

การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยใช้วิธีฝูงมด

Transmission Expansion Planning by Ant Colony Optimization

นพพร ลิปรีชานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงมดสำหรับแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยมีวัตถุประสงค์ทำให้ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่มีค่าต่ำที่สุด เพื่อรองรับกับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคต ภายใต้เงื่อนไขบังคับต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังและทางด้านเศรษฐศาสตร์ เช่น กำลังไฟฟ้าสมดุล (Power flow balance) พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Power generation limit) พิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (Transmission capacity limit) และพิกัดจำนวนวงจรสายส่งเส้นใหม่ (Right-of-way limit) วิธีการที่นำเสนอถูกนำไปทดสอบกับระบบกำลังไฟฟ้า 6 บัสของ Garver's โดยเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ คือ วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการค้นหาแบบตาบ (Tabu Search: TS) ผลปรากฏว่าวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการค้นหาค่าตอบดีกว่าทั้งสองวิธี

คำสำคัญ: วิธีฝูงมด วิธีการเชิงพันธุกรรม การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด วิธีการค้นหาแบบตาบ และการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า

Abstract

This paper proposes an application of Ant Colony Optimization (ACO) to solve a Static Transmission Expansion Planning (STEP) problem based on DC power flow model. The major objective is to minimize the investment cost of transmission lines that should be added to an existing network in order to supply the forecasted load as economically as possible subject to many constraints i.e. the power balance, the generation requirements, line connections and thermal limits. To appraise the achievability of ACO, a traditional systems i.e. the Garver's six-bus system is applied. The experimental results obtained by ACO are compared to those obtained by the conventional approaches i.e. Genetic Algorithm (GA), and Tabu Search (TS) algorithm in term of solution quality and computational efficiency. The results show that the ACO method outperforms other methods in terms of convergence characteristic and good computation efficiency.

Keywords: Ant colony optimization, Genetic algorithm, Optimization, Tabu search algorithm, and Transmission expansion planning

1. บทนำ

การวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าถือว่าเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งของการวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง โดยหลักการของการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าคือ การหารูปแบบเครือข่ายของระบบส่งที่เหมาะสมที่สุดโดยสามารถรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาของการวางแผน ซึ่งอาจจะเป็น 5 ปีหรือ 10 ปีสำหรับรูปแบบของระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่ดีนั้นนอกจากจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของระบบส่งกำลังไฟฟ้าและประหยัดค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สุดด้วย

การวางแผนเพื่อให้ได้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่ดีมักใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยจะกำหนดรูปแบบของปัญหาและแก้ไขปัญหาคด้วยวิธี Integer Programming (IP) และใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการค้นหารูปแบบของระบบส่งซึ่งรูปแบบของปัญหาที่นิยมใช้สำหรับการแก้ไขคือ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายส่งเส้นใหม่ที่มีต้นทุนต่ำ

ที่สุด (minimize installation cost) หรือให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบขณะจ่ายไฟที่น้อยที่สุด (minimize power losses) โดยจะมองว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบขณะจ่ายไฟนั้นเป็นค่าค่าใช้จ่ายอย่างหนึ่งซึ่งจะอยู่ในรูปของต้นทุนการปฏิบัติงาน (operation cost) นั่นเอง ในการแก้ปัญหาจะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า เงื่อนไขทางด้านเศรษฐศาสตร์รวมทั้งจะต้องคงรูปแบบของการเป็นระบบเครือข่าย (network) สำหรับบทความนี้จะเน้นเฉพาะต้นทุนที่เกิดจากการลงทุนติดตั้งสายส่งเส้นใหม่เท่านั้น

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าสามารถแบ่งได้สองแบบคือ แบบขั้นตอนเดียว (single stage or static model) และแบบหลายขั้นตอน (multi stage or dynamic model) สำหรับวิธีการวางแผนแบบขั้นตอนเดียวคือการวางแผนตามระยะเวลาที่ผู้วางแผนกำหนดไว้และใช้เทคนิคต่าง ๆ แก้ปัญหา เพื่อตอบคำถามต่าง ๆ

เหล่านี้ คือ เส้นทางของการเพิ่มสายส่งเส้นใหม่ที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ในตำแหน่งใด (Where to build?) และจำนวนวงจรที่ก่อสร้างขึ้นใหม่จะต้องใช้งบประมาณเท่าไร (at what cost?) จึงจะเหมาะสมที่สุดตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ ส่วนการวางแผนแบบหลายขั้นตอนคือ เอาคำตอบของขั้นตอนแรกมาเป็นฐานเพื่อที่จะได้คำตอบถัดไป และกระทำจนกว่าจะครบช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งนอกจากจะตอบคำถามเบื้องต้นที่กล่าวมาแล้ว จะตอบคำถามได้ว่าเมื่อใดจึงควรจะต้องปักเสาพาดสายส่งเส้นใหม่เข้าไปในระบบที่มีอยู่เดิม (When to build?) จึงจะเหมาะสมกับความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคต [1] สำหรับบทความนี้จะเน้นเฉพาะการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้นตอนเดียว (static model) เท่านั้น

การวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีผู้นำเสนอเทคนิคต่าง ๆ มาแล้วหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น ในปี ค.ศ.1970 Garver [2] และ ปี ค.ศ.1985 Villasana et al. [3] นำเสนอเทคนิคโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming: LP) เพื่อแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้นตอนเดียว ส่วนการวางแผนแบบหลายขั้นตอนนำเสนอโดย Escobar et al. [4] นำเสนอวิธีการเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm: GA) และอื่น ๆ [5].

วิทยาการทางคอมพิวเตอร์แขนงหนึ่ง ที่เรียกว่า ปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence: AI) ที่ได้นำมาประยุกต์ใช้สำหรับแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าเช่น วิธีการเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm: GA) [4] วิธีการจำลองการเย็นตัวของโลหะ (simulated annealing: SA) [6] วิธีการค้นหาแบบตามู (tabu search: TS) [7]

ในปี ค.ศ. 1992 Marco Dorigo et.al [8] ได้นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมด

(ant colony optimization: ACO) ซึ่งวิธีการนี้ได้แนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมของมดจริง ที่สามารถหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากรังมด (nest) ไปยังแหล่งอาหาร (food source) โดยอาศัยสารเคมีชีวภาพ ที่เรียกว่า สารฟีโรโมน (pheromone) เพื่อเป็นร่องรอยในการเดินทางและสื่อสารกับมดตัวอื่นๆ วิธีการฝูงมดสามารถนำไปประยุกต์ใช้แก้ไขปัญหาหลากหลายรูปแบบเช่น ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (traveling salesman problem: TSP) [9] ปัญหาการมอบหมายงาน (quadratic assignment problem: QAP) [10] ปัญหาการวางแผนการขนส่ง (vehicle routing problem: VRP) [11] สำหรับการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรม ยกตัวอย่างเช่น การวางแผนขยายระบบจำหน่ายไฟฟ้า [12, 13] การหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบป้องกันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [14] การออกแบบโครงข่ายโทรคมนาคม [15] เป็นต้น สำหรับแก้ปัญหาวางแผนขยายระบบส่งยังไม่มีผู้วิจัยนำวิธีฝูงมด (ant colony optimization: ACO) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งวิธีฝูงมดมีลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหานี้ เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีข้อได้เปรียบในด้านของความเร็วและประสิทธิภาพในการหาคำตอบ โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการนำไปใช้และเหมาะสำหรับการค้นหาแบบ integer programming (IP) ดังนั้นบทความนี้ นำเสนอการแก้ไขปัญหาวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม โดยใช้วิธีฝูงมด คำตอบที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ นำไปเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิมเช่น วิธีการเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm: GA) และวิธีการค้นหาแบบตามู (tabu search: TS) สำหรับบทความที่นำเสนอ ใช้วิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ ดี.ซี (dc power flow model) [16]

บทความนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 หัวข้อ ดังนี้ หัวข้อที่ 2 การจำลองปัญหา (problem formulation) ของการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า หัวข้อที่ 3 หลักการพื้นฐานของวิธีฝูงมด หัวข้อที่ 4 กระบวนการวิธีฝูงมดสำหรับแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า (implementation of ACO for static TEP) หัวข้อที่ 5 ผลการทดสอบระบบกำลังไฟฟ้า 6 บัสและหัวข้อที่ 6 สรุปผลการประยุกต์ใช้วิธีฝูงมดในการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า

2. การจำลองปัญหา (problem formulation)

2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าในบทความนี้คือ ต้นทุนในการลงทุนติดตั้งสายส่งเส้นใหม่ภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังและทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่ง สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้ [2, 16].

$$\text{Minimize } C_T = \sum_{i,j \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (1)$$

2.2 เงื่อนไขบังคับ (constraints)

สำหรับเงื่อนไขบังคับ (constraints) จะพิจารณาอยู่ในรูปของหลักการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะคือ เงื่อนไขบังคับของสมการเท่ากับ (equality constraints) และเงื่อนไขบังคับของสมการ (inequality constraints) เพื่อให้ได้มาเพื่อเพิ่มความมั่นคง และความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

2.2.1 เงื่อนไขบังคับสมมูล (equality constraints)

สำหรับเงื่อนไขบังคับสมมูลในบทความนี้ จะเป็นกฎกระแสและกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

(ก) สมการ สมดุล ไฟฟ้า หรือ กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (power balance or Kirchoff's current laws)

$$SP_i + P_g - P_d = 0 \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส i ได้ดังนี้

$$P_i = \sum_{k=1}^N B_{ik} (\theta_i - \theta_k) , i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

จากสมการที่(3) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของระบบเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{P} = \mathbf{B}\theta \quad (4)$$

(ข) สมการการไหลกำลังไฟฟ้าของวงจรสมมูลแบบ ดี.ซี (dc load flow equation) หรือเรียกว่ากฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's voltage laws)

$$P_{ij} - b_{ij} (n_{ij}^0 + n_{ij}) (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (5)$$

การคำนวณหาการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงแต่ละสาขาในสมการที่ (5) เป็นไปตาม (6)

$$P_{ij} = \frac{(n_{ij}^0 + n_{ij})}{x_{ij}} (\theta_i - \theta_j) \quad (6)$$

2.2.2 เงื่อนไขบังคับไม่สมมูล (inequality constraints)

สำหรับเงื่อนไขบังคับไม่สมมูล ในบทความนี้จะเป็นเงื่อนไขบังคับที่เป็นข้อจำกัดทางด้านเทคนิคและทางด้านเศรษฐศาสตร์ สามารถเขียนได้ดังนี้

(ก) พิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าต้องไม่เกินพิกัดของระบบส่ง (transmission capacity limit)

$$|P_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij})P_{ij}^{\max} \quad (7)$$

(ข) พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสใด ๆ ต้องไม่เกินกำลังการผลิตสูงสุด (generation limits)

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (8)$$

(ค) พิกัดของจำนวนวงจรสายส่งเส้นใหม่ต้องไม่เกินจำนวนวงจรสูงสุด (right of way limits) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{\max} \quad (9)$$

n_{ij} is integer variable, P_{ij} and θ_i, θ_j unbounded.

$$(i, j) \in \Omega$$

โดยที่

- C_T คือ ต้นทุนรวมทั้งหมด
- c_{ij} คือ ต้นทุนของสายส่งที่เพิ่มเข้าในเครือข่ายจากบัส $i-j$
- N คือ จำนวนบัสทั้งหมดของระบบ
- S คือ branch-node incidence matrix.
- P_i คือ กำลังไฟฟ้าที่บัส i
- P_d คือ ความต้องการไฟฟ้าที่บัสใด ๆ
- P_g คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสใด ๆ
- $|P_{ij}|$ คือ กำลังไฟฟ้าสมบูรณ์ที่ไหลจากบัส $i-j$
- P_{ij}^{\max} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลจากบัส $i-j$
- P_g^{\min} คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสใด ๆ
- P_g^{\max} คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสใด ๆ
- P_{ij} คือ กำลังไฟฟ้าใหม่ที่ไหลจากบัส $i-j$

- b_{ij} คือ ค่า susceptance ของสายส่งจากบัส $i-j$
- n_{ij}^0 คือ สายส่งที่มีอยู่เดิมในเครือข่ายจากบัส $i-j$
- n_{ij} คือ สายส่งที่เพิ่มใหม่ในเครือข่ายจากบัส $i-j$
- x_{ij} คือ ค่า reactance ของสายส่ง
- θ_i คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
- θ_j คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส j
- Ω คือ เซตทั้งหมดของเส้นทางเดินสายส่ง

3. พฤติกรรมฝูงมด (ant colony behavior)

Marco Dorigo et.al [8, 9] ได้สรุปแนวคิดและขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีพฤติกรรมฝูงมด ซึ่งวิธีการนี้อาศัยพื้นฐานการเลียนแบบพฤติกรรมของมดจริง โดยพฤติกรรมของมดจริงสามารถหาเส้นทางที่สั้นที่สุดได้ทั้ง ๆ ที่มองไม่เห็นเส้นทาง โดยธรรมชาติแล้วเมื่อมดจริงเดินทางออกจากรังมด (nest) เพื่อไปหาอาหารตามแหล่งอาหาร (food source) ในขณะที่มดเดินทางไปหาอาหาร มดจะปล่อยสารเคมีชีวภาพที่เรียกว่า สารฟีโรโมน (pheromone) ไว้บนพื้น เพื่อเป็นร่องรอยการเดินทางกลับรัง อีกทั้งเพื่อเป็นการสื่อสารกับมดตัวอื่น ๆ

เมื่อนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้กับการหาค่าที่เหมาะสม จะกระจายการค้นหาค่าตอบผ่านตัวกระทำที่เรียกว่า “มด (ants)” หรือ “ตัวแทน (agent)” ที่มีความสามารถพิเศษ ในการเดินทางของมดฝูงแรก ที่เริ่มออกจากรังจะเดินแบบสุ่ม (random) ส่วนมดในฝูงต่อมาจะเดินทางตามเส้นทางโดยจะพิจารณาเส้นทางจากข้อมูลความหนาแน่นของฟีโรโมนที่มดฝูงก่อนหน้านี้ออกทิ้งเอาไว้ ซึ่งในปัจจุบันวิธีพฤติกรรมฝูงมดเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่ได้รับ

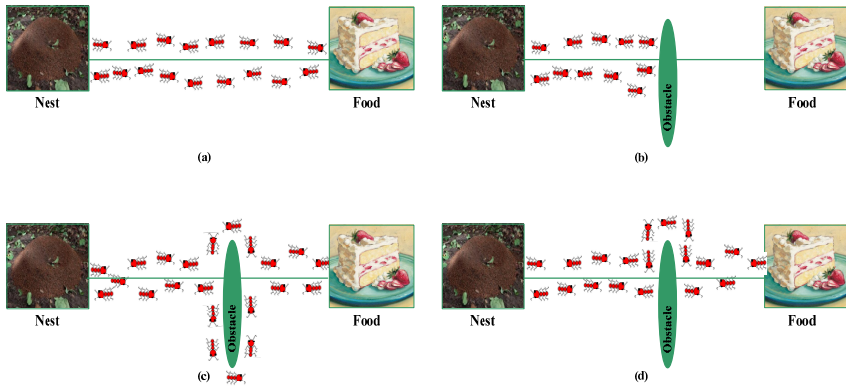
ความนิยมมากวิธีหนึ่ง และได้ทำการพิสูจน์แล้วในการแก้ปัญหาต่าง ๆ เช่น ปัญหาการเดินทางของนักขาย (traveling salesman problem: TSP) และปัญหาการกำหนดสมการกำลังสอง (quadratic assignment problem: QAP) เป็นต้น

พิจารณาตัวอย่างของการทำงานที่แสดงให้เห็นดังรูปที่ 1 จากรูปแสดงเส้นทางการเดินทางของมด (จากตัวอย่างเป็นการเดินทางไป-กลับระหว่างรังมดกับแหล่งอาหาร) ดังแสดงในรูปที่ 1 (a) ทันใดนั้นเมื่อมีสิ่งกีดขวาง (Obstacle) มาปิดกั้นเส้นทางเดิม ดังนั้น มดที่กำลังเดินทางจากรังจะไปแหล่งอาหาร (หรือมดที่กำลังเดินทางจากแหล่งอาหารจะไปรัง) ต้องตัดสินใจว่าจะเดินไปทางด้านซ้ายหรือขวา ดังแสดงในรูปที่ 1 (b) เส้นทางที่มดตัดสินใจเลือกเดินทางนั้นจะมีอิทธิพลมาจากความหนาแน่นของจำนวนสารฟีโรโมนที่มดตัวก่อนหน้านี้อปล่อยเอาไว้เป็นตัวชี้แนะ เนื่องจากไม่มีสารฟีโรโมนถูกวางไว้ก่อนหน้านี้นี้ทั้งสองทิศทาง มดจึงตัดสินใจเดินไปทั้งสองทาง ดังแสดงในรูปที่ 1 (c) จากรูปจะเห็นว่าเส้นทางด้านบนจะ สั้นกว่าเส้นทางด้านล่าง มดตัวแรกที่เดินทางตามเส้นทางด้านบนจะเดินทางข้ามสิ่งกีดขวางได้ก่อนมดตัวแรกที่เดินทางตามเส้นทางด้านล่าง ทำให้มดตัวต่อมาจะหาเส้นทางตามเส้นทางที่มีความหนาแน่นของฟีโรโมนบนเส้นทางด้านบน เป็นเหตุให้มดส่วนใหญ่ ตัดสินใจเลือกเดินทางตามเส้นทางด้านบน เนื่องจากมีความหนาแน่นของปริมาณฟีโร

โมนมากกว่า และเป็นเส้นทางที่สั้นกว่าด้วย ทำให้มดมีแนวโน้มที่จะเลือกเดินทางตามเส้นทางที่มีระยะทางสั้นกว่าอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 1 (d)

4. การประยุกต์ใช้วิธีฝูงมดสำหรับการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า (implementation of ACO for STEP)

สำหรับการประยุกต์ใช้วิธีฝูงมดในการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ต้นทุนในการลงทุนสายส่งเส้นใหม่มีค่าที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะอาศัยเครือข่ายของระบบไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของกราฟ $G(n, l)$ เมื่อ n คือ บัสของระบบไฟฟ้า และ l คือ จำนวนวงจรที่ต่อระหว่างบัส $i-j$ ซึ่งมดจะใช้สารฟีโรโมนเป็นตัวกลางในการติดต่อสื่อสารข้อมูลกันทำให้เส้นทางที่สั้นที่สุดมีสารฟีโรโมนมากกว่าเส้นทางอื่น ๆ โดยมดแต่ละตัวในฝูงจะสุ่มเลือก (random) เส้นทางเดินเพื่อสร้างคำตอบที่เป็นไปได้ และทำการเดินซ้ำ ๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด โดยหลักการเลือกเส้นทางของมดในแต่ละรอบ เรียกว่า กฎการเปลี่ยนสถานะ (state transition rule) และหลักเกณฑ์การปรับปรุงความหนาแน่นของฟีโรโมน เรียกว่า กฎการปรับปรุงทั่วไป (global updating rule) มดจะใช้หลักการทั้งสองอย่างในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 1 การหาระยะทางที่สั้นที่สุดของฝูงมดจริง

ตัวอย่างเช่น พิจารณาจากรูปที่ 2 แสดงภาพเครือข่ายระบบกำลังไฟฟ้า 3 บัส โดยมีบัสที่ 3 สร้างใหม่ และรูปที่ 3 แสดงภาพความเป็นไปได้ของเส้นทางที่สามารถก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่จากสมการที่ 10

$$l = \frac{n - (n - 1)}{2} \quad (10)$$

เมื่อ

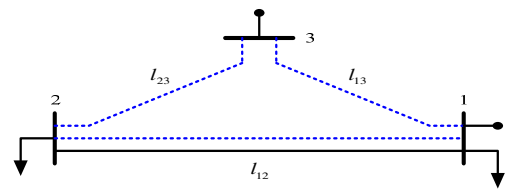
n คือ จำนวนบัสทั้งหมดของระบบ

l คือ จำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้

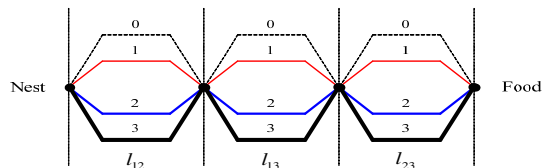
ซึ่งคือเป็นการเลือกเส้นทางและจำนวนวงจรสายส่งเส้นใหม่ที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด ดังนั้นเราสามารถจำลองเส้นทางเดินของฝูงมดได้ดังรูปที่ 4 และ Flow chart ขั้นตอนของวิธีฝูงมดสำหรับแก้ไขปัญหาลักษณะในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 2 เครือข่ายระบบกำลังไฟฟ้า 3 บัส



รูปที่ 3 แสดงความเป็นไปได้ของเส้นทางเชื่อมต่อกัน



รูปที่ 4 แสดงการจำลองเส้นทางเดินของมด

4.1 หลักการของระเบียบวิธีฝูงมด

(ก) กฎการเปลี่ยนสถานะ (state transition rule)

สำหรับวิธีฝูงมดหรือระบบมดเทียม มดเทียม (m) จะสร้างคำตอบที่เป็นไปได้ โดยเริ่มแรกจะทำการสุ่มเลือกเส้นทาง เริ่มต้นมาก่อน และจะเลือกเส้นทางถัดไปในแต่ละครั้งจะใช้สมการที่ (11)

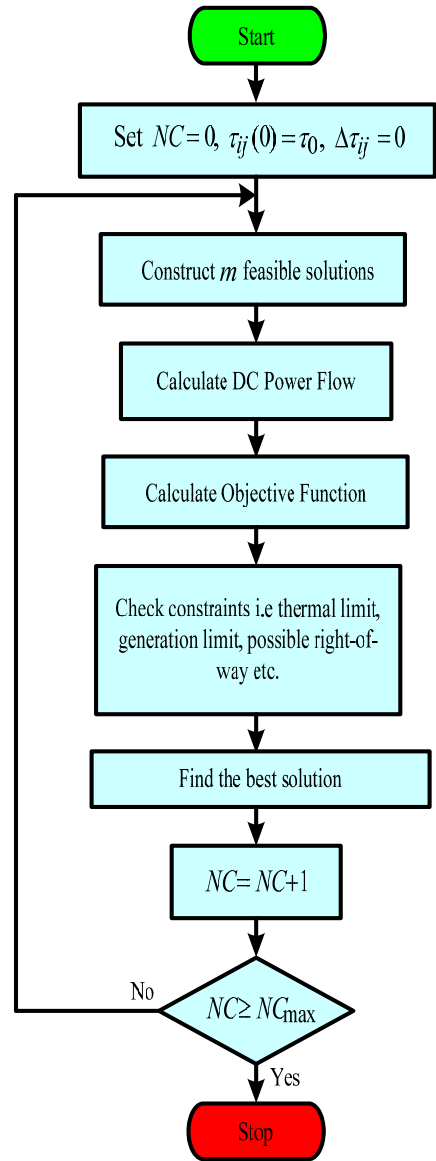
$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k=1}^m [\tau_{im}(t)]^\alpha [\eta_{im}(t)]^\beta} \quad (11)$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{c_{ij}} \quad (12)$$

โดยทั่วไปแล้วกฎการสุ่มโดยใช้ความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางถัดไปนั้นจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักของปริมาณฟิโรโมน (α) และค่าถ่วงน้ำหนักของการสุ่มอย่างมีเหตุผล (β) ถ้าค่า $\alpha = 0$ แล้วบัสที่มีความเป็นไปได้ที่อยู่ใกล้ที่สุดจะมีโอกาสในการถูกเลือกมากกว่า แต่ถ้า $\alpha > 0$ จะทำให้ได้ผลเฉลยหรือคำตอบแบบทั่ว ๆ ไป (Local search) ซึ่งไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด ในขณะที่ถ้าค่า $\beta = 0$ แล้วมดก็จะใช้ค่าของร่องรอยฟิโรโมน (τ_{ij}) เท่านั้นที่นำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางก็จะทำให้ได้คำตอบที่ไม่ดี

(ข) กฎการปรับปรุงทั่วไป (Global updating rule)

ขบวนการค้นหาของวิธีฝูงมด ไม่สามารถรับประกันได้ว่าคำตอบที่ได้จะเป็นไปตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์และตรงตามเงื่อนไขที่ต้องการหรือไม่ จึงได้มีการปรับปรุงค่าฟิโรโมน (τ) คือถ้าคำตอบที่ได้ในรอบถัดไปเป็นคำตอบที่ดีขึ้นจะให้ค่าฟิโรโมนมาก แต่ถ้าคำตอบที่ได้ในรอบถัดไปเป็นคำตอบที่ไม่ดีขึ้นจะมีค่าฟิโรโมนน้อย ซึ่งถ้าได้คำตอบในรอบถัดไปไม่ดีขึ้นก็มีเงื่อนไขในการปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นสามารถปรับปรุงความหนาแน่นฟิโรโมนได้จากสมการที่ (13)



รูปที่ 5 ขั้นตอนของวิธีการฝูงมดสำหรับแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า

Step 1. Initialization

Set $NC = 0$ / NC : Cycle Counter /
For every combination (i, j)
 Set an initial value $\tau_{ij}(0) = \tau_0$ and
 $\Delta\tau_{ij} = 0$
End

Step 2. Construct feasible solutions

For $k=1$ to m / m : number of ants /
For $i=1$ to n / n : number of branch/
 Choose a level of connection with
 transition probability give by Eq. (10).

End

Calculate Objective Function Eq. (1) and
 Check Constraints Eq. (2-9)

End

Update the best solution.

Step 3 Global updating rule

For every combination (i, j)

For $k=1$ to m

Find $\Delta\tau_{ij}^k$ according to Eq. (14)

End

Update $\Delta\tau_{ij}$ according to Eq. (13).

End

Update the trail values according to Eq.
 (12).

Update the transition probability according
 to Eq. (10).

Step 4. Next search

Set $NC = NC+1$

For every combination (i, j)

$\Delta\tau_{ij} = 0$

End

Step 5. Termination

If $(NC < NC_{max})$

Then

Go to step 2

Else

Print the best feasible solution

Stop

End

End

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t-1) + \Delta\tau_{ij} \quad (13)$$

โดยที่ $\Delta\tau_{ij}$ หาได้จากสมการที่ (14) และ $\Delta\tau_{ij}^k$ หาได้จากสมการที่ (15)

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (14)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } k^{\text{th}} \text{ ant chooses path} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

โดยที่

$P_{ij}^k(t)$ คือ ความเป็นไปได้ในการเลือกเส้นทาง
 ของมดตัวที่ k จากบัส $i-j$

τ_{ij} คือ ความหนาแน่นของฟีโรโมน
 ระหว่างบัส $i-j$

η_{ij} คือ ข้อมูลฮิวริสติก ระหว่างบัส $i-j$

c_{ij} คือ ต้นทุนสายส่งเส้นใหม่ระหว่างบัส
 $i-j$

m คือ จำนวนมดที่ใช้ในการค้นหา ; เมื่อ
 $k = 1, 2, 3 \dots \dots m$

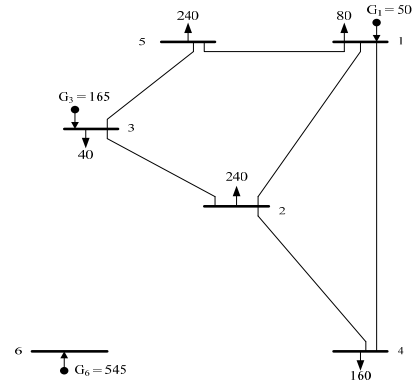
α คือ ค่าคงที่ใช้สำหรับถ่วงน้ำหนัก
 (weight) ให้กับปริมาณฟีโรโมน (τ)

β คือ ค่าคงที่ใช้ถ่วงน้ำหนักของข้อมูลฮิวริสติก (heuristic information: η)

ρ คือ สัมประสิทธิ์ของฟีโรโมน โดยที่
การระเหยของฟีโรโมน มีค่าเท่ากับ
(1- ρ)
 $\tau_{ij}(t)$ คือ ร่องรอยของฟีโรโมนในรอบที่ t
 $\Delta\tau_{ij}^k$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟีโรโมน
ของ
มดตัวที่ k จากบัส $i-j$

5. ผลการทดสอบ

วิธีที่นำเสนอทำการทดสอบกับระบบ
กำลังไฟฟ้า 6 บัสของ Garver [2] ดังแสดงในรูปที่ 6
และข้อมูลของเครื่องกำเนิดและความต้องการไฟฟ้า
แสดงใน ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 ซึ่งเป็นระบบ
จำลองที่ผู้วิจัยนิยมใช้ทดสอบกันอย่างแพร่หลาย
ระบบ 6 บัสของ Garver มีเส้นทางที่เป็นไปได้
ทั้งหมด 15 เส้นทาง มีความต้องการไฟฟ้ารวมทั้งหมด
เท่ากับ 760 MW และพิกัดจำนวนวงจรของสายส่ง
เส้นใหม่เท่ากับ 4 วงจร บทความนี้ไม่พิจารณาการ
จัดสรรกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้า ผลการทดสอบ
วิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับ GA และ TS แสดง
ในตารางที่ 1 โดยมีต้นทุนรวมทั้งหมดเท่ากับ 200
US\$ และคำตอบที่เหมาะสมที่สุดคือ $n_{3-5} = 1, n_{2-6} = 4$
และ $n_{4-6} = 2$ ดังแสดงในรูปที่ 7 ส่วนรูปที่ 8 นั้น
แสดงลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธีการที่
นำเสนอเปรียบเทียบกับวิธี GA และ TS รูปที่ 9 แสดง
การเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของคำตอบที่
กระทำซ้ำกัน 30 ครั้ง ของวิธี ACO GA และ TS



รูปที่ 6 ระบบกำลังไฟฟ้า 6 บัส

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด
ของระบบทดสอบ 6 บัส

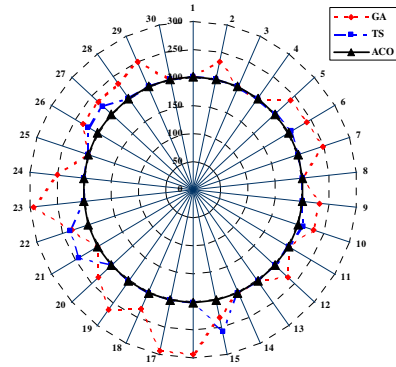
| Bus | Generation (MW) | | Demand (MW) |
|-----|-----------------|-------|-------------|
| | Max. | Level | |
| 1 | 150 | 50 | 80 |
| 2 | - | - | 240 |
| 3 | 360 | 165 | 40 |
| 4 | - | - | 160 |
| 5 | - | - | 240 |
| 6 | 600 | 545 | - |

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลระบบทดสอบ 6 บัส

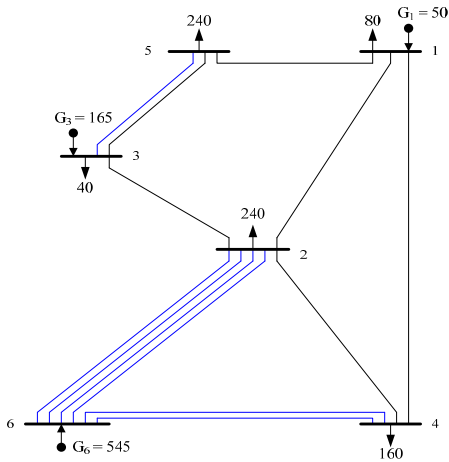
| From To | n_{ij}^0 | R (p.u) | X (p.u) | P_{ij}^{max} | Cost $\times 10^3$ US\$ |
|------------|------------|------------|------------|----------------|-------------------------------|
| 1-2 | 1 | 0.10 | 0.40 | 100 | 40 |
| 1-3 | 0 | 0.09 | 0.38 | 100 | 38 |
| 1-4 | 1 | 0.15 | 0.60 | 80 | 60 |
| 1-5 | 1 | 0.05 | 0.20 | 100 | 20 |
| 1-6 | 0 | 0.17 | 0.68 | 70 | 68 |
| 2-3 | 1 | 0.05 | 0.20 | 100 | 20 |
| 2-4 | 1 | 0.10 | 0.40 | 100 | 40 |
| 2-5 | 0 | 0.08 | 0.31 | 100 | 31 |
| 2-6 | 0 | 0.01875 | 0.30 | 100 | 30 |

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลระบบทดสอบ 6 บัส (ต่อ)

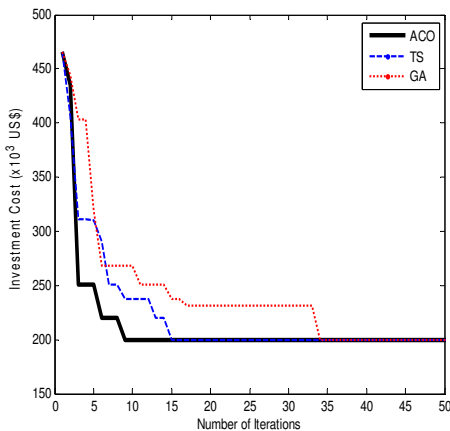
| From To | n_{ij}^0 | R (p.u) | X (p.u) | P_{ij}^{max} | Cost $\times 10^3$ US\$ |
|---------|------------|---------|---------|----------------|-------------------------|
| 3-4 | 0 | 0.15 | 0.59 | 82 | 59 |
| 3-5 | 1 | 0.25 | 0.20 | 100 | 20 |
| 3-6 | 0 | 0.12 | 0.48 | 100 | 48 |
| 4-5 | 0 | 0.16 | 0.63 | 75 | 63 |
| 4-6 | 0 | 0.0375 | 0.30 | 100 | 30 |
| 5-6 | 0 | 0.15 | 0.61 | 78 | 61 |



รูปที่ 9 การกระจายของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เมื่อทำซ้ำ 30 ครั้ง



รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งสายส่งที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ



รูปที่ 8 เปรียบเทียบการลู่เข้าหาคำตอบของ ACO, GA, และ TS

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบวิธีการที่นำเสนอเทียบกับ GA และ TS

| Methods | n_{ij} | Cost ($\times 10^3$ US\$) | | | SD. | % Get Optimum Cost | Used Time |
|---------|----------|----------------------------|---------|------|-------|--------------------|-----------|
| | | Worst | Average | Best | | | |
| GA | 7 | 368 | 227 | 200 | 41.27 | 53.333 | 46.686 |
| TS | 7 | 244 | 218 | 200 | 26.56 | 86.776 | 36.983 |
| ACO | 7 | 200 | 200 | 200 | 0.00 | 100 | 17.620 |

SD. = Standard Deviation.

6. สรุปผลการทดสอบ

บทความนี้แนะนำการแก้ปัญหา การวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้นตอนเดียว (static transmission expansion planning: STEP) ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมด (ant colony optimization: ACO) ร่วมกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ ดี.ซี (d.c. power flow model) โดยพิจารณามูลค่าการลงทุนติดตั้งสายส่งเส้นใหม่เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) พร้อมกับเงื่อนไขบังคับ (constraints) ทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ เช่น กำลังไฟฟ้าสมดุล (power balance) พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generation limit) พิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (transmission capacity limit) เป็นต้น เปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมเช่น

วิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) วิธีการค้นหาแบบตาบอด (TS) โดยพบว่าการแก้ปัญหาด้วยวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพเหนือกว่าทั้งสองวิธี ทั้งในด้านความถูกต้องของคำตอบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โอกาสในการพบคำตอบและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการหาค่าตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ผลการทดสอบพบว่า วิธีผู้มดยังง่ายต่อการนำไปใช้ และยังเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการแก้ปัญหาการขยายสายส่งไฟฟ้า เนื่องจากคำตอบที่ต้องการเป็นจำนวนเต็ม

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Romero, C. Rocha, M. Mantovani, and J. R. S. Mantovani, "Analysis of Heuristic Algorithms for the Transportation Model in Static and Multistage Planning in Network Expansion Systems," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, Vol. 150, pp. 521-526, 2003.
- [2] L. L. Garver, "Transmission Network Estimation Using Linear Programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, pp. 1688-1697, 1970.
- [3] R. Villasana, L. L. Garver, and S. J. Salon, "Transmission Network Planning Using Linear Programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, pp. 349-356, 1985.
- [4] A. H. Escobar, R. A. Gallego, and R. Romero, "Multistage and Coordinated Planning of the Expansion of Transmission Systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 19, pp. 735-744, 2004.
- [5] G. Latorre, R. D. Cruz, J. M. Areiza, and A. Villegas, "Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 18, pp. 938-946, 2003.
- [6] R. Romero, R. A. Gallego, and A. Monticelli, "Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 11, pp. 364-369, 1996.
- [7] R. A. Gallego, R. Romero, and A. J. Monticelli, "Tabu Search Algorithm for Network Synthesis," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 15, pp. 490-495, 2000.
- [8] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colomi, "Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, Vol. 26, pp. 29-41, 1996.
- [9] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant Colony System: a Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, Vol. 1, pp. 53-66, 1997.
- [10] V. Maniezzo and A. Colomi, "The Ant System Applied to the Quadratic Assignment Problem," *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, Vol. 11, pp. 769-778, 1999.

- [11] J. E. Bell and P. R. McMullen, "Ant Colony Optimization Techniques for the Vehicle Routing Problem," *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 18, pp. 41-48, 2004.
- [12] J. F. Gomez, H. M. Khodr, P. M. De Oliveira, L. Ocque, J. M. Yusta, R. Villasana, and A. J. Urdaneta, "Ant Colony System Algorithm for the Planning of Primary Distribution Circuits," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 19, pp. 996-1004, 2004.
- [13] M. G. Ippolito, G. Morana, E. R. Sanseverino, and F. Vuinovich, "Ant Colony Search Algorithm for Optimal Strategical Planning of Electrical Distribution Systems Expansion," *Applied Intelligence*, Vol. 23, pp. 139-152, 2005.
- [14] W. Tippachon and D. Rerkpreedapong, "Multiobjective Optimal Placement of Switches and Protective Devices in Electric Power Distribution Systems Using Ant Colony Optimization," *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, pp. 1171-1178, 2009.
- [15] K. Watcharasitthiwat and P. Wardkein, "Reliability Optimization of Topology Communication Network Design Using Ant Colony Optimization," *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. -, pp. 1-18, 2009.
- [16] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia, and S. Haffner, "Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, Vol. 149, pp. 27-36, 2002.