

**การแก้ปัญหาจ่ายโหลดอย่างประหยัดของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน
โดยใช้เทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงช้าง
SOLVING ECONOMIC DISPATCH PROBLEM OF A THERMAL POWER
PLANT USING ANTLION OPTIMIZATION TECHNIQUE**

จิรพันธ์ ทาแกง¹, วันไชย คำเสน² และ อภินันท์ อูร์โสภณ³

^{1,2}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ลำปาง 200 หมู่ 17 ตำบลพิชัย อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52000,

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

³อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
41/20 ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150, aurasopon@yahoo.com

Chiraphon Takeang¹, Wanchai Khamseen² and Apinan Aurasopon³

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

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

³Lecturer, Faculty of Engineering, Maha Sarakham University, 41/20 Kham Rieng
Sub-District, Kantharawichai district, Maha sarakham 44150, Thailand, aurasopon@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงเป็นแบบเรียบ ด้วยเทคนิคใหม่ที่เรียกว่า การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงช้าง (ANTLION OPTIMIZATION TECHNIQUE: ALO) เป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบที่เลียนแบบการหาอาหารของตัวอ่อนแมงช้างที่จะขุดหลุมทรงกรวยเป็นกับดักเพื่อหาอาหาร ในระบบทดสอบได้พิจารณาถึงความต้องการของระบบไฟฟ้า ค่าสูญเสียในสายส่ง และเงื่อนไขข้อบังคับต่างๆ ของระบบ การจำลองใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองการทำงาน และทดสอบกับกรณีศึกษาที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 หน่วย และระบบที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 15 หน่วย เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่ ALO ได้ทำการเปรียบเทียบผลกับวิธี SAO, PSO และวิธี HLBCO ในกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2 ได้ทดสอบเปรียบเทียบกับวิธี BCO, MBCO และ PSO จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่นำเสนอมีความเร็วในการหาคำตอบที่ดี

และในแง่ของต้นทุนการผลิตรวมวิธีการที่นำเสนอมีค่าของต้นทุนการผลิตรวมต่ำกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบในทั้งสองกรณี ดังนั้นจึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง

คำสำคัญ: เทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงช้าง, การจ่ายโหลดอย่างประหยัด, ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบเรียบ

ABSTRACT

This paper presents the optimization to solve the economical load problem with a smooth-cost function. With a new technique called ANTLION OPTIMIZATION TECHNIQUE: ALO. It is a technique to find the answers that mimic the feeding of the larvae of the antlion to dig a cone hole into a trap for food. In the test system, the system needs to be considered, losses in transmission line and conditions of the system. Use MATLAB program to simulate the operation. Experiment with a case study consisting of 3 generators and a system consisting of 6 generators. The evaluation of the efficiency of the method by ALO compared the results with the SAO, PSO and HLBCO methods in case study 1 and case study 2 compared with BCO, MBCO and PSO. Based on the test results, it can be concluded that the proposed method has convergent speed approaching good answers and in terms of total cost of production. The proposed method has a lower total cost of production than the comparison method in both cases. So it's an effective method.

KEYWORDS: antlion optimization technique, economic dispatch, smooth-cost function

1. บทนำ

ต้นทุนการดำเนินงานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับต้นทุนเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจะลดลงโดยการวางแผนการผลิตและการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม การจัดส่งกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดจะสามารถกำหนดกำลังการผลิตของพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการในขณะที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยที่ผลิตกำลังไฟฟ้า ปัญหาดังกล่าว เรียกว่าปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch Problem: ED) ED กลายเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับการดำเนินงานและการวางแผนการผลิต วัตถุประสงค์หลักของปัญหา ED ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าคือการวางแผนการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ได้ตามความต้องการของระบบสามารถรองรับความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ในราคาที่ต่ำที่สุด โดยจะต้องอยู่ในเงื่อนไข ขอบเขตและข้อจำกัดการทำงานของระบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในอดีตที่ผ่านมามีความพยายามในการแก้ไขปัญหา ED มากมายหลายวิธี ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์และวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Methods) เช่นวิธี Lamda Iteration [1], Lagrangian relaxation [2], gradient method [3], dynamic programming [4], linear programming [5] และ nonlinear programming [6] วิธีการเหล่านี้เป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหา ED ซึ่งได้ผลดีในระดับหนึ่ง แต่คำตอบที่ได้มักจะติดอยู่กับคำตอบที่เป็น Local ซึ่งเป็นคำตอบที่อาจจะยังไม่ใช่ว่าคำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนี้วิธีการแบบดั้งเดิมยังขาดความสามารถในการคำนวณเมื่อระบบมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน เมื่อไม่นานมานี้มีวิธีที่ได้รับการคิดค้นและพัฒนาเพื่อแก้ปัญหา ED นั่นคือวิธีเมตาฮิวริสติกส์ (meta-heuristics) เป็นวิธีที่เลียนแบบพฤติกรรมในการหาอาหารของสิ่งมีชีวิตหรือระบบและกลไกตามธรรมชาติ เช่น วิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [7] เป็นวิธีที่เลียนแบบการพัฒนาสายพันธุ์เพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ที่ดีที่สุด วิธีอนุภาคกลุ่ม (Particle Swarm Optimization: PSO) [8] โดยศึกษาจากพฤติกรรมทางสังคม การหาอาหารของนกหรือปลา วิธีการอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization: ACO) [9] เป็นวิธีที่สังเกตเส้นทางในการหาอาหารของฝูงมด การค้นหาแบบตาบอด (Tabu Search: TS) [10] วิธีนี้จะจดจำคำตอบที่ผ่านมาและห้ามคำตอบใหม่ไม่ให้กลับไปคำตอบเดิมซึ่งด้อยกว่า วิธีการแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search Algorithm: CSA) [11] วิธีการนี้เลียนแบบพฤติกรรมของกาฝากบางสายพันธุ์และพฤติกรรมการบินของนกและแมลงบางชนิดเพื่อหาอาหาร การจำลองการอบเหนียวของโลหะ (simulation annealing: SA) [12] วิธีการนี้เป็นการจำลองการลดอุณหภูมิของโลหะคำตอบที่ได้จะเปลี่ยนไปหาค่าของคำตอบเป็นค่าที่ดีกว่าค่าเดิม วิธีอาณานิคมผึ้ง (Bee Colony Optimization: BCO) [13] เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมการหาน้ำหวานของฝูงผึ้งและ วิธี Vortex Search Algorithm (VSA) [14] เป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้รับแรงบันดาลใจจากการกวนวัสดุเหลว เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมการค้นหา meta-heuristic วิธีใหม่มันถูกเรียกว่า Ant Lion Optimization (ALO) ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย Seyedali Mirjalili ในปี 2015 [15] ALO เป็นวิธีการใหม่ ขั้นตอนไม่ซับซ้อน และมีพารามิเตอร์ในการตั้งค่าไม่มาก โดยเลียนแบบพฤติกรรมที่ชาญฉลาดของแมงซางในการล่าเหยื่อซึ่งเป็นอาหารในธรรมชาติ ALO ใช้เป็นแนวทางและทางเลือกในการแก้ปัญหา ED โดยพิจารณาถึงเงื่อนไขข้อบังคับของระบบ ตลอดจนการสูญเสียในสายส่ง ความเป็นไปได้ของวิธีการที่นำเสนอแสดงให้เห็นในระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 6 หน่วย และเครื่องกำเนิด 15 หน่วย ผลที่ได้รับจากอัลกอริทึมที่นำเสนอถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับวิธี PSO, BCO และ VSA

2. ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดแบบสเตติคส์ เป็นการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ เวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น ว่าเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องควรผลิตกำลังไฟฟ้าเท่าไรที่

ใช้ต้นทุนการผลิตน้อยที่สุด และสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย [1] 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

$F_i(P_i)$ คือ ต้นทุนของเชื้อเพลิงการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

2.1 ลักษณะของฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเรียบ (Smooth Cost) การแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน จึงได้มีการกำหนดฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกำลังสอง [1] ดังสมการที่ 2

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2)$$

โดยที่ a , b และ c คือสัมประสิทธิ์ราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

2.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraint) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1) ข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าสมดุลของระบบ (Power Balance Constraint) คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับผลรวมของความต้องการปริมาณไฟฟ้า (Demand) กับกำลังสูญเสียรวมในระบบส่งจ่าย (Power Losses) ดังสมการที่ 3 และสมการที่ 4 [1]

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

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

โดยที่ P_i คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

P_D คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ

P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

B_{ij} , B_{0i} และ B_{00} คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียของสายส่ง

2) ข้อจำกัดฟิสิกส์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [1] คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเครื่องต้องอยู่ในขีดจำกัดกำลังการผลิตต่ำสุดและสูงสุดดังสมการที่ 5

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (5)$$

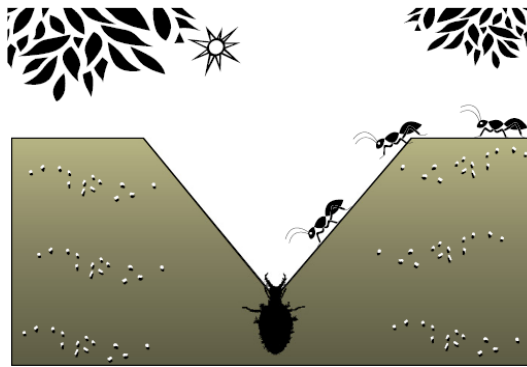
โดยที่ $P_{i,\min}$ และ $P_{i,\max}$ คือกำลังการผลิตต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

3. วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีแมงช้าง (Ant Lion Optimization)

ALO เป็นแนวคิดใหม่ที่ได้รับแรงบันดาลใจจากธรรมชาติ คิดค้นโดย Sayedali Mirjalili ในปี 2015 อัลกอริทึม ALO เลียนแบบกลไกการล่าสัตว์ของแมงช้างในธรรมชาติ โดยวงจรชีวิตของแมงช้างประกอบด้วยสองช่วงชีวิตหลักคือช่วงตัวอ่อนและตัวเต็มวัย แมงช้างมีวงจรชีวิตอยู่ในธรรมชาติประมาณ 1-2 ปีซึ่งส่วนใหญ่จะล่าสัตว์ในขณะที่เป็นตัวอ่อนและช่วงวัยสำหรับการสืบพันธุ์ ตัวอ่อนของแมงช้างจะขุดหลุมรูปกรวยไว้ในทรายโดยมีการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางวงกลมและโยนทรายออกด้วยกรามขนาดใหญ่ดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงหลุมกรวยที่มีขนาดแตกต่างกัน



รูปที่ 1 กรวยทรายกับดักของแมงช้าง



รูปที่ 2 ตัวอ่อนซ่อนตัวได้กรวย

หลังจากที่ซุกกับดักตัวอ่อนจะซ่อนตัวอยู่ใต้กันกรวยดังรูปที่ 2 [15] ขอบของกรวยมีความชันมากพอที่มดหรือแมลงจะหล่นลงไปด้านล่างของกับดักรูปกรวยได้อย่างง่ายดาย เมื่อแมงช้างรู้ว่าเหยื่ออยู่ในกับดักมันจะใช้ขากรรไกรยัดตัวเหยื่อไว้ อย่างไรก็ตามเหยื่อมักไม่ติดทันทีและพยายามหลบหนีจากกับดัก ในกรณีนี้แมงช้างจะโยนทรายไปทางขอบหลุมเพื่อให้เหยื่อไหลลงไปที่ด้านล่างของหลุม เมื่อเหยื่อถูกหนีบด้วยขากรรไกรจะถูกดึงลงใต้พื้นดินทันทีและถูกฆ่า หลังจากกินเหยื่อแมงช้างจะโยนเศษเหยื่อทิ้งไว้ข้างนอกหลุมและแก้ไขหลุมสำหรับการล่าสัตว์ต่อไป แรงบันดาลใจหลักของอัลกอริทึม ALO มาจากพฤติกรรมการหาอาหารช่วงที่เป็นตัวอ่อนของแมงช้าง โดณะแบ่งออกเป็นห้าขั้นตอนหลักคือ การสุ่มทางเดินของเหยื่อหรือมด (random walk of ants), โครงสร้างกับดักรูปกรวย (building traps), กักขังมดในกับดักรูปกรวย (entrapment of ants in traps), จับเหยื่อ (catching preys) และ สร้างกับดักรูปกรวยใหม่ (re-building traps) ในส่วนย่อยของพฤติกรรมของแมงช้างและเหยื่อของมันจะถูกอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และอธิบายได้ดังนี้

3.1 สุ่มทางเดินของมด (Random Walk of Ants)

อัลกอริทึม ALO เลียนแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างแมงช้างกับมดในกับดัก สำหรับรูปแบบการปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวมดจะต้องเคลื่อนที่หรือเดินผ่านกับดักและแมงช้างทำการล่าเหยื่อโดยใช้กับดักที่สร้างขึ้น เนื่องจากมดเคลื่อนที่ไปอย่างไม่เป็นระบบในธรรมชาติเพื่อค้นหาอาหารการเดินทางของมดจึงเกิดขึ้นแบบสุ่ม รูปแบบการเคลื่อนที่แบบสุ่มของมดแสดงดังสมการที่ 6

$$X(t) = [0, \text{cums}(2r(t_1) - 1), \text{cums}(2r(t_2) - 1), \dots, \text{cums}(2r(t_n) - 1)] \quad (6)$$

โดยที่ *cums* คือผลรวมสะสม, *n* คือจำนวนซ้ำสูงสุด, *t* คือสแต็ปของการเดินแบบสุ่ม และ *r(t)* เป็นฟังก์ชันแบบสุ่มที่กำหนดไว้ดังสมการที่ 7

$$r(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } \dots rand > 0.5 \\ 0, & \text{if } \dots rand \leq 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

เมื่อ t คือขั้นตอนของการเดินแบบสุ่ม และ $rand$ เป็นจำนวนสุ่มที่สร้างขึ้นโดยมีการกระจายสม่ำเสมออยู่ในช่วงของ $[0, 1]$ และตำแหน่งของมดจะถูกเก็บไว้ในเมตริกซ์ดังสมการที่ 8

$$M_{ant} = \begin{bmatrix} ant_{1,1} & ant_{1,2} & \dots & ant_{1,d} \\ ant_{2,1} & ant_{2,2} & \dots & ant_{2,d} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ ant_{n,1} & ant_{n,2} & \dots & ant_{n,d} \end{bmatrix} \quad (8)$$

เมื่อ M_{ant} คือเมตริกซ์เพื่อบันทึกตำแหน่งของมดแต่ละตัว, $ant_{i,j}$ คือค่าของตัวแปร i และ j คือมิติของตำแหน่งของมดในเมตริกซ์, n คือจำนวนมดและ d คือจำนวนตัวแปร

ในระหว่างกระบวนการสุ่มและเก็บค่าในเมตริกซ์ M_{ant} จะบันทึกตำแหน่งของมดทั้งหมด (ตัวแปรของโซลูชันทั้งหมด) การเดินสุ่มของมดจะถูกควบคุมให้อยู่ในขอบเขตภายในพื้นที่การค้นหาโดยใช้สมการที่ 9

$$X_i^t = \frac{(X_i^t - a_i) \times (d_i - c_i^t)}{(d_i^t - a_i)} + c_i \quad (9)$$

เมื่อ a_i คือค่าต่ำสุดของการเดินแบบสุ่มของตัวแปร i^{th} , d_i คือค่าสูงสุดของการเดินแบบสุ่มของตัวแปร i^{th} , c_i^t คือค่าต่ำสุดของตัวแปร i^{th} ที่การทำซ้ำจำนวน t ครั้ง และ d_i^t คือค่าสูงสุดของตัวแปร i^{th} ที่การทำซ้ำจำนวน t ครั้ง

3.2 หลุมกับดักของแมลงช้าง (Trapping in AntLion's Pits)

สมการที่ใช้อธิบายรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของหลุมกับดักของแมลงช้างแสดงดังสมการที่ 10 และสมการที่ 11

$$c_i^t = Antlion_j^t + c^t \quad (10)$$

$$d_i^t = Antlion_j^t + d^t \quad (11)$$

โดยที่ c^t เป็นค่าต่ำสุดของตัวแปรทั้งหมดของการทำซ้ำจำนวน t ครั้ง, d^t เป็นเวกเตอร์ที่เป็นค่าตัวแปรสูงสุดของการทำซ้ำจำนวน t ครั้ง และ $Antlion_j^t$ แสดงตำแหน่งของแมงช้างที่เลือกไว้ j ตำแหน่งในการทำซ้ำจำนวน t ครั้ง

3.3 การสร้างของกับดัก (Building Trap)

เพื่อที่จะจำลองสถานการณ์ในการล่าเหยื่อของแมงช้างจะใช้การสุ่มหาตัวแมงช้างเริ่มต้นด้วยวิธีวงล้อรูเล็ต การสุ่มแบบวงล้อรูเล็ตเป็นกระบวนการสุ่มจากกลุ่มคำตอบที่มี โดยใช้การถ่วงน้ำหนัก (weight) มาเป็นนัยยะ โดยคำตอบที่มีค่าน้ำหนักสูงสุดจะเป็นคำตอบเริ่มต้นที่ดีที่สุดและมีโอกาสที่จะถูกเลือกมากที่สุด (มีความน่าจะเป็นสูงสุดที่จะถูกสุ่มเจอ) และคำตอบที่มีค่าน้ำหนักต่ำสุด มีโอกาสถูกเลือกน้อยสุด (มีความน่าจะเป็นต่ำสุดที่จะถูกสุ่มเจอ) มดที่ติดอยู่ในกับดักจะมีแมงช้างอยู่ในกับดักที่เลือกเพียงตัวเดียว ซึ่งก็คืออัลกอริทึม ALO จำเป็นต้องใช้ตัวดำเนินการแบบวงล้อรูเล็ตเพื่อเลือกแมงช้างตามฟังก์ชันที่เหมาะสมในระหว่างดำเนินการ กลไกนี้จะทำให้มีโอกาสสูงที่แมงช้างจะจับมดได้

3.4 การเลื่อนมดลงสู่ก้นหลุม (Sliding Ants Towards Ant Lion)

แมงช้างสามารถสร้างกับดักที่เทียบเคียงได้กับฟังก์ชันความเหมาะสม และมดที่มีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม เมื่อมดอยู่ในกับดักแมงช้างจะยิงทรายออกไปจากกลางของหลุมไปที่ขอบด้านข้างของหลุมกับดัก พฤติกรรมเช่นนี้จะทำให้มดที่อยู่ในกับดักเลื่อนลงไปที่ก้นหลุม รัศมีของการเดินแบบสุ่มของมดจะแสดงดังสมการที่ 12 และสมการที่ 13

$$c^{t(new)} = \frac{c^t}{I} \quad (12)$$

$$d^{t(new)} = \frac{d^t}{I} \quad (13)$$

โดยที่ I คือ อัตราส่วน มีค่าเท่ากับสมการที่ (14)

$$I = 10^w \times \frac{t}{T} \quad (14)$$

เมื่อ t คือจำนวนการวนซ้ำในรอบปัจจุบัน, T คือจำนวนสูงสุดของการทำซ้ำ และ w เป็นค่าคงที่ที่กำหนดจากการวนซ้ำครั้งปัจจุบัน ($w = 2$ เมื่อ $t > 0.1T$, $w = 3$ เมื่อ $t > 0.5T$, $w = 4$ เมื่อ

$t > 0.75T$, $w = 5$ เมื่อ $t > 0.9T$ และ $w = 6$ เมื่อ $t > 0.95T$) โดยทั่วไปค่าของ w จะเป็นค่าคงที่สามารถปรับค่าได้เพื่อให้เกิดความถูกต้องของคำตอบสมการเหล่านี้จะทำให้รัศมีของคำตอบหรือการแกว่งของคำตอบค่อย ๆ ลดลง ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงตำแหน่งของมดและเลียนแบบกระบวนการเลื่อนไปในกับดักของมดภายในหลุม ทำให้สามารถประกันได้ว่าจะมีคำตอบที่ดีที่สุดอยู่ภายในพื้นที่การค้นหา

3.5 การจับเหยื่อและสร้างหลุมกับดักอีกครั้ง (Catching prey and re-building the pit)

ขั้นตอนสุดท้ายของการล่าคือเมื่อมดมาถึงกันหลุมและถูกจับด้วยกรามของแมงช้าง หลังจากนั้นแมงช้างจะดึงมดเข้าไปภายในทรายและกินเป็น จากนั้นแมงช้างจะต้องมีการปรับปรุงกับดักหรือตำแหน่งให้เป็นตำแหน่งล่าสุดของการล่าเหยื่อเพื่อเพิ่มโอกาสในการจับเหยื่อใหม่ สมการที่ 15 ใช้อธิบายการปรับปรุงกับดักหรือปรับปรุงตำแหน่งใหม่

$$Antlion_j^t = Ant_i^t \text{ if } f(Ant_i^t) > f(Antlion_j^t) \quad (15)$$

โดยที่ t คือจำนวนการวนซ้ำในรอบปัจจุบัน $Antlion_j^t$ จะแสดงตำแหน่งของแมงช้างที่ j ที่เลือกไว้ในการซ้ำที่ t และ Ant_i^t จะระบุตำแหน่งของมดตัวที่ i ในการทำซ้ำที่ t

3.6 แมงช้างที่ดีที่สุด (The best ant lion)

แมงช้างตัวที่ดีที่สุดจะเป็นลักษณะสำคัญของการวิวัฒนาการของอัลกอริทึมที่ช่วยให้สามารถรักษาโซลูชันที่ดีที่สุดได้ในขั้นตอนต่างๆ แมงช้างตัวที่ดีที่สุดที่ได้รับในแต่ละรอบการคำนวณจะได้รับการบันทึกและถือว่าเป็นแมงช้างที่มีคุณภาพดีที่สุด เนื่องจากแมงช้างที่ดีที่สุดคือฟังก์ชันที่มีความเหมาะสมที่สุดซึ่งจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของมดทั้งหมดในระหว่างการทำซ้ำ ดังนั้นจึงสมมุติให้มดทุกตัวเดินสุ่มรอบ ๆ กับดักที่เลือกโดยวิธีวงล้อรูเล็ต และแมงช้างพร้อมกันโดยใช้สมการที่ 16

$$Ant_i^t = \frac{R_A^t + R_E^t}{2} \quad (16)$$

โดยที่ R_A^t คือการเดินสุ่มรอบ ๆ ตัวแมงช้างที่ถูกเลือกโดยวิธีวงล้อรูเล็ตในการทำซ้ำที่ t , R_E^t คือการเดินสุ่มรอบ ๆ จุดยอดที่การทำซ้ำที่ t และ Ant_i^t คือตำแหน่งของมดตัวที่ i ที่การทำซ้ำที่ t ขั้นตอนวิธีการของ ALO อัลกอริทึมสามารถเขียนเป็นลำดับขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

- 1) เริ่มต้นการสุ่มตัวอย่างของมตและแมงข้างเริ่มแรก
- 2) คำนวณค่าที่เหมาะสมที่อยู่ในเงื่อนไขของระบบ ของมตและแมงข้าง (Objective Function, Power Balance Constraint, Power Losses and Generator Rating Constraint) ด้วยสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 5
- 3) หาแมงข้างตัวที่ดีที่สุด และถือว่าเป็นแมงข้างที่มีคุณภาพดีที่สุด (ฟังก์ชันที่มีความเหมาะสมที่สุด)
- 4) เลือกแมงข้างด้วยวิธีวงล้อรูเล็ต
- 5) ปรับปรุงวิธีมีการเดินสุ่มของมต โดยใช้สมการที่ 11 และสมการที่ 12
- 6) สร้างการเดินแบบสุ่มและปรับตำแหน่งโดยใช้สมการที่ 9 ถึงสมการที่ 12
- 7) ปรับปรุงตำแหน่งของมตโดยใช้สมการที่ 15
- 8) ประเมินผลของคำตอบจากมตทั้งหมด
- 9) แทนที่แมงข้างด้วยคำตอบจากมตที่ได้จากการประเมินซึ่งมีฟังก์ชันที่เหมาะสมตรงกันโดยใช้สมการที่ 14
- 10) ปรับปรุงตำแหน่งของแมงข้างถ้าได้ฟังก์ชันที่เหมาะสมที่ดีกว่าเดิม
- 11) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดทำงาน
- 12) หยุดทำงานเมื่อได้คำตอบที่เหมาะสม หรือกลับไปยังกระบวนการแรกหากคำตอบไม่เป็นไปตามเงื่อนไข

4. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

4.1 กรณีศึกษาที่ 1

ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน 6 หน่วย 26 บัส และสายส่ง 46 เส้น มีความต้องการกำลังไฟฟ้า 1263 MW คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องแสดงดังตารางที่ 1 และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในสายส่งดัง [16]

ในกรณีที่ 1 เป็นการวางแผนการผลิตโดยเป็นการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ในระบบไฟฟ้า ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง เช่นเวลา 19.00 น. เครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องควรผลิตกำลังไฟฟ้าเท่าไรที่ใช้ต้นทุนการผลิตน้อยที่สุด และโหลดต้องได้รับกำลังไฟฟ้าเพียงพอกับความต้องการด้วย

$$B_{ij} * 10^{-2} = \begin{bmatrix} 0.0017 & 0.0012 & 0.0007 & -0.0001 & -0.0005 & -0.0002 \\ 0.0012 & 0.0014 & 0.0009 & 0.0001 & -0.0006 & -0.0001 \\ 0.0007 & 0.0009 & 0.0031 & 0.0000 & -0.0010 & -0.0006 \\ -0.0001 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0024 & -0.0006 & -0.0008 \\ -0.0005 & -0.0006 & -0.0010 & -0.0006 & 0.0129 & -0.0002 \\ -0.0002 & -0.0001 & -0.0006 & -0.0008 & -0.0002 & 0.0150 \end{bmatrix}$$

$$B_{oi} * 10^{-2} = [-0.391 \quad -0.13 \quad 0.7047 \quad 0.0591 \quad 0.2161 \quad -0.664]$$

$$B_{oi} = 0.059$$

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 1

Unit no.	c_i	b_i	a_i	P_{min}	P_{max}
1	0.0070	7.00	240	100	500
2	0.0095	10.0	200	50	200
3	0.0090	8.50	220	80	300
4	0.0090	11.0	200	50	150
5	0.0080	10.5	220	50	200
6	0.0075	12.0	190	50	120

4.2 กรณีศึกษาที่ 2

ในกรณีศึกษานี้ได้ใช้วิธีเดียวกันกับกรณีศึกษาที่ 1 แต่ระบบที่ใช้ทดสอบมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดจำนวน 15 หน่วย ที่ความต้องการโหลดทั้งหมดของระบบคือ 2630 MW แต่ในกรณีศึกษาที่ 2 นี้ มีเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาและมีความซับซ้อนมากขึ้น คือหน่วยการผลิต 2, 5, 6 และ 12 เป็นช่วงการปฏิบัติการที่ไม่ได้รับอนุญาต (Ramp rate limits and prohibited zone) การสูญเสียในสายส่งดัง [17] และคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องแสดงดังตารางที่ 2 และ 3 [17]

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 2

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 ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาที่ห้ามสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

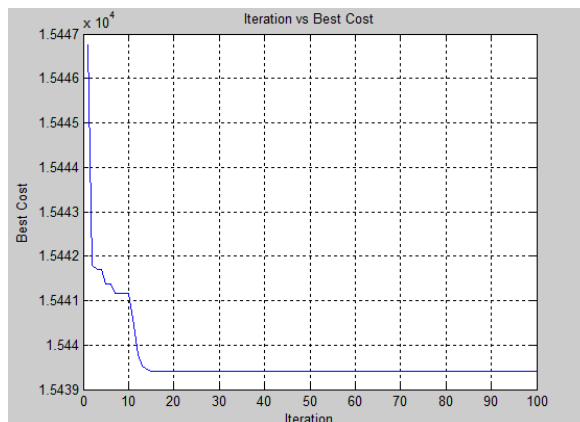
Unit	P_o	UR_i	DR_i	Prohibited zone		
				Zone 1	Zone 2	Zone 3
1	400	80	120			
2	300	80	120	[185-225]	[305-335]	[420-450]
3	105	130	130			
4	100	130	130			
5	90	80	120	[180-200]	[305-335]	[390-420]
6	400	80	120	[230-255]	[365-395]	[430-455]

ตารางที่ 3 ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาต้องห้ามสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 (ต่อ)

Unit	P'_o	UR_i	DR_i	Prohibited zone		
				Zone 1	Zone 2	Zone 3
7	350	80	120			
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			

5. ผลการจำลองสถานการณ์และการเปรียบเทียบผล

ในการจำลองใช้โปรแกรม MATLAB คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Intel(R) Core(TM) i5 2.30 GHz แรม 8 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 7 ทำการทดสอบจำนวน 100 รอบ ความเร็วในการหาคำตอบของวิธีการ ALO ในกรณีศึกษาที่ 1 แสดงในรูปที่ 3 และกรณีศึกษาที่ 2 แสดงในรูปที่ 4 ในส่วนของต้นทุนการผลิตค่าที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี ในกรณีศึกษาที่ 1 ดังตารางที่ 4 และกรณีศึกษาที่ 2 ดังตารางที่ 5



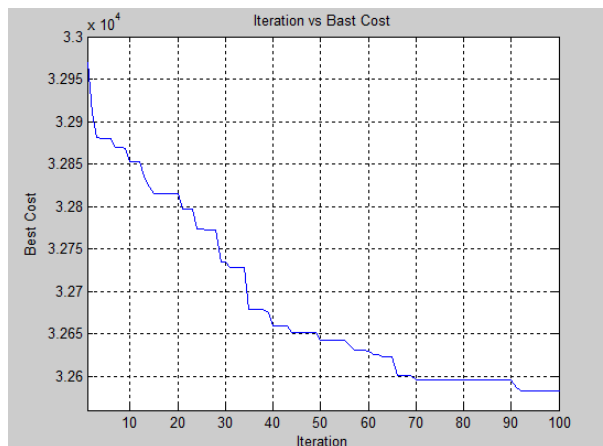
รูปที่ 3 ความเร็วในการหาคำตอบในกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง กรณีศึกษาที่ 1

Units	MBCO [18]	BCO [18]	PSO [19]	ALO
P_1 (MW)	451.53	452.92	440.58	447.82
P_2 (MW)	173.14	172.57	167.44	172.98
P_3 (MW)	260.19	257.50	278.26	263.72
P_4 (MW)	136.07	140.04	150	138.85
P_5 (MW)	163.77	162.24	157.61	165.39
P_6 (MW)	90.47	89.80	81.22	86.42
P_T (MW)	1275.17	1275.07	1257.08	1275.17
P_L (MW)	12.17	12.07	12.08	12.17
TC (\$/h)	15439.57	15439.63	15445.49	15439.40

จากรูปที่ 3 เมื่อทำการทดสอบวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงช้าง ผลการทดสอบจะเห็นว่าความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็ว คำตอบที่ดีที่สุดที่วิธีการ ALO ค้นพบใช้ Iteration ในการค้นหาคำตอบที่ประมาณ 15 ซึ่งนั่นคือคำตอบที่วิธีการที่นำเสนอหาคำตอบได้ จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการที่ 100 Iteration แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพที่ดี และคุณภาพของคำตอบที่ตรงกับเงื่อนไขข้อบังคับของระบบ

ตารางที่ 4 เป็นตารางการเปรียบเทียบผลของการหาคำตอบโดยได้นำผลของวิธีการ ALO เปรียบเทียบผลกับวิธีอนุภาคกลุ่ม (PSO) วิธีจำลองการอบเหนียวของโลหะ (SA) และ วิธีผสมผสานการทำซ้ำแบบแลมด้ากับวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฟุ้งฝัน (HLBCO) โดยวิธี PSO ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหรือค่าของค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 3621.75 \$ โดยมีค่าสูญเสียในสายส่ง 9.9833 MW วิธีการ SA ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหรือค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 3619.75 \$ ในขณะที่มีค่าสูญเสียในสายส่งที่ 9.92 MW วิธีการ HLBCO ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือค่าของค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 3619.75 และมีค่าสูญเสียในสายส่งที่ 9.92 MW เมื่อนำทั้งสามวิธีมาเปรียบเทียบกับวิธีการ ALO ซึ่งให้ค่าใช้จ่ายต่ำสุดอยู่ที่ 3619.26 ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด



รูปที่ 4 ความเร็วในการหาคำตอบในกรณีศึกษาที่ 2

จากรูปที่ 4 เมื่อทำการทดสอบวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงช้าง เมื่อระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น คือเมื่อนำช่วงเวลาต้องห้ามและขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงเข้ามาเป็นเงื่อนไขของระบบ และขนาดของระบบใหญ่ขึ้น ผลการทดสอบจะเห็นว่าความเร็วในการหาคำตอบเริ่มใช้เวลามากขึ้น คำตอบที่ดีที่สุดที่วิธีการ ALO ค้นพบ ใช้ Iteration ในการค้นหาคำตอบที่ประมาณ 93 แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอยังคงมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพที่ดี

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง กรณีศึกษาที่ 2

Units	DE [20]	CSO [21]	ALO
P_1 (MW)	454.99	454.70	372.44
P_2 (MW)	419.99	380.00	450.60
P_3 (MW)	129.99	130.00	125.83
P_4 (MW)	129.99	129.53	127.83
P_5 (MW)	269.92	170.00	253.85
P_6 (MW)	459.99	460.00	458.11
P_7 (MW)	429.99	429.71	462.44
P_8 (MW)	60.00	75.35	63.80
P_9 (MW)	25.00	34.96	25.62

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง กรณีศึกษาที่ 2 (ต่อ)

Units	DE [20]	CSO [21]	ALO
P_{10} (MW)	63.11	160.00	89.72
P_{11} (MW)	79.97	79.75	66.39
P_{12} (MW)	79.98	80.00	76.38
P_{13} (MW)	25.00	34.21	28.34
P_{14} (MW)	15.00	21.14	36.73
P_{15} (MW)	15.00	21.02	16.81
TP (MW)	2657.97	2660.36	2652.91
Total cost (\$/h)	32588.87	32732.95	32572.55
Power Loss	27.97	30.36	22.91

ตารางที่ 5 เป็นตารางการเปรียบเทียบผลของการหาคำตอบโดยได้นำผลของวิธีการ ALO เปรียบเทียบผลกับวิธี Optimization using civilized swarm (CSO) และวิธี differential evolution (DE) โดยวิธี CSO ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหรือค่าของค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 32732.95 \$ โดยมีค่าสูญเสียในสายส่ง 30.36 MW วิธีการ DE ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหรือค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 32588.87 \$ ในขณะที่มีค่าสูญเสียในสายส่งที่ 27.97 MW เมื่อนำทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกับวิธีการ ALO ซึ่งให้ค่าใช้จ่ายต่ำสุดอยู่ที่ 32572.55 ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด และเช่นเดียวกันกับค่ากำลังสูญเสียในสายส่งที่วิธี ALO ยังให้ค่าสูญเสียต่ำที่สุดด้วย

6 สรุปผล

การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยเทคนิคใหม่ที่เรียกว่า เทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงช้าง (ANTLION OPTIMIZATION TECHNIQUE: ALO) เป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบที่เลียนแบบการหาอาหารของตัวอ่อนแมงช้างที่จะขุดหลุมทรงกรวยเป็นกับดักเพื่อหาอาหาร ได้ทำการทดสอบกับ 2 กรณีศึกษาที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 6 หน่วยที่พิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากสายส่งและฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อนที่มีสมการทางคณิตศาสตร์ของต้นทุนการผลิตที่เป็นแบบเรียบ และเครื่องกำเนิด 15 หน่วยที่มีความซับซ้อนของระบบคือขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลง และช่วงเวลาต้องห้าม จะเห็นได้ว่าวิธีที่

นำเสนอแนะสามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว โดยในกรณีศึกษาที่ 1 หาคำตอบที่ประมาณ 15 Iteration ในแง่ของต้นทุนการผลิตรวมเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับวิธี MBCO, BCO และ PSO จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอแนะให้ค่าของคำตอบที่ดีกว่า ส่วนในกรณีศึกษาที่ 2 ในแง่ของความเร็วในการหาคำตอบ วิธีการที่นำเสนอแนะหาคำตอบที่ประมาณ 93 Iteration อันเนื่องมาจากระบบมีขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนจากเงื่อนไขที่เพิ่มขึ้น ในแง่ของต้นทุนการผลิตรวมเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับวิธี DE และ CSO จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอแนะให้ค่าของคำตอบที่ดีกว่า จากการทดสอบ วิธีการที่เสนอแนะมีโอกาสได้ค่าที่เหมาะสมมากกว่าเดิม ค่าที่ได้นี้เป็นที่ยอมรับได้ และมีคำตอบที่ดีกว่า ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการผลิตกำลังงานไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

References

- [1] Wood AJ and Wollenberg BF. Power Generation Operation and Control. New York: Wiley; 1984.
- [2] El-Keib AA, Ma H, and Hart JL. Environmentally Constrained Economic Dispatch Using the La Grangian Relaxation Method. IEEE Transactions on Power Systems 1994;9(4):1723-9.
- [3] Ramamoorthy M, Dhar RH, and Mukherjee PK. Reduced-gradient method for economic dispatch. In Electrical Engineers Proceedings of the Institution of Electrical Engineers 1973;120(11):1419-20.
- [4] Ringlee RJ and Williams DD. Economic dispatch operation considering valve throttling losses II-distribution of system loads by the method of dynamic programming. IEEE Trans. Power Appar. Syst. 1962;81(3):615-20.
- [5] Ahsan A and Akif ZK. (2014). Optimization of Economic Load Dispatch Problem by Linear Programming Modified Methodology. 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET'2014). 2014 May 30-31. London; 2014. p.76-9.
- [6] Jizhong Z and James AM. Multi-area power systems economic dispatch using nonlinear convex network flow programming. Electric Power Systems Research 2001;59:13-20.
- [7] Samuel AO, Gabriel BI, Olatubosun O, Olusi O, and Akintoba EA. Genetic Algorithm-based Cost Optimization Model for Power Economic Dispatch Problem. British Journal of Applied Science & Technology 2016;15(6):1-10.

- [8] Srikanth K and HariVamsi V. Partical Swarm Optimization Technique for Dynamic Economic Dispatch. International Journal of Research in Engineering and Technology 2016;5(5):460-6.
- [9] Nwohu MN and Osaremwinda OP. Evaluation of Economic Load Dispatch Problem in Power Generating Stations by the Use of Ant Colony Search Algorithms. International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering (IJRSEEE) 2016;3(1):20-9.
- [10] Vijay KJ. 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.
- [11] Thang TN, Dieu NV, and Bach HD. Cuckoo search algorithm for combined heat and power economic dispatch. Electrical Power and Energy Systems 2016;81:204-14.
- [12] Ziane I, Benhamida F, and Graa A. Simulated Annealing Optimization for Generation Scheduling with Cubic Fuel Cost Function. WSEAS Transactions on Information Science and Applications 2017;14:64-9.
- [13] Wanchai K and Chiraphon T. Hybrid of Lamda and Bee Colony Optimization for Solving Economic Dispatch. Przegląd Elektrotechniczny 2016;9:220-3.
- [14] Saka M, Eke I, Tezcan SS. and Taplamacioglu MC. Vortex Search Algorithm for Solving Economic Load Dispatch Problem Including Ramp Rate Limits in Power Systems. International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering 2018;10:1-5.
- [15] Seyedali M. The Ant Lion Optimizer. Advances in Engineering Software 2015;83:80-98.
- [16] Worawat S, Saravuth P, Issarachai Ng. Multiple tabu search algorithm for economic dispatch problem considering valve-point effects. Electrical Power and Energy Systems 2011;33:846-54.
- [17] Chandram K, Subrahmanyam N and Sydulu M. Brent method for dynamic economic dispatch with transmission losses. In IEEE 2008 Power Engineering Society Transmission Distribution Conference and Exposition Chicago. 2008 April 21-24. IL, USA; 2008. p. 1-5.
- [18] Chiraphon T, Wanchai K and 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).

- [19] Jun S, Vasile P, Xiao-Jun W, Wei F and Zhenyu W. Solving the Power Economic Dispatch Problem with Generator Constraints by Random Drift Particle Swarm Optimization. IEEE Transactions on Industrial Informatics 2014;10(1):222-32.
- [20] Samir S and Abdellatif H. A hybrid differential evolution algorithm based on particle swarm optimization for non-convex economic dispatch problems. Applied Soft Computing 2013;13(4):1608-19.
- [21] Immanuel SA and Thanushkodi BK. Optimization using civilized swarm: Solution to economic dispatch with multiple minima. Electric Power Systems Research 2009; 79(1):8-16.

ประวัติผู้เขียนบทความ



จิรพนธ์ ทาแกง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 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: การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy)



วันชัย คำเสน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 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) การจ่ายโหลด อย่างประหยัด (Economic Dispatch)



อภินันท์ อูรโสภณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและ คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150 โทรศัพท์ 043754333 E-mail: aurasophon@yahoo.com
งานวิจัยที่สนใจ: อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) อิเล็กทรอนิกส์ เกษตรกรรม (Electronic Agriculture)