง และเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไข ให้หยุดการค้นหา ถ้าไม่ให้เพิ่มจำนวนรอบของการทำซ้ำ แล้วไปดำเนินในขั้นตอนที่ 2

3.3 การผสมผสานวิธี SA กับวิธี BCO เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายไหลได้อย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชิงเส้นแบบไม่เรียบ

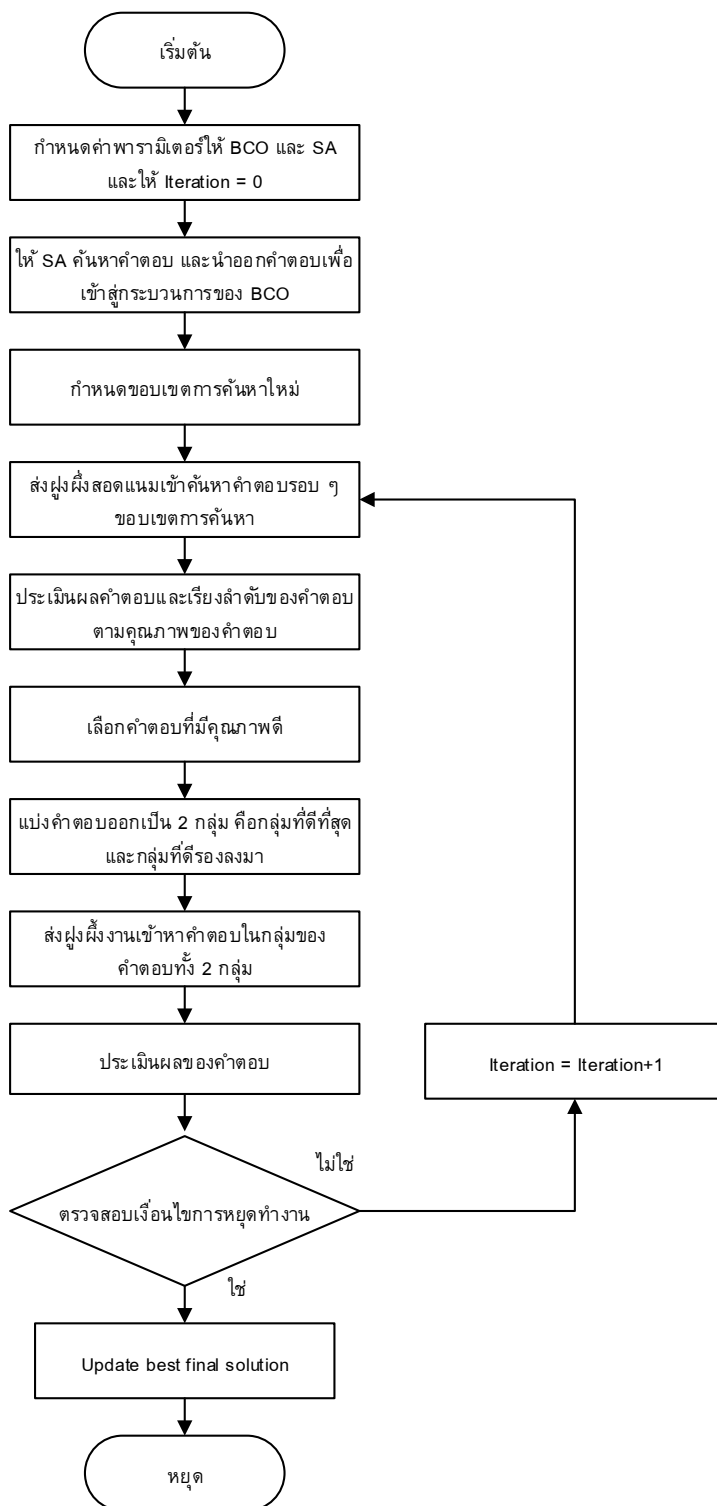
SA มีคุณสมบัติเด่นในการหลีกเลี่ยงการติดอยู่ในคำตอบเฉพาะถิ่น ในขณะที่วิธี BCO มีจุดเด่นในการปรับปรุงคำตอบในพื้นที่ที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเน้นที่การทำงานแบบร่วมมือระหว่างผึ้งสอดแนม และผึ้งงาน การเลือกใช้ SA และ BCO มาจากความสามารถที่ต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ให้เหมาะสมกับปัญหาการจ่ายไหลได้อย่างประหยัด ที่มีฟังก์ชันเชิงเส้นแบบไม่เรียบได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีที่นำเสนอนี้มีข้อดีกว่าวิธีการอื่นหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพในการหลีกเลี่ยงคำตอบเฉพาะถิ่น การปรับปรุงคำตอบในระดับลึก ลดเวลาในการค้นหาคำตอบ โดยในการผสมผสานวิธีการ SA เข้ากับวิธีการ BCO เป็นการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาการจ่ายไหลได้อย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชิงเส้นแบบไม่เรียบนั้น ในเบื้องต้นเป็นการนำเอาวิธี SA เข้าไปเป็นโปรแกรมฟังก์ชันของวิธี BCO โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 2

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้งดังตารางที่ 1 และสำหรับวิธีการ SA ดังตารางที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 ให้วิธีการ SA ค้นหาคำตอบในรอบแรก โดยใช้คุณสมบัติการหาคำตอบของวิธีการ SA เพื่อนำผลของคำตอบไปเป็นค่าเริ่มต้น

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับวิธี BCO

Parameters	Number
Population size (n)	20
Selected sites (m)	10
Best sites (e)	5
Bees around best sites (n_{ep})	50
Bees around other sites (n_{sp})	50



รูปที่ 2 แผนผังการทำงานของวิธีการที่นำเสนอ

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์สำหรับวิธี SA

Parameters	Number
Initial temperature	100
Final temperature	5
Cool shed	0.89
Maximum number of tries	1000
Maximum number of successes within	50

จากตารางที่ 1 จำนวนประชากร Population size = 20 เป็นค่าที่สมดุลระหว่าง การสำรวจ พื้นที่คำตอบ (exploration) และ เวลาในการคำนวณ หากมากเกินไปจะเพิ่มเวลาในการคำนวณ หากน้อยเกินไปจะลดความสามารถในการค้นหาคำตอบ

Selected sites คือจำนวนคำตอบที่ดีที่สุดที่ถูกเลือกเพื่อสำรวจในรอบถัดไป เป็นการควบคุมว่าผึ้งงานจะเลือกสำรวจบริเวณที่มีศักยภาพในการปรับปรุงคำตอบมากที่สุดกี่จุด การเลือก Selected sites = 10 ช่วยให้เกิดความสมดุลระหว่างการสำรวจ และการปรับปรุง โดยยังสามารถครอบคลุมพื้นที่คำตอบได้ในวงกว้าง

Best sites คือจำนวนจุดที่ดีที่สุด ใน Selected sites ซึ่งจะควบคุมการปรับปรุงในพื้นที่ที่มีโอกาสสูงที่สุดในการได้คำตอบที่ดีกว่า การเลือก เลือก Best sites = 5 เพื่อให้ผึ้งงานสามารถทุ่มทรัพยากรไปที่จุดที่มีโอกาสให้คำตอบที่ดีที่สุด โดยยังเหลือพื้นที่สำหรับการสำรวจในจุดอื่น

Bees around best sites จำนวนผึ้งงานที่ทำการสำรวจเชิงลึกในพื้นที่รอบ Best sites การเลือก Bees around best sites = 50 เพื่อเพิ่มโอกาสในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในพื้นที่ที่มีศักยภาพมากที่สุด

Bees around other sites จำนวนผึ้งงานที่สำรวจพื้นที่รอบ ๆ จุดอื่น ๆ ที่ถูกเลือก การตั้งค่า Bees around other sites ให้เท่ากับ Bees around best sites เพื่อให้เกิดการสำรวจในจุดที่เหลืออย่างเพียงพอ โดยไม่ละเลยจุดอื่น ๆ ที่อาจนำไปสู่คำตอบที่ดีกว่าในรอบถัดไป

การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับ BCO ในครั้งนี้เกิดจากการพิจารณาลักษณะของปัญหาและการปรับแต่งจากการทดลองหลายร้อยครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่าค่าที่เลือกช่วยสร้างสมดุลระหว่าง ประสิทธิภาพและความแม่นยำ

จากตารางที่ 2 Initial temperature คืออุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิเริ่มต้นที่สูงนี้ถูกตั้งขึ้นเพื่อให้กระบวนการของ SA สามารถสำรวจคำตอบที่หลากหลายได้ในช่วงแรกโดยไม่จำกัดตัวเลือก ค่าที่สูงนี้ช่วยให้ SA สามารถหลุดจาก local optimum ได้ในช่วงเริ่มต้น ซึ่งทำให้สามารถสำรวจพื้นที่การค้นหาก็กว้างขึ้นในระยะแรก

Final temperature อุณหภูมิสุดท้ายถูกตั้งไว้ที่ 5 องศาเพื่อให้การค้นหามีความละเอียดในระยะสุดท้าย ขณะที่ลดอุณหภูมิไปจนถึงระดับต่ำสุด ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองปรับค่าอุณหภูมิสุดท้ายให้ต่ำตั้งแต่ 1-5 องศาซึ่งปรากฏว่า ในช่วงอุณหภูมินี้ให้คำตอบที่ดีที่สุดใกล้เคียงกัน แต่เวลาในการค้นหาคำตอบนั้นค่อนข้างต่างกันมาก โดยพบว่ายิ่งตั้งอุณหภูมิสุดท้ายไว้ต่ำจะยิ่งใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนาน

Cooling Rate ที่ 0.89 หมายถึงอุณหภูมิจะลดลง 11% ในแต่ละขั้นตอน ค่า cooling rate ที่สูงจะทำให้การลดอุณหภูมิช้าลง ซึ่งช่วยให้กระบวนการค้นหามีเวลาเพียงพอในการสำรวจพื้นที่ที่หลากหลาย โดยเฉพาะในช่วงแรก โดยได้ทำการปรับตั้งแต่ 0.80-0.99 ค่า cooling rate ที่ 0.89 ถือว่าเหมาะสมสำหรับการหาคำตอบในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบก่อนจะเริ่มลดการสำรวจและมุ่งไปที่การปรับปรุงในพื้นที่ใกล้เคียง

Maximum Number of Tries เป็นจำนวนครั้งสูงสุดที่อัลกอริทึมสามารถเปลี่ยนแปลงคำตอบในหนึ่งรอบ การตั้งค่า maximum number of tries ที่ 1000 ช่วยให้กระบวนการค้นหามีโอกาสหลาย ๆ ครั้งในการสำรวจพื้นที่การค้นหทั้งหมด โดยไม่ทำให้การคำนวณใช้เวลานานเกินไป ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำ โดยยังคงสามารถควบคุมเวลาในการคำนวณ

Maximum Number of Successes within เป็นจำนวนความสำเร็จสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นในหนึ่งรอบก่อนที่จะหยุดกระบวนการ หากมีการการยอมรับการเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นเกิดขึ้น 50 ครั้งภายในหนึ่งรอบ การคำนวณจะหยุดก่อนที่จะใช้เวลานานเกินไป จำนวนนี้ทำหน้าที่ในการควบคุมว่าอัลกอริทึมจะหยุดหรือไม่ โดยอิงจากจำนวนความสำเร็จที่เกิดขึ้น ภายในข้อจำกัดเวลาที่ตั้งไว้

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า $P_{i(SA)}$ ที่ได้จากวิธี SA เป็นนำมาใช้เป็นคำตอบเริ่มต้น เมื่อ $P_{i(SA)}$ คือค่ากำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดแต่ละตัวที่ได้จากวิธี SA

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดขอบเขตการค้นหาคำตอบใหม่ ซึ่งจะให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุด และกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดแต่ละตัวใหม่ ดังสมการที่ (10) และ (11)

$$P_i^{\max(\text{new})} = P_{i(SA)} + (P_{i(SA)} \times \text{rank}) \quad (10)$$

$$P_i^{\min(\text{new})} = P_{i(SA)} - (P_{i(SA)} \times \text{rank}) \quad (11)$$

เมื่อ rank คือตัวคูณเพื่อใช้เป็นตัวกำหนดให้ขอบเขตพื้นที่การค้นหาลดลงหรือเพิ่มขึ้น มีค่ามากกว่า 0 และน้อยกว่า 1

ขั้นตอนที่ 5 ให้ฝั่งสอดแนมจำนวน n ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้นภายในขอบเขตพื้นที่ที่ถูกกำหนดขึ้นมาใหม่ ด้วยสมการที่ (12) ซึ่งจะมีช่วงของการค้นหาแคบลงมาก

$$P_i = P_i^{\min(\text{new})} + ((P_i^{\max(\text{new})} - P_i^{\min(\text{new})}) \times \text{rand}(0,1)) \quad (12)$$

เมื่อถึงขั้นตอนนี้ขั้นตอนการดำเนินงานจะกลับไปขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฝูงผึ้งในหัวข้อ 3.2 ขั้นตอนที่ 2 จนถึงขั้นตอนที่ 8 และถ้าคำตอบไม่เป็นไปตามเงื่อนไขกำหนดก็จะย้อนกลับมาในขั้นตอนที่ 5 ของวิธีการผสมผสานที่นำเสนอ

4. ผลการทดสอบ

วิธีการผสมผสาน (Hybrid method) ที่นำเสนอ ได้รับการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพด้วยปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ในสองกรณีศึกษาที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงเป็นแบบไม่เรียบ ระบบที่พิจารณาประกอบด้วยหน่วยผลิตไฟฟ้าจำนวน 40 หน่วย ซึ่งสามารถให้พลังงานรวมที่มีความต้องการโหลด 10500 MW ในระบบทดสอบนี้ พิจารณาผลกระทบจากการโหลดที่จุตวาล์ว นอกจากนี้ โดยไม่คิดการสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้า และพิจารณาอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยแบ่งการเปรียบเทียบผลเป็น 2 กรณี กรณีที่ 1 ใช้วิธี SA และ BCO แบบดั้งเดิมในการเปรียบเทียบและประเมินประสิทธิภาพของแต่ละวิธีกับวิธีการที่นำเสนอ จะเปรียบเทียบในแง่ของคุณภาพของคำตอบ และความเร็วในการหาคำตอบ ซึ่งวิธีการทั้งหมดจะดำเนินการในช่วงเวลาเดียวกัน ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องเดียวกัน กรณีที่ 2 วิธีการที่นำเสนอจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่เป็นบทความวิจัยระดับนานาชาติ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ โดยวิธีที่นำมาเปรียบเทียบมีคุณลักษณะของเครื่องกำเนิด พารามิเตอร์ของระบบ และเงื่อนไขข้อบังคับเหมือนกันทั้งหมด

4.1 ผลการทดสอบ และเปรียบเทียบ

ระบบทดสอบสำหรับงานที่นำเสนอ ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 40 หน่วย ที่ความต้องการของระบบ 10,500 MW เป็นระบบที่มีลักษณะต้นทุนแบบไม่ราบเรียบ และคิดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ไม่คิดความสูญเสียในสายส่ง คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดแต่ละตัวดัง [26] โดยการเปรียบเทียบผลในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบกับวิธี CFLBO และวิธี Gravitational Search Algorithm: GSA ทั้งสองวิธีมักถูกนำมาใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อน ทำให้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบ โดยเฉพาะวิธี CFLBO เป็นแนวคิดที่น่าสนใจ และเป็นนวัตกรรมใหม่ที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหานี้ การเปรียบเทียบวิธีผสมผสานที่นำเสนอกับวิธี CFLBO และ GSA เนื่องจากทั้งสองวิธีนี้ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาฟังก์ชันต้นทุนแบบไม่ต่อเนื่อง และเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ซึ่งมี Valve-point Effects และข้อจำกัดที่ซับซ้อน

นอกจากนี้ การเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม อาจไม่ได้แสดงถึงจุดเด่นของวิธีผสมผสานที่น่าเสนออย่างเต็มที่ เนื่องจากวิธีดั้งเดิมเหล่านั้นอาจมีข้อจำกัดในด้านการจัดการฟังก์ชันต้นทุนแบบไม่ต่อเนื่อง ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบกับวิธี SA, BCO, GSA [28] และ CFLBO [26]

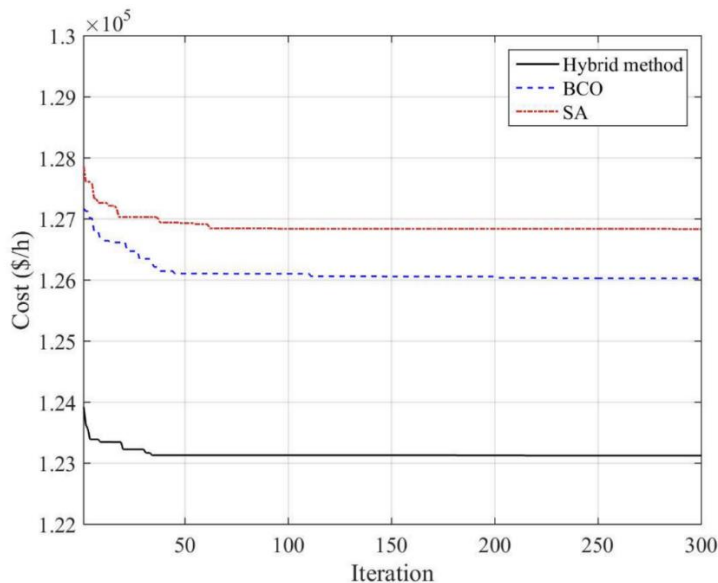
Unit	SA	BCO	GSA	CFLBO	Hybrid method
P_1 (MW)	112.6638	113.8608	113.9989	110.4068	113.9302
P_2 (MW)	112.0271	113.9505	113.9896	113.4505	113.9169
P_3 (MW)	90.5274	118.2157	119.9995	108.4061	92.0030
P_4 (MW)	178.5957	180.9283	179.7857	177.7379	177.5020
P_5 (MW)	93.7829	96.9003	97.0000	88.3691	96.9867
P_6 (MW)	134.6855	137.3831	139.0128	121.9143	239.9631
P_7 (MW)	289.1011	298.9043	299.9885	285.3091	299.7903
P_8 (MW)	291.3122	299.7165	300.0000	299.3117	283.5355
P_9 (MW)	295.1700	288.2939	296.2025	289.0739	299.7623
P_{10} (MW)	130.3227	130.8089	130.3850	130.0000	130.0927
P_{11} (MW)	319.1238	140.2398	245.4775	240.4698	318.1252
P_{12} (MW)	233.1609	143.1103	318.2101	243.3303	241.6763
P_{13} (MW)	379.8767	390.2516	394.6257	395.5716	391.9489
P_{14} (MW)	387.7647	385.1233	395.2016	395.2566	394.5924
P_{15} (MW)	386.9074	388.4389	306.0014	394.2189	394.2358
P_{16} (MW)	389.7757	385.0000	395.1005	396.0000	394.3498
P_{17} (MW)	496.3630	417.6393	489.2569	447.4039	490.8084
P_{18} (MW)	498.4421	512.6025	488.7598	495.1025	484.0925
P_{19} (MW)	438.4017	514.0314	499.2320	478.8628	423.7259
P_{20} (MW)	512.2324	473.4005	455.2821	424.4995	507.7054
P_{21} (MW)	445.2992	469.4305	433.4520	499.9355	438.6248
P_{22} (MW)	421.8027	505.1345	433.8125	512.4599	433.9239

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบกับวิธี SA, BCO, GSA [28] และ CFLBO [26] (ต่อ)

Unit	SA	BCO	GSA	CFLBO	Hybrid method
P_{23} (MW)	446.2070	500.9483	445.5136	500.6126	434.1913
P_{24} (MW)	436.4232	525.2841	452.0547	456.7811	446.4250
P_{25} (MW)	458.8028	440.4011	492.8864	440.8122	436.9798
P_{26} (MW)	453.1461	466.0732	433.3695	438.6621	433.7342
P_{27} (MW)	10.6757	10.0085	10.0026	10.9679	10.2157
P_{28} (MW)	11.3398	10.0043	10.0246	10.4538	11.1558
P_{29} (MW)	10.2961	10.0138	10.0125	10.4108	10.2489
P_{30} (MW)	96.0320	96.7902	96.9125	89.5072	96.9058
P_{31} (MW)	185.7889	189.3333	189.9689	183.3655	189.9895
P_{32} (MW)	180.9851	188.3923	175.0000	183.0703	189.8184
P_{33} (MW)	189.7550	188.0397	189.0181	173.0104	189.8180
P_{34} (MW)	198.4082	199.9584	200.0000	199.7548	199.8031
P_{35} (MW)	192.1324	199.0090	200.0000	199.4690	199.8970
P_{36} (MW)	198.0056	199.1051	199.9978	199.3909	199.8120
P_{37} (MW)	105.7192	106.8353	109.9969	105.0895	109.9315
P_{38} (MW)	109.2942	106.0028	109.0126	96.2228	109.9323
P_{39} (MW)	105.3740	106.1313	109.4560	96.33841	109.9688
P_{40} (MW)	474.4860	454.4314	421.9987	458.0239	459.9023
P_T (MW)	10500	10500	10500	10500	10500
F_T (\$/h)	126744.0379	126092.01	125782	125404.06	123181
Emission (Ton/h)	223993.1887	271472.4855	210932.9	229799.4	215355.5128

ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า Hybrid method มีความสามารถในการค้นหาจุดที่เหมาะสมในพื้นที่การค้นหามากกว่าเมื่อเทียบกับวิธี SA และวิธี BCO วิธีแบบ Hybrid method ให้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 123181 \$/h ซึ่งให้ผลลัพธ์ของคำตอบในแง่ของต้นทุนการผลิตที่ดีเมื่อเทียบกับผลลัพธ์

อื่น ๆ ในตาราง อย่างไรก็ตาม วิธีที่นำเสนอได้ให้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ที่ 215355.5128 Ton/h ซึ่งยังมีค่าสูงกว่าวิธี GSA เล็กน้อย แต่ต้นทุนการผลิตรวมยังต่ำกว่ามาก ในรูปที่ 3 วิธีการของ SA ลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมตั้งแต่การทำซ้ำประมาณ 60 ครั้งเป็นต้นไป BCO ลู่เข้าหาคำตอบที่การทำซ้ำประมาณ 120 ครั้งเป็นต้นไปในขณะที่ Hybrid method ลู่เข้าหาคำตอบด้วยการทำซ้ำน้อยกว่า 30 ครั้ง จะเห็นได้ว่า Hybrid method มีความเร็วในการลู่เข้าที่เร็วที่สุด



รูปที่ 3 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบ

5. สรุป

การแก้ปัญหาค่าตอบที่หาได้โดยง่ายด้วยเทคนิคของการใช้วิธีการเชิงการจัดร่วมกับวิธีเชิงแจกแจง เป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบที่นำเอาลักษณะเด่นของแต่ละวิธีมารวมกันเพื่อเสริมข้อเด่น และกำจัดข้อด้อย โดยวิธีเชิงการจัดผู้วิจัยได้ใช้วิธี SA ซึ่งเป็นวิธีที่ลู่เข้าหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว แต่คุณภาพของคำตอบยังไม่ดี และวิธีเชิงแจกแจงผู้วิจัยได้ใช้วิธี BCO ซึ่งลู่เข้าหาคำตอบได้ช้า แต่ให้คุณภาพของคำตอบที่ดีกว่า SA เทคนิควิธีคือ ให้วิธี SA หาคำตอบที่ดีที่สุดของมา โดยเขียนโปรแกรมให้วิธี SA เป็นฟังก์ชันใน M-File ใช้คำตอบที่ได้จากวิธี SA เป็นค่าเริ่มต้นในการค้นหาคำตอบ จากนั้นกำหนดช่วงในการค้นหาคำตอบรอบ ๆ คำตอบเริ่มต้นให้เกิดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดใหม่ ยังผลให้ขอบเขตในการค้นหาคำตอบแคบลง และเนื่องมาจากการค้นหาคำตอบโดยวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้งนั้น เป็นการค้นหาคำตอบแบบสุ่ม ความกว้างของค่าที่จะต้องทำการสุ่มนั้นจะลดลงอย่างมาก อีกทั้งค่าเริ่มต้นที่ได้มาจากวิธี SA เป็นค่าที่เป็นไป

ตามเงื่อนไขของเครื่องกำเนิดแต่ละตัวอยู่แล้ว ยิ่งทำให้เกิดความเร็วในการค้นหาคำตอบมากขึ้น ซึ่งคำตอบที่ได้มีโอกาสที่จะเป็นคำตอบเฉพาะถิ่น (Local) น้อยมาก ในการค้นหารอบต่อไป จะเป็นการใช้คุณสมบัติของวิธีการ BCO ในการค้นหาคำตอบ ซึ่งจะเป็นการค้นหาคำตอบที่ทำให้การลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็ว ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบกับระบบขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 40 หน่วยที่มีความซับซ้อนของระบบคือเป็นฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบ และคำนวณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมจะเครื่องกำเนิดแต่ละตัว เปรียบเทียบการลู่เข้าหาคำตอบกับวิธี SA และ BCO แบบดั้งเดิม ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีที่นำเสนอแนะนั้นสามารถลู่เข้าหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว ลู่เข้าหาคำตอบที่ประมาณน้อยกว่า 30 Iteration และในแง่ของต้นทุนการผลิตรวมเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างวิธี SA และ BCO วิธีที่นำเสนอแนะให้ผลลัพธ์ของคำตอบที่ดีกว่า และมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสองวิธีแบบดั้งเดิม และเพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอแนะ ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของคำตอบกับวิธี GSA และ CFLBO จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอแนะนี้ ให้ค่าของคำตอบที่ดีกว่า ในแง่ของต้นทุนการผลิตรวม แต่ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกยังมีค่าสูงกว่าวิธี GSA เล็กน้อย อันเนื่องมาจากการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยไม่ได้นำค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้ยังคงเป็นต้นทุนการผลิตรวมตามสมการที่ 1 ซึ่งเป็นงานที่ผู้วิจัยจะดำเนินการต่อไปในเรื่องเกี่ยวกับ Multi-Objective Function จากการทดสอบวิธีที่นำเสนอแนะมีโอกาสได้ค่าที่เหมาะสมมากกว่าเดิม ค่าที่ได้นี้เป็นที่ยอมรับได้ และมีคำตอบที่ดีกว่า ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการผลิตกำลังงานไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

References

- [1] Wood AJ, Wollenberg BF. Power generation operation and control. New York, USA: Wiley; 1984.
- [2] Chang Y, Chan T, Lee W. Economic dispatch of chiller plant by gradient method for saving energy. Applied Energy 2010;87(4):1096-101.
- [3] El-Keib AA, Ma H, Hart JL. Environmentally constrained economic dispatch using the LaGrangian relaxation method. IEEE Transactions Power Systems 1994;9(4):1723-9.
- [4] Ringlee RJ, Williams DD. Economic dispatch operation considering valve throttling losses, II-distribution of system loads by the method of dynamic programming. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1963:615-20.
- [5] Venkatesh M, Raghu R. Economic load dispatch using simulated annealing algorithm. International Research Journal of Engineering and Technology 2015;2(3):1961-4.

- [6] Ziane I, Benhamida F, Graa A. Simulated annealing algorithm for combined economic and emission power dispatch using max/max price penalty factor. *Neural Computing and Applications* 2017;28:197-205.
- [7] Bouddou R, Benhamida F, Haba M, Belgacem M, Meziane MA. Simulated annealing algorithm for dynamic economic dispatch problem in the electricity market incorporating wind energy. *Ingénierie des Systèmes d'Information* 2020;25(6):719-27.
- [8] Naama B, Bouzeboudja H, Allali A. Solving the economic dispatch problem by using tabu search algorithm. *Energy Procedia* 2013;36:694-701.
- [9] Kumar VJ. Optimization of economic load dispatch problem by using tabu search algorithm. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology* 2017;8(4-1):182-7.
- [10] Daniel L, Chaturvedi KT. Economic load dispatch using ant lion optimization. *International Journal of Engineering Trends and Technology* 2019;67(4):81-4.
- [11] Nazari-Heris M, Mehdinejad M, Mohammadi-Ivatloo B, Babamalek-Gharehpetian G. Combined heat and power economic dispatch problem solution by implementation of whale optimization method. *Neural Computing Applications* 2019;31:421-36.
- [12] Okozi SO, Ogbonna GC, Olubiwe M, Ezugwu EO. Solution to the economic dispatch problem of the Nigerian power system using genetic algorithm. *Nigerian Journal of Technology* 2019;38(4):1036-47.
- [13] Pulluri H, Vyshnavi M, Shraddha P, Sai Priya B, Hari TS, Preeti. Genetic algorithm with multi-parent crossover solution for economic dispatch with valve point loading effects. In: Saini HS, Srinivas T, Vinod Kumar DM, Chandragupta Mauryan KS, editors. *Innovations in Electrical and Electronics Engineering*. Singapore: Springer; 2020. p. 429-38.
- [14] Kalakova A, Nunna HSVSK, Jamwal PK, Doolla S. A novel genetic algorithm based dynamic economic dispatch with short-term load forecasting. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2020;57(3):2972-82.
- [15] Chen X, Li K, Xu B, Yang Z. Biogeography-based learning particle swarm optimization for combined heat and power economic dispatch problem. *Knowledge-Based Systems* 2020;208:106463.
- [16] Khan NH, Wang Y, Tian D, Raja MAZ, Jamal R, Muhammad Y. Design of fractional particle swarm optimization gravitational search algorithm for optimal reactive power dispatch problems. *IEEE Access* 2020;8:146785-806.

- [17] Paramguru J, Kumar Barik S, Kumar Barisal A, Dhiman G, HJ Rutvij, Alkahtani M, et al. Addressing economic dispatch problem with multiple fuels using oscillatory particle swarm optimization. Computers, Materials and Continua 2021;69(3):2863-82.
- [18] Suresh V, Janik P, Jasinski M. Metaheuristic approach to optimal power flow using mixed integer distributed ant colony optimization. Archives of Electrical Engineering 2020;69(2):335-48.
- [19] Godha NR, Bapat VN, Korachagaon I. Ant colony optimization technique for integrating renewable DG in distribution system with techno-economic objectives. Evolving Systems 2022;13:485-98.
- [20] Tung NS, Chakravorty S. Solution to economic power dispatch planning problem considering generator constraints using artificial bee colony algorithm. International Journal of Hybrid Information Technology 2016;9(5):399-406.
- [21] Raghav RS, Amudhave J, Dhavachelvan P. Enhanced artificial bee colony optimization for solving economic load dispatch. IIOAB Journal 2018;8(2):208-16.
- [22] Aurasopon A, Khamsen W. An improved local search involving bee colony optimization using lambda iteration combined with a golden section search method to solve an economic dispatch problem. Przegląd Elektrotechniczny 2019;95(1):202-8.
- [23] Aurasopon A, Takeang C. Hybrid algorithm combining lambda iteration and bee colony optimization to solve an economic dispatch problem with prohibited operating zones. Przegląd Elektrotechniczny 2019;95(10):12-7.
- [24] Aurasopon A, Takeang C. Multiple hybrid of lambda iteration and bee colony optimization method for solving economic dispatch problem. International Journal Electrical Engineering and Informations 2021;13(1):57-72.
- [25] Tahir MW, Abbas G, Ilyas MA, Ullah N, Muyeen SM. Economic emission and energy scheduling for renewable rich network using bio-inspired optimization. IEEE Access.2022;10:79713-29.
- [26] Suman M, Sakthivel VP. Coulomb's and Franklin's law based optimization for nonconvex economic and emission dispatch problems. International Energy Journal 2020;20:225-38.

- [27] Singh N, Chakrabarti T, Chakrabarti P, Margala M, Gumta A, Phani Praveen S, et al. Novel heuristic optimization technique to solve economic load dispatch and economic emission load dispatch problems. *Electronics* 2023;12(13):2921.
- [28] Guvenc U, Sonmez Y, Duman S, Yorukeren N. Combined economic and emission dispatch solution using gravitational search algorithm. *Scientia Iranica* 2012;19(6):1754-62.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผศ.ดร.จิรพนธ์ ทาแกง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง เลขที่ 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000 โทรศัพท์ 054342547 โทรสาร 054342549 โทรศัพท์มือถือ 0863697901 E-mail: chiraphon@rmutl.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy)



รศ.ดร.วันไชย คำเสน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง เลขที่ 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000 โทรศัพท์ 054342547 โทรสาร 054 342549 E-mail: wanchai_kh@rmutl.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch)



นางสาวทวิพันธ์ จันทะวัง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง เลขที่ 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000 โทรศัพท์ 0650013720 E-mail: Thawinan_jan@rmutl.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: Meta-Heuristics ในระบบไฟฟ้ากำลัง การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch)



อาจารย์เฟลิน จันทรสุยะ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
เลขที่ 99 หมู่ 10 ต.ทรายขาว อ.พาน จ.เชียงราย 57120 โทรศัพท์
053723979 E-mail: jansuya@rmutl.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: พลังงานทดแทน การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ระบบไฟฟ้า
กำลัง การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch)

Article History:

Received: October 7, 2024

Revised: December 1, 2024

Accepted: December 16, 2024