

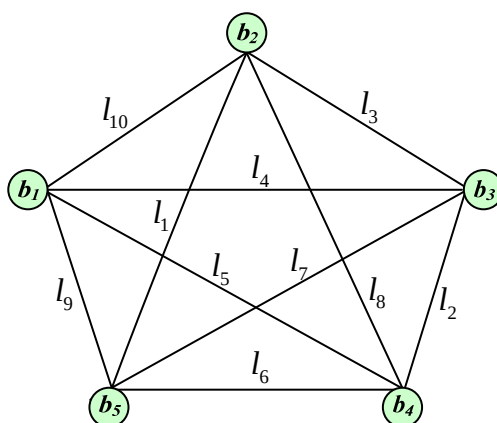
บทที่ 3

แบบจำลองปัญหาและวิธีการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองปัญหาด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์พร้อมเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีฝูงมดโดยใช้การวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าแบบจำลอง ดี. ซี. และทดสอบวิธีที่นำเสนอกับระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังทั้งหมด 3 ระบบคือ ระบบทดสอบ 6 บัสของ Garver ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 18 บัสของภาคตะวันตกของประเทศจีนและระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส ซึ่งเป็นระบบจริงที่อยู่ทางตอนใต้ของประเทศบราซิล

3.1 การประยุกต์วิธีฝูงมดสำหรับแก้ปัญหการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า

สำหรับการประยุกต์ใช้วิธีฝูงมดในการแก้ไขปัญหการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่มีค่าที่ต่ำที่สุดจะอาศัยเครือข่ายของระบบไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของกราฟ $G(b, l)$ [32,40] ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างบัสในระบบไฟฟ้ากำลังกับจำนวนทางเดินสายส่งที่เชื่อมต่อกันทั้งหมดของระบบ ดังภาพที่ 3.1



ที่มา: K. Watcharasitthiwat , "Reliability optimization of topology communication network design using an improved ant colony optimization," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 35, pp. 730-747, Sept. 2009.

ภาพที่ 3.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างบัสกับทางเดินสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง

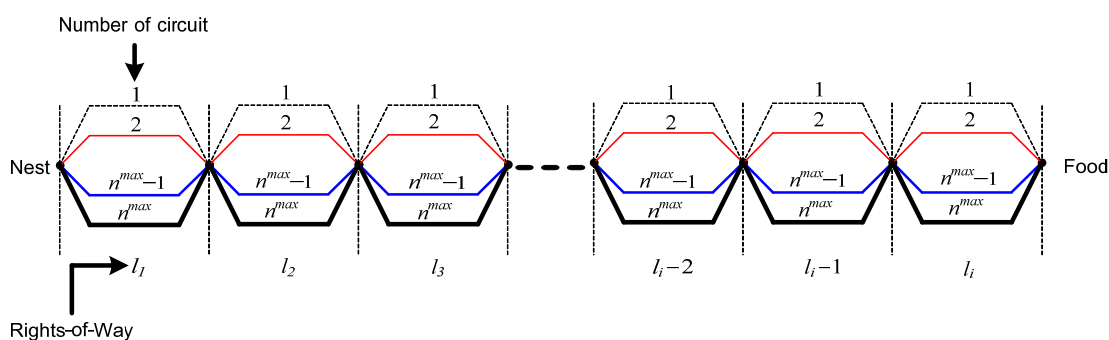
เมื่อ

b คือ บัสเวกเตอร์ของระบบไฟฟ้า

l คือ เวกเตอร์ของทางเดินสายส่ง (rights-of-way) ระหว่างบัส i ไปยังบัส j

โดยมดแต่ละตัวจะใช้สารฟีโรโมนเป็นตัวกลางในการติดต่อสื่อสารข้อมูลซึ่งกันและกัน ทำให้เส้นทางที่สั้นที่สุดมีสารฟีโรโมนมากกว่าเส้นทางอื่นๆ ซึ่งมดแต่ละตัวในฝูงจะสุ่มเลือกวงจรสายส่งเส้นใหม่เพื่อสร้างคำตอบที่เป็นไปได้และทำการเดินซ้ำๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด โดยหลักการเลือกจำนวนวงจรของมดแต่ละตัวในแต่ละรอบเรียกว่า ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ (State Transition Probability) และหลักเกณฑ์การปรับปรุงความหนาแน่นของสารฟีโรโมนเรียกว่า กฎการปรับปรุงทั่วไป (Global Updating Rule) ซึ่งมดจะใช้หลักการทั้งสองในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ในการเลือกเส้นทางและจำนวนวงจรของสายส่งเส้นใหม่ที่เป็นไปตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ มีต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ที่ต่ำที่สุดและอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ดังนั้นเราสามารถจำลองเส้นทางเดินของฝูงมดเพื่อใช้ในการตัดสินใจแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 3.2 สำหรับอัลกอริทึมและคำอธิบายขั้นตอนของวิธีฝูงมดสำหรับแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



ที่มา: K. Watcharasitthiwat , "Reliability optimization of topology communication network design using an improved ant colony optimization," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 35, pp. 730-747, Sept. 2009.

ภาพที่ 3.2 แสดงการจำลองเส้นทางเดินของฝูงมดสำหรับแก้ปัญหาขยายระบบส่ง

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ที่ต่ำที่สุดและอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ของระบบไฟฟ้า กำลังและทางด้านเศรษฐศาสตร์ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$$\text{Minimize} \quad C_T = \sum_{i,j \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (3.1)$$

เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

$$\mathbf{Sf} + \mathbf{g} - \mathbf{d} = 0 \quad (3.2)$$

$$f_{ij} - b_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (3.3)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) f_{ij}^{\max} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{g}^{\min} \leq \mathbf{g} \leq \mathbf{g}^{\max} \quad (3.5)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{\max} \quad (3.6)$$

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

3.3 ขั้นตอนการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า

สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมดมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา โดยอัลกอริทึมที่ใช้ถูกเขียนขึ้นด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์และอธิบายด้วยระเบียบขั้นตอนของวิธีพฤติกรรมฝูงมดดังแสดงในภาพที่ 3.3 ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้น กำหนดให้มดฝูงแรก (รอบ) ค้นหาคำตอบ ($t = 0$) และกำหนดจำนวนมด (a) ในหนึ่งฝูง พร้อมทั้งกำหนดค่าฟีโรโมนเริ่มต้น ($\tau(0) = \tau_0$) และกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมนเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ ($\Delta\tau = 0$)

(ก) หาขอบเขตต่ำสุด (Lower Bound) และขอบเขตสูงสุด (Upper Bound) ของคำตอบที่เป็นไปได้

การหาคำตอบที่เป็นไปได้ต่ำสุด (Lower Bound) เนื่องจากระบบเครือข่ายที่มีอยู่เดิมมีวงจรสายส่งเส้นเดิมต่อยู่บ้างแล้ว ดังนั้นขอบเขตคำตอบที่เป็นไปได้ต่ำสุดต้องรวมกับวงจรสายส่งเส้นเดิมต่อยู่ สามารถเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{x}_{\text{lower}} = [n_1^{\min} \quad n_2^{\min} \quad \dots \quad n_{l-1}^{\min} \quad n_l^{\min}] \quad (3.7)$$

เมื่อ $n_l^{\min}$ คือ จำนวนวงจรของสายส่งต่ำสุดเส้นทางที่ l

การหาคำตอบที่เป็นไปได้สูงสุด (Upper Bound) คือ จำนวนวงจรสูงสุด (Maximum circuit) ของสายส่งเส้นใหม่ที่สามารถก่อสร้างได้แต่ละเส้นทาง สามารถเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{x}_{\text{upper}} = [n_1^{\max} \quad n_2^{\max} \quad \dots \quad n_{l-1}^{\max} \quad n_l^{\max}] \quad (3.8)$$

เมื่อ $n_l^{\max}$ คือ จำนวนวงจรสูงสุดที่สามารถก่อสร้างได้เส้นทางเดินสายส่งที่ l

(ข) สร้างตารางฟีโรโมนเริ่มต้น ($\tau(0)$) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด $\mathbf{l} \times \mathbf{n}^{\max}$ นั่นคือ ผลคูณระหว่างจำนวนเส้นทางเดินสายส่งกับจำนวนวงจรสูงสุดของสายส่งที่สามารถสร้างได้ในแต่ละเส้นทาง สำหรับตารางฟีโรโมนเริ่มต้นนั้นเริ่มแรกจะกำหนดให้เท่ากับหนึ่งทั้งหมด นั่นหมายถึงจำนวนวงจรของสายส่งเส้นใหม่มีโอกาสก่อสร้างได้ทั้งหมดตามที่กำหนด สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\tau(0) = \begin{bmatrix} \tau_0^1 & \tau_1^1 & \tau_2^1 & \dots & \tau_{n^{\max}-1}^1 & \tau_{n^{\max}}^1 \\ \tau_0^2 & \tau_1^2 & \tau_2^2 & \dots & \tau_{n^{\max}-1}^2 & \tau_{n^{\max}}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tau_0^{l-1} & \tau_1^{l-1} & \tau_2^{l-1} & \dots & \tau_{n^{\max}-1}^{l-1} & \tau_{n^{\max}}^{l-1} \\ \tau_0^l & \tau_1^l & \tau_2^l & \dots & \tau_{n^{\max}-1}^l & \tau_{n^{\max}}^l \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

เมื่อ $\tau_{n^{\max}}^l$ คือ ตารางฟีโรโมนเริ่มต้นในเส้นทางเดินสายส่ง (Rights-of-way) ที่ l จนถึงจำนวนวงจรสูงสุดของสายส่งที่สามารถสร้างได้

(ค) กำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารพีโรโมนแต่ละวงจร ($\Delta\tau_l$) ในเครือข่ายที่จะก่อสร้าง โดยรูปแบบของเมตริกซ์จะเหมือนกันกับตารางสารพีโรโมนเริ่มต้น ดังนี้

$$\Delta\tau_l = \begin{bmatrix} \Delta\tau_0^1 & \Delta\tau_1^1 & \Delta\tau_2^1 & \dots & \Delta\tau_{n^{max}-1}^1 & \Delta\tau_{n^{max}}^1 \\ \Delta\tau_0^2 & \Delta\tau_1^2 & \Delta\tau_2^2 & \dots & \Delta\tau_{n^{max}-1}^2 & \Delta\tau_{n^{max}}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta\tau_0^{l-1} & \Delta\tau_1^{l-1} & \Delta\tau_2^{l-1} & \dots & \Delta\tau_{n^{max}-1}^{l-1} & \Delta\tau_{n^{max}}^{l-1} \\ \Delta\tau_0^l & \Delta\tau_1^l & \Delta\tau_2^l & \dots & \Delta\tau_{n^{max}-1}^l & \Delta\tau_{n^{max}}^l \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

(ง) กำหนดอัตราการเปลี่ยนของสารพีโรโมนของมดแต่ละตัว ($\Delta\tau_l^a$) โดยรูปแบบของเมตริกซ์มีลักษณะเช่นเดียวกับเมตริกซ์อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารพีโรโมน ดังนี้

$$\Delta\tau_l^a = \begin{bmatrix} \Delta\tau_1^1 & \Delta\tau_2^1 & \Delta\tau_3^1 & \dots & \Delta\tau_{l-1}^1 & \Delta\tau_l^1 \\ \Delta\tau_1^2 & \Delta\tau_2^2 & \Delta\tau_3^2 & \dots & \Delta\tau_{l-1}^2 & \Delta\tau_l^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta\tau_1^{a-1} & \Delta\tau_2^{a-1} & \Delta\tau_3^{a-1} & \dots & \Delta\tau_{l-1}^{a-1} & \Delta\tau_l^{a-1} \\ \Delta\tau_1^a & \Delta\tau_2^a & \Delta\tau_3^a & \dots & \Delta\tau_{l-1}^a & \Delta\tau_l^a \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

(จ) คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ แต่ละวงจรสายส่งในเครือข่าย โดยคำนวณได้จากสมการที่ (2.21-2.22) โดยอยู่ในรูปของเวกเตอร์และเมตริกซ์ตามสมการที่ (3.12-3.13)

$$\eta_l = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_1} & \frac{1}{c_2} & \dots & \frac{1}{c_{l-1}} & \frac{1}{c_l} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{p}_l^a(t) = \begin{bmatrix} p_0^1 & p_1^1 & p_2^1 & \dots & p_{n^{max}-1}^1 & p_{n^{max}}^1 \\ p_0^2 & p_1^2 & p_2^2 & \dots & p_{n^{max}-1}^2 & p_{n^{max}}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ p_0^{l-1} & p_1^{l-1} & p_2^{l-1} & \dots & p_{n^{max}-1}^{l-1} & p_{n^{max}}^{l-1} \\ p_0^l & p_1^l & p_2^l & \dots & p_{n^{max}-1}^l & p_{n^{max}}^l \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

โดย

c_l คือ ต้นทุนการก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ในเส้นทางที่ l จากบัส i ไปบัส j

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดให้มด (a) แต่ละตัวของฝูงแรกค้นหาคำตอบที่เป็นไปได้ โดยใช้วิธีการสุ่ม (Random) ซึ่งรูปแบบของชุดคำตอบ (Θ) กำหนดให้เป็นเวกเตอร์ขนาด $1 \times n$ และกำหนดให้ a คือ จำนวนมดใน 1 ฝูง ดังนั้นรูปแบบคำตอบ (Θ) เป็นเมตริกซ์ขนาด $a \times n$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Theta = [s_1, s_2, \dots, s_{a-1}, s_a]^T \quad (3.14)$$

จากนั้นคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (C_T) ตามสมการที่ (3.1) และตรวจสอบเงื่อนไขสมการที่ (3.2-3.6) มาเป็นคำตอบตั้งต้น (s_{a_best})

ขั้นตอนที่ 3 หาอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมน ($\Delta\tau_i$) แต่ละวงจรสายส่ง และปรับปรุงค่าฟีโรโมน (τ_i) ของแต่ละวงจรสายส่งตามสมการที่ (2.23-2.25)

ขั้นตอนที่ 4 ค้นหาคำตอบในรอบถัดไป ($t = t + 1$) และกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมนมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\Delta\tau_i = 0$)

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาความน่าจะเป็น จากกฎการเปลี่ยนสถานะตามสมการที่ (2.21)

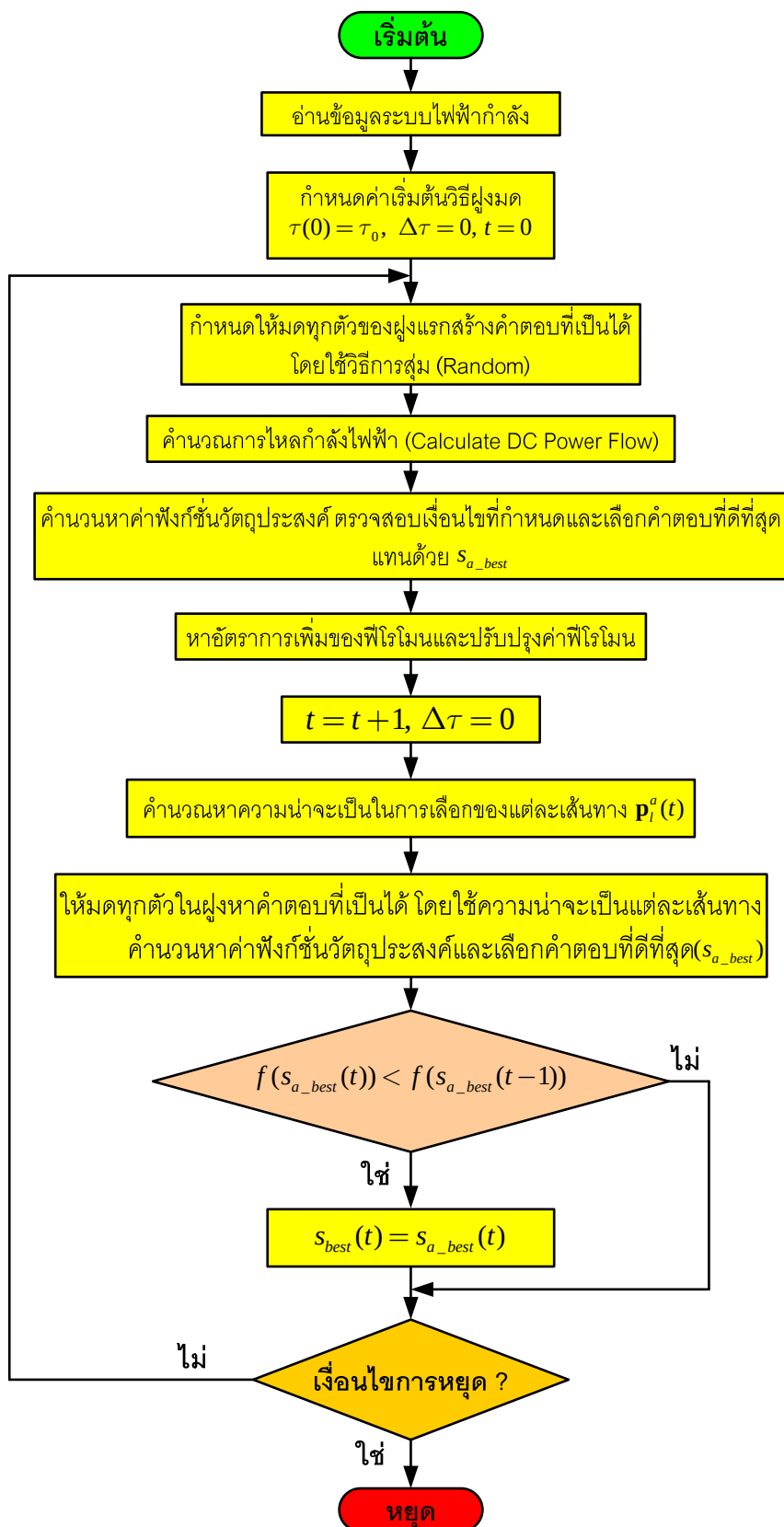
ขั้นตอนที่ 6 ให้มดทุกตัวของฝูงสุ่มหาคำตอบที่เป็นไปได้ โดยพิจารณาจากความน่าจะเป็นตามสมการที่ (2.21) พร้อมทั้งคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และตรวจสอบเงื่อนไขแต่ละคำตอบ จากนั้นเลือกคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมดีที่สุด เป็นคำตอบที่ดีที่สุด ($s_{a_best}(t)$) ในรอบปัจจุบัน

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบคำตอบที่ได้จากการค้นหาในรอบปัจจุบันดีกว่าคำตอบในรอบที่ผ่านมาหรือไม่ ($f(s_{a_best}(t)) < f(s_{a_best}(t-1))$) ถ้าใช่ แทนคำตอบเป็นคำตอบที่ดีที่สุด ($s_{best}(t) = s_{a_best}(t)$) ถ้าไม่ คงคำตอบเดิม ($s_{best}(t) = s_{a_best}(t-1)$) จากนั้นค้นหาคำตอบใหม่ในฝูง (รอบ) ถัดไป ($t + 1$)

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าไม่ ให้ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4

มีวิธีหลายวิธีที่จะถูกนำมาใช้กำหนดสภาวะในการหยุดดำเนินการค้นหา ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดเงื่อนไขการหยุดการค้นหาจากสภาวะใดสภาวะหนึ่งข้างล่างนี้

- ครบตามเวลาที่กำหนดให้ใช้ในการค้นหา (Maximum Time)
- ครบตามจำนวนรอบสูงสุดที่ตั้งค่าไว้ (Maximum Iteration)
- ค่าที่ดีที่สุดที่หาได้เท่ากับค่าเหมาะสม (Optimum) กรณีที่ทราบค่าเหมาะสมแล้ว

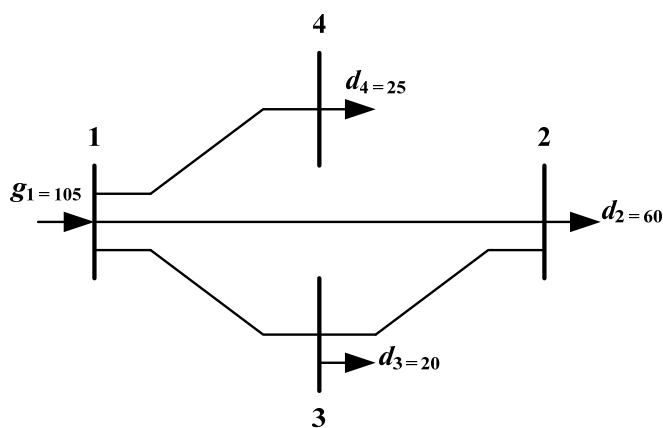


ภาพที่ 3.3 ระเบียบขั้นตอนของวิธีพฤติกรรมฝูงมด

3.4 ตัวอย่างการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า

การแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างเช่น การวางแผนขยายโรงไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Generation Expansion Planning) การวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission Expansion Planning) การวางแผนขยายระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution Expansion Planning) การหาตำแหน่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation Placements) และการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch) เป็นต้น นั้นต้องการค้นหาคำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุด ภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ ที่กำหนด ซึ่งได้จำลองปัญหาเหล่านี้ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์และแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในปัจจุบันวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีฮิวริสติกนั้นเป็นที่ยอมรับแล้วว่าเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับลักษณะปัญหาดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการยกตัวอย่างการจำลองตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ไขปัญหการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีฝูงมด เพื่อให้มีความเข้าใจหลักการทำงานของวิธีฝูงมดในการแก้ปัญหามากยิ่งขึ้น

ตัวอย่างจากภาพที่ 3.4 แสดงระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 4 บัสจากระบบทดสอบนี้ต้องการหาสายส่งเส้นใหม่โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ที่ต่ำที่สุด ซึ่งข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ [23]



ที่มา: S. H. M. Hashimoto, R. Romero, and J. R. S. Mantovani, "Efficient linear programming algorithm for the transmission network expansion planning problem," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*-, vol. 150, pp. 536-542, 2003

ภาพที่ 3.4 แสดงตัวอย่างระบบทดสอบไฟฟ้า 4 บัส

ตารางที่ 3.1

แสดงข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 4 บัส

Bus	Generation (MW)		Demand (MW)
	Max.	Level	
1	-	105	0
2	-	0	60
3	-	0	20
4	-	0	25

ที่มา: S. H. M. Hashimoto, R. Romero, and J. R. S. Mantovani, "Efficient linear programming algorithm for the transmission network expansion planning problem," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*-, vol. 150, pp. 536-542, 2003

ตารางที่ 3.2

แสดงข้อมูลของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 4 บัส

Line No. (l)	From-To ($b_i - b_j$)	n_{ij}^0	$n_{ij}^{\max}$	x_{ij} (p.u)	$f_{ij}^{\max}$ (MW)	Investment Cost (10^3 US\$)
1	1-2	1	4	3	35	35
2	1-3	1	4	2	40	40
3	1-4	1	4	2	40	40
4	2-3	1	4	2	40	40

ที่มา: S. H. M. Hashimoto, R. Romero, and J. R. S. Mantovani, "Efficient linear programming algorithm for the transmission network expansion planning problem," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*-, vol. 150, pp. 536-542, 2003

ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ (c_l) โดยใช้ข้อมูลแสดงในตารางที่ 3.2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$c_l = [35 \quad 40 \quad 40 \quad 40]$$

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นกำหนดให้มดฝูงแรกในการค้นหา ($t = 0$) และกำหนดจำนวนมด ($a = 10$) ในหนึ่งฝูง (รอบ) พร้อมทั้งกำหนดให้ฟีโรโมนเริ่มต้น ($\tau(0) = \tau_0$) และกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมนเท่ากับศูนย์ ($\Delta\tau = 0$)

(ก) หาขอบเขตต่ำสุด (Lower bound) และขอบเขตสูงสุด (Upper bound) ของคำตอบที่เป็นไปได้

$$\mathbf{x}_{\text{lower}} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

$$\mathbf{x}_{\text{upper}} = [4 \quad 4 \quad 4 \quad 4]$$

(ข) สร้างตารางฟีโรโมนเริ่มต้น ($\tau(0)$) ตามสมการที่ (2.23) โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\tau(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(ค) กำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมน ($\Delta\tau_l$) ตามสมการที่ (2.24) โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\Delta\tau_l = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(ง) กำหนดอัตราการเปลี่ยนของสารฟีโรโมนของมดแต่ละตัว ($\Delta\tau_l^a$) ตามสมการที่ (2.25) และเขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\Delta\tau_l^{10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \\ a_9 \\ a_{10} \end{matrix}$$

(จ) คำนวณหาความน่าจะเป็นจากกฎการเปลี่ยนสถานะแต่ละวงจรสายส่งที่จะถูกเลือกตามสมการที่ (2.21-2.22)

กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักของสารพีโรโมนเท่ากับ 1 ($\alpha = 1$) และค่าถ่วงน้ำหนักข้อมูลฮิวริสติกเท่ากับ 0.9 ($\beta = 0.9$) และอัตราการระเหยของสารพีโรโมนเท่ากับ 0.05 ($\rho = 0.05$)

ดังนั้น

$$\eta_l = \begin{bmatrix} \frac{1}{60} & \frac{1}{30} & \frac{1}{15} & \frac{1}{25} \end{bmatrix} \\ = [0.0167 \quad 0.0333 \quad 0.0667 \quad 0.04]$$

จะได้ค่าความน่าจะเป็นดังนี้

$$\text{Probability} = \begin{bmatrix} 0 & 30 & 42 & 16 & 12 \\ 0 & 30 & 42 & 16 & 12 \\ 0 & 30 & 42 & 16 & 12 \\ 0 & 30 & 42 & 16 & 12 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{matrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{matrix}$$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดให้หมดทุกตัวของฝูงแรกหาคำตอบที่เป็นได้ โดยการสุ่ม รูปแบบของชุดคำตอบ (Θ) กำหนดให้เป็นเวกเตอร์ขนาด $1 \times n$ และ กำหนดให้ a คือ จำนวนมดใน 1 ฝูง ดังนั้นรูปแบบคำตอบ (Θ) เป็นเวกเตอร์ขนาด $a \times n$

$$\Theta = [s_1 \quad s_2, \dots, s_{a-1} \quad s_a]^T$$

การเลือกวงจรสายส่งเส้นใหม่จะเป็นไปตามเปอร์เซ็นต์ของความน่าจะเป็นที่ได้จากสมการที่ (2.21) พร้อมทั้งคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (C_T) ตามสมการที่ (3.1) และตรวจสอบเงื่อนไขสมการที่ (3.2-3.6)

ตัวอย่าง สมมติกำหนดให้มด 1 ผึ้ง (รอบ) มี 10 ตัว ($a = 10$) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับตามสมการที่ (3.1-3.6) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\Theta = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \\ s_7 \\ s_8 \\ s_9 \\ s_{10} \end{bmatrix}$$

เมื่อได้คำตอบใหม่ จากนั้นนำไปรวมกับค่า $\mathbf{x}_{\text{lower}}$ เพื่อคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และตรวจสอบเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งคำตอบของมดแต่ละตัวแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} s_1 &= [3 \quad 2 \quad 1 \quad 1] && = 115 \times 10^3 \text{ US\$} \\ s_2 &= [3 \quad 1 \quad 2 \quad 2] && = 150 \times 10^3 \text{ US\$} \\ s_3 &= [3 \quad 4 \quad 1 \quad 2] && = 230 \times 10^3 \text{ US\$} \\ s_4 &= [2 \quad 3 \quad 1 \quad 2] && = 155 \times 10^3 \text{ US\$} \\ s_5 &= [3 \quad 1 \quad 3 \quad 1] && = 150 \times 10^3 \text{ US\$} \\ s_6 &= [4 \quad 2 \quad 2 \quad 1] && = 185 \times 10^3 \text{ US\$} \\ s_7 &= [1 \quad 2 \quad 4 \quad 2] && = 200 \times 10^3 \text{ US\$} \\ s_8 &= [2 \quad 1 \quad 2 \quad 1] && = 75 \times 10^3 \text{ US\$} \\ s_9 &= [1 \quad 2 \quad 3 \quad 3] && = 200 \times 10^3 \text{ US\$} \\ s_{10} &= [2 \quad 2 \quad 1 \quad 2] && = 115 \times 10^3 \text{ US\$} \end{aligned}$$

จากการสุ่มหาคำตอบจากจำนวนมด 10 ตัว พบว่ามดตัวที่ 8 มีค่าตรงตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด จึงนำมาเป็นตอบอ้างอิงในฝูง (รอบ) ในรอบปัจจุบัน

ขั้นตอนที่ 3 หาอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมน ($\Delta\tau_i$) และปรับปรุงค่าฟีโรโมน (τ_i) ตามสมการที่ (2.23-2.25)

$$\begin{aligned}\Delta\tau_i &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \tau(new) &= (1 - 0.05) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \tau(new) &= \begin{bmatrix} 0 & 1.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 \\ 0 & 0.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 \\ 0 & 1.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 \\ 0 & 0.95 & 0.95 & 0.95 & 0.95 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 4 ค้นหาคำตอบในรอบถัดไป ($t = t + 1$) หรือสุ่มคำตอบในฝูงถัดไป และกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารฟีโรโมนเท่ากับศูนย์ ($\Delta\tau_i = 0$)

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาความน่าจะเป็นในการเลือกวงจรแต่ละเส้นทางของสายส่ง เส้นใหม่ตามสมการที่ (2.21)

$$\text{Probability} = \begin{bmatrix} 0 & 55 & 19 & 15 & 11 \\ 0 & 30 & 42 & 16 & 12 \\ 0 & 55 & 19 & 15 & 11 \\ 0 & 30 & 42 & 16 & 12 \end{bmatrix}$$

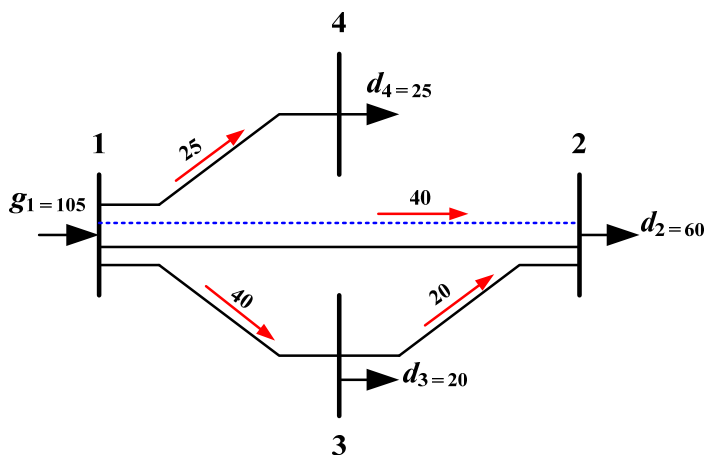
ขั้นตอนที่ 6 ให้หมดทุกตัวของฝูงค้นหาหาคำตอบที่เป็นไปได้ โดยพิจารณาจากความน่าจะเป็นตามสมการที่ (2.21) พร้อมทั้งคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และตรวจสอบเงื่อนไขแต่ละคำตอบ จากนั้นเลือกคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมดีที่สุด เป็นคำตอบที่ดีที่สุด $s_{a_best}(t)$ ในรอบปัจจุบัน

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบคำตอบที่ได้จากการค้นหาในรอบปัจจุบันดีกว่าคำตอบในรอบที่ผ่านมาหรือไม่ ($f(s_{a_best}(t)) < f(s_{a_best}(t-1))$) ถ้าใช่ แทนคำตอบเป็นคำตอบที่ดีที่สุด ($s_{best}(t) = s_{a_best}(t)$) ถ้าไม่ คงคำตอบเดิม ($s_{best}(t) = s_{a_best}(t-1)$) จากนั้นค้นหาคำตอบใหม่ในฝูง (รอบ) ถัดไป ($t+1$)

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าไม่ ให้ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4

สำหรับคำตอบของระบบทดสอบกำลังไฟฟ้า 4 บัสที่นำมาเป็นตัวอย่างนี้ ผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหาคำตอบแสดงดังภาพที่ 3.5 เมื่อคำนวณครบ 200 รอบ โดยใช้เวลา 9.125 วินาที

$$s_{best} = [2 \quad 1 \quad 1 \quad 1] \\ = 35 \times 10^3 \text{ US\$}$$



ที่มา: S. H. M. Hashimoto, R. Romero, and J. R. S. Mantovani, "Efficient linear programming algorithm for the transmission network expansion planning problem," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*-, vol. 150, pp. 536-542, 2003

ภาพที่ 3.5 แสดงคำตอบที่ได้จากวิธีฝูงมดของระบบไฟฟ้ากำลัง 4 บัส

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำวิธีผู้ลงมดมาประยุกต์สำหรับแก้ปัญหาวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ที่ต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังและทางด้านเศรษฐศาสตร์ พร้อมทั้งอธิบายขั้นตอนการแก้ปัญหาและได้ทำการยกตัวอย่างวิธีการแก้ปัญหากับระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 4 บัส เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น ส่วนกรณีศึกษาและผลการทดสอบของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังจะกล่าวไว้ในบทที่ 4 ต่อไป