

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการ

Second Announcement & Call for Papers



WREC

2009 - Asia

www.wrec2009asia.com

World Renewable Energy Congress 2009 - Asia

19-22 May, 2009
BITEC, Bangkok, Thailand

Important Dates

30 January 2009 Abstract submission

15 February 2009 Notification of acceptance

15 April 2009 Deadline for full paper submission

15 April 2009 Deadline for registration

Incorporating



Co-organised by



In Collaboration with



Secretariat of WREC 2009 - Asia

The Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE)
King Mongkut's University of Technology Thonburi
126 Pracha-Uthit Road, Bangmod, Tungkrui, Bangkok 10140 Thailand
Tel: +662 4708309-10 Ext. 4133, 4134, 4152, Fax: 662 8729805
E-mail: secretariat@wrec2009asia.com

Under Patronage of WREN



Officially Supported by



Optimal Transmission Expansion Planning using Ant Colony Optimization

Prasert Limsakul*, Saravuth Pothiya, and Nopporn Leeprechanon

Department of Electrical Engineering, Thammasat University, Klongluang, Pathumthan, Thailand.10120
 *Corresponding author: p.limsakun@hotmail.com, saravuthpothiya@yahoo.com, nopporn@ieee.org.

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 system 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) 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, Power System Planning, Tabu Search Algorithm, And Transmission Expansion Planning

1. INTRODUCTION

Transmission expansion planning (TEP) is an important issue of electrical power system planning. The principle of TEP is to establish an optimal configuration to be consistent with electricity demand and a generation planning scheme, meeting the requirement of delivering electricity sufficiently, safely and economically over the planning period. For that reason, TEP addresses an optimization problem in the power system. The model of TEP can be categorized as static and dynamic according to the treatment of the study period. Static planning involves a single horizontal planning and answering the questions of *what* and *where* type of new equipment should be installed in an optimal way that minimizes the installation and operational costs. Others, dynamic planning is a derived generalization that considers the separation of planning horizon into several stages and answering the questions of *what*, *where*, and *when* to install the network additions [1]. However, this paper focuses only on the static planning.

In the past decade many researchers proposed various techniques to solve both static and dynamic planning problems. The literatures of mathematical model applied to TEP were classified exclusively by *Latorre et al.* [2]. *Garver* [3] and *Villasana et al.* [4] proposed linear programming algorithms to solve the static TEP. In dynamic view, *Escobar et al.* [5] proposed an efficient genetic algorithm (GA) to solve the problem of multistage and coordinated TEP. Many artificial intelligence (AI) methods have been applied for solving TEP problems. These methods include Simulated Annealing (SA) [6], Genetic Algorithm GA [5] and Tabu Search (TS) [7]. Recently, a method so called Ant Colony Optimization (ACO) has become a candidate for many potential applications. The ACO algorithm is inspired by the behaviors of real ant colonies and was first introduced by *Dorigo* to solve the Traveling Salesman Problem (TSP) [8], and later was applied to the asymmetric TSP [9], the Quadratic Assignment Problem (QAP) [10] and the Vehicle Routing Problem (VRP) [11]. Recently, ACO has been adopted to some network problems e.g. power distribution [12] and communication network design [14]. However, none of the literatures include the application of ACO to TEP problem in the power transmission domain. This paper, therefore, proposes the application of ACO to the DC power flow based model for solving the static TEP. The results obtained by ACO are compared with those obtained by the conventional approaches i.e. GA and TS methods in term of solution quality and computational efficiency.

The remaining part of this paper is organized as follows. Section 2 gives the problem formulation of TEP problem based on DC load flow model. Section 3 elaborates the principle of ACO algorithm. Section 4 presents the detailed procedures of the ACO approach for solving the TEP problem. Section 5 shows a case study and gives the comparative results with the traditional methods. Conclusion is finally given in Section 6.

2. PROBLEM FORMULATION

2.1 Objective Function

The objective function of TEP is to minimize the investment cost of transmission lines associated with physical and economic constraints. In this paper, the classical DC power flow model is used for static TEP, which can be formulated as follow [3, 13].

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

where C_T is the total investment cost of constructions lines, c_{ij} is the cost of a circuit which is a candidate for addition to the right-of-way, n_{ij} is the number of circuit added to the right-of-way, N is the total number of buses in the system, and Ω is the set of all rights-of-way.

2.2 Constraints

2.2.1 Equality constraint.

The set of equations determined by Kirchoff's laws (KCL, KVL), the power flows in the system are expressed as:

- (a) Power Balance: this constraint represents the conservation of power in each node.

$$\mathbf{S}^* P_i + P_g - P_d = 0 \quad (2)$$

Based on the above assumptions, DC load flow can be obtained as following equation.

$$P_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N (B_{ij}(\theta_i - \theta_j)) \quad ; i = 1, 2, 3 \dots N \quad (3)$$

where $\mathbf{S}$ is the branch-node incidence transposed matrix, P_i is the real power flow injection at bus i , P_g is generation injection of nodes (generation in bus k), P_d is the load demand vector in all networks nodes.

- (b) Kirchoff's voltage law (KVL) is the conservation of energy in the equivalent DC network and the constraint are nonlinear.

$$P_{ij} - b_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (4)$$

where P_{ij} is the power flow in branch $i-j$, b_{ij} is the susceptance in the right-of-way $i-j$, n_{ij}^0 is the number of circuits in the original base system, n_{ij} is the new number of circuits added to the right-of-way $i-j$, and θ_i, θ_j is the phase angle of the terminal bus i and j .

2.2.2 Inequality constraint.

The inequality constraints reflect the limits on physical devices in the power system as well as the limits created to ensure system security.

- (a) Transmission capacity limit or power flow limit.

These constraints can represent the maximum power of transmission line which is capable of carrying based on thermal and dynamic stability considerations.

$$|P_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot P_{ij}^{\max} \quad (5)$$

where $P_{ij}^{\max}$ is the maximum branch power flow in the right-of-way $i-j$.

- (b) Power generating limit.

These constraints give the maximum and minimum generating capacities, outside of which it is not feasible to generate due to technical or economic reasons.

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (6)$$

where $P_g^{\min}$ and $P_g^{\max}$ are the minimum and maximum active power output generated at bus k .

- (c) Right of way limit.

For transmission planning, planners need to know the exact location and capacity of the new required lines. Therefore this constraint has to be included to consider in the planning. Mathematically, this constraint defines the line location and the maximum number of lines that can be installed in a specified location. It is represented as follow:

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

where $n_{ij}^{\max}$ is the maximum number of circuits that can be added in the right-of-way $i-j$.

3. ANT COLONY OPTIMIZATION

Inspired by the collective behavior of a real ant colony, *Marco Dorigo* first introduced the ant system (AS) in his Ph.D. thesis in 1992, and further published in [8, 9]. The characteristics of an artificial ant colony include positive feedback, distributed computation, and the use of a constructive greedy heuristic. Positive feedback accounts for rapid discovery of good solutions, distributed computation avoids premature convergence, and the greedy heuristic helps to find acceptable solutions in the early stages of the search process. In order to demonstrate the AS approach, the authors

apply this approach to the classical TSP, asymmetric TSP, Quadratic Assignment Problem (QAP), and Job-Shop Scheduling problem (JSSP). The AS shows very good results in each applied area. More recently, *Dorigo and Gambardella* [9] have been working on extended versions of the AS paradigm. ACO is one of the extensions and has been applied to the symmetric and asymmetric TSP with excellent results in literature. The Ant System approach has also been applied successfully to other combinatorial optimization problems such as the vehicle routing problem.

ACO is an algorithm which was inspired by the behavior of real ants. Ethnologists have studied how blind animals such as ants capable of finding the shortest path from food sources to the nest without using visual cues. They are also capable of adapting themselves in the changing environment. For example, finding a new shortest path once the old one is no longer feasible due to a new obstacle. The studies by ethnologists reveal that such capabilities are essentially due to communicating information among individuals regarding path to decide the direction. Ants deposit a certain amount of pheromone while walking, and each ant probabilistically prefers to follow a direction rich in pheromone rather than a poorer one.

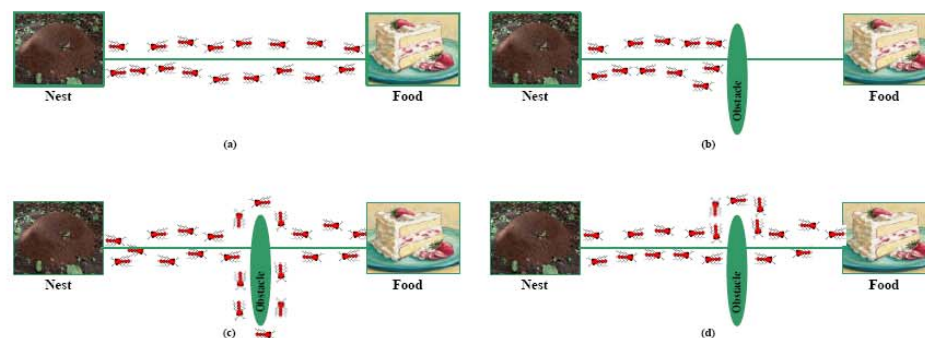


Fig. 1 Behavior of ants, (a) Real ants follow a path between nest and food source. (b) An obstacle appears on the path: ants choose whether to turn left or right with equal probability. (c) Pheromone is deposited more quickly on the shorter path. (d) All ants have chosen the shorter path.

Fig.1 illustrated the searching behavior of Ant family. In Fig.1(a) ants are on a straight line that connects a food source to their nest. An ant will deposit pheromone while walking and it probabilistically prefers to follow a direction rich in pheromone. This behavior can be explained how ants can find the shortest path that reconnects a line broken by an obstacle. In Fig. 1 (b), ants are obstructed and they can not continue to go. Therefore, they have to choose between turning right or left. Half of the ants choose to turn right and the other half choose to turn left. A similar situation arises on the other side of the obstacle shown in Fig. 1 (c). Ants choosing the shorter path will more rapidly reconstitute the interrupted pheromone trail compared with those choosing the longer route. Thus, the shorter path will receive a greater amount of pheromone per time unit and, in turn, larger number of ants will choose the shorter one. Due to this positive feedback, all the ants will rapidly choose the shorter path shown in Fig. 1 (d). All ants move at approximately the same speed and deposit a pheromone trail at approximately the same rate. The time consumed on the longer side of an obstacle is greater than the shorter one. It thus makes the pheromone trail accumulate more quickly on the shorter side. Ants prefer higher pheromone trail levels causing the accumulation to build up faster on the shorter route.

4. IMPLEMENTATION OF ACO FOR TEP

This section elaborates an application of ACO algorithm to solve TEP. First, the model has to be formulated as the routes between nest and food source for ACO. For example, a power system consists of 3 buses and 3 branches. Each branch can choose a number of possible line and the possible right-of-way as shown in Fig. 2. This network can be graphically translated as the radial routes between nest and food source for ACO as shown in Fig. 3. This model reveals that the transmission system topology can be constructed by randomly selecting the number of line(s) of each branch, which is similar to the ant's route between the nest and food source.

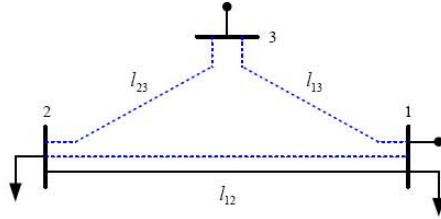


Fig. 2 Example of power system 3 buses 3 branches.

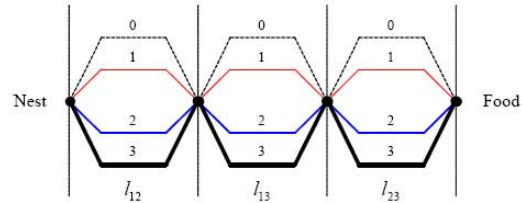


Fig. 3 Simulate model as the routes of ants between nest and food source.

In general, the procedure of ACO algorithm can be described as follows: m ants are initially positioned at the nest. Each ant will choose a possible route as a solution. In fact, each ant builds a feasible solution (called a tour) by repeatedly applying a stochastic greedy search, called, the state transition rule. Once all ants have terminated their tours, the following steps are performed: The amount of pheromone is modified by applying the global updating rule [8], [9]. Ants are guided, in building their tours, by both heuristic and pheromone information. Naturally, a link with a high amount of pheromone is a desirable choice. The pheromone updating rules are designed so that they tend to give more pheromone to edges, which should be visited by ants. A flowchart of the proposed TEP-ACO and its algorithm is shown in Fig. 4. The detail of ACO algorithm can be described in the following steps.

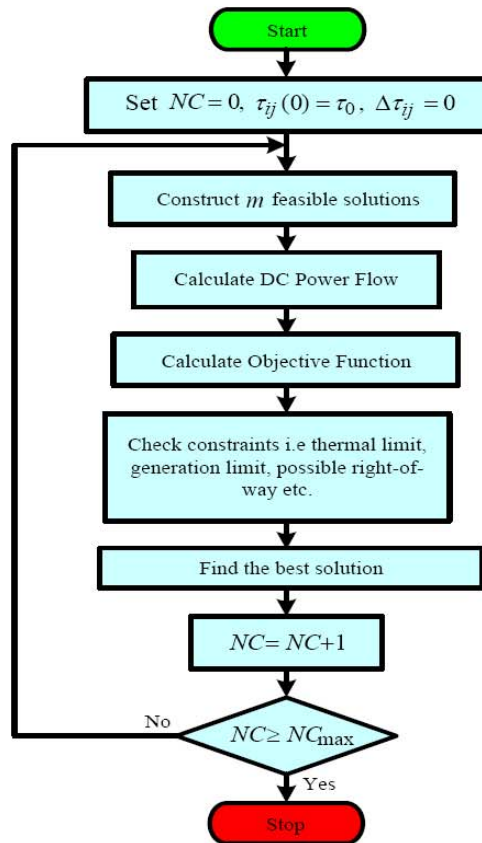


Fig. 4 Flow chart of TEP-ACO algorithm.

Step 1. Initialization

(A) State transition rule

```

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. (2-7)
    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. (12)
    End
    Update  $\Delta\tau_{ij}$  according to Eq. (11).
End
Update the trail values according to Eq. (10).
Update the transition probability according to Eq. (8).

Step 4. Next search
Set NC = NC+1
For every combination (i, j)
     $\Delta\tau_{ij} = 0$ 
End

Step 5. Termination
If (NC < NCmax)
    Then
        Go to step 2, Else
        Print the best feasible solution
        Stop
    End
End
  
```

The state transition rule of the ant colony is given in Eq. (8). This equation represents the probability that ant k selects a link connects bus i and bus j :

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k=1}^m [\tau_{im}(t)]^\alpha [\eta_{im}(t)]^\beta} \quad (8)$$

where τ_{ij} is the pheromone intensity and η_{ij} is the heuristic information between node i and node j , respectively. In addition, α is the relative importance of the trail and β is the relative importance of the heuristic information. The problem specific heuristic information is:

$$\eta_{ij} = \frac{1}{c_{ij}} \quad (9)$$

where c_{ij} represents the associated cost of constructions transmission lines. Therefore, the level of line with lesser cost has greater probability to be chosen.

(B) Global updating rule

During the solution construction, it is no guarantee that an ant will construct a feasible solution, which obeys the reliability constraint. The pheromone updating treats the unfeasible solution. The amount of pheromone, deposited by ants, is set to a high value if the generated solution is feasible. On other hand, this value is set to a low value if it is infeasible. Therefore, this value depends on the solution quality. Infeasibility can be handled by assigning the penalty which proportion to the amount of reliability violations. In case of feasible solution, an additional penalty is introduced to improve its quality.

Following the above remarks, the trail intensity is updated as follows:

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t-1) + \Delta \tau_{ij} \quad (10)$$

ρ is a coefficient such that $(1 - \rho)$ represents the evaporation of trail and $\Delta \tau_{ij}$ is:

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (11)$$

where m is the number of ants and $\Delta \tau_{ij}^k$ is given by:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } k^{\text{th}} \text{ ant chooses path} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

5. NUMERICAL RESULTS

The proposed TEP-ACO method was tested on the well-known Garver's six-bus test system [3]. The Garver system has 6 buses and 15 candidate branches. The total demand is 760 MW and maximum possible number of added lines (right of way limit) per branch equals four. The optimal planning solution for the Garver's system is $n_{26} = 4$, $n_{35} = 1$, and $n_{46} = 2$. The simulation was made in comparison to GA and TS approaches. All methods are performed 30 trials, under the same evaluation function and individual definition, in order to compare their solution quality, convergence characteristic, and computation efficiency. The programs were implemented by MatLab[®] languages on Intel[®] Core2 Duo 1.66 GHz Laptop with 2 GB RAM under Windows XP. The statistic results which are performed by 30 trials, such as the investment cost, standard deviation, computational time and percentage of approaching near optimal solution, are shown in Table 1.

Table 1: Results of Garver's Six-Bus Test System

Methods	n_{ij}	Investment Cost (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 Derivation.

Fig.5. shows the comparative convergence characteristic of the ACO, GA, and TS. Fig.6 shows the distribution outlines of the best solution of each trial. Almost all investment costs obtained by the ACO method are lower. This verifies that the ACO method has better quality of solution.

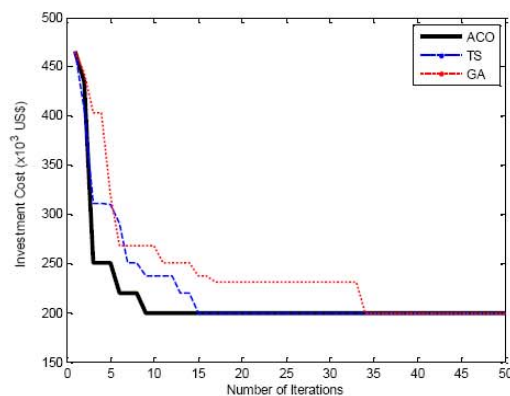


Fig.5. Convergence characteristic of three methods

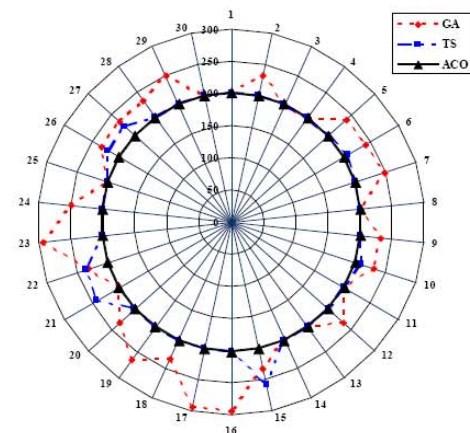


Fig.6. Distribution of investment cost of three methods

6. CONCLUSION

This paper proposes a novel approach adopting ACO search algorithm to solve TEP problem that works corporately with the DC power flow model. The proposed method is test with Garver's six-bus test system which demonstrates good performance in comparison to the conventional GA and TS methods in terms of less calculation time, quality of solution and stable-convergence characteristic.

7. REFERENCES

- [1] A. R. Abdelaziz, (2000), "Genetic algorithm-based power transmission expansion planning," *Electronics, Circuits and Systems, 2000. ICECS 2000. The 7th IEEE International Conference on*, **2**, pp. 642-645.
- [2] G. Latorre, R. D. Cruz, J. M. Areiza, and A. Villegas, (2003), "Classification of publications and models on transmission expansion planning," *Power Systems, IEEE Transactions on*, **18**, pp. 938-946.
- [3] L. L. Garver, () "Transmission Network Estimation Using Linear Programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **89**, pp. 1688-1697, 1970.
- [4] R. Villasana, L. L. Garver, and S. J. Salon, (1985), "Transmission Network Planning Using Linear Programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **104**, pp. 349-356.
- [5] 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.
- [6] R. Romero, R. A. Gallego, and A. Monticelli, (1996), "Transmission system expansion planning by simulated annealing," *Power Systems, IEEE Transactions on*, **11**, pp. 364-369.
- [7] R. A. Gallego, R. Romero, and A. J. Monticelli, (2000), "Tabu search algorithm for network synthesis," *Power Systems, IEEE Transactions on*, **15**, pp. 490-495.
- [8] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colomi, (1996), "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, **26**, pp. 29-41.
- [9] M. Dorigo and L. M. Gambardella, (1997), "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, **1**, pp. 53-66.
- [10] V. Maniezzo and A. Colomi, (1999), "The ant system applied to the quadratic assignment problem," *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, **11**, pp. 769-778.
- [11] J. E. Bell and P. R. McMullen, (2004) "Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem," *Advanced Engineering Informatics*, **18**, pp. 41-48.
- [12] J. F. Gomez, H. M. Khodr, P. M. De Oliveira, L. Ocque, J. M. Yusta, R. Villasana, and A. J. Urdaneta, (2004) "Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits," *Power Systems, IEEE Transactions on*, **19**, pp. 996-1004.
- [13] R. Abdelaziz, (2000) "Genetic algorithm-based power transmission expansion planning," *Electronics, Circuits and Systems. ICECS 2000. The 7th IEEE International Conference on*, **2**, pp. 642-645.
- [14] K. Watcharasitthiwat and P. Wardkein, (2009) "Reliability optimization of topology communication network design using ant colony optimization," *Reliability Engineering & System Safety*, pp. 1-18.



PROCEEDINGS VOL. 1

PW - Electrical Power System
PE - Power Electronics
CT - Control System and Instrument Technology
CP - Computer and Information Technology

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๒

๒๘-๓๐ ตุลาคม ๒๕๕๒ โรงแรมทวารวดี รีสอร์ท จ.ปราจีนบุรี

32nd Electrical Engineering Conference

28-30 October 2009 Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand



จัดการประชุมโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
เทคโนโลยีการจัดการระบบสารสนเทศ
และภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

การประยุกต์วิธีฝูงมดสำหรับวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาความมั่นคง

An Application of Ant Colony Optimization to Transmission Expansion Planning with Security Constraints

ประเสริฐ ลิ่มสกุล, สราวุธ โพธิยา และนพพร ลิขนิรันดร์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
99 ม.18 ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
โทร. 0-2564-3001 ถึง 9 ต่อ 3037, E-mail: nopporn@ieee.org

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงมดสำหรับใช้แก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาความมั่นคงของระบบ (N-1) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ทำให้ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่มีค่าต่ำที่สุด เพื่อรองรับกับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคตได้ ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังและทางด้านเศรษฐศาสตร์ วิธีการที่นำเสนอถูกนำไปทดสอบกับระบบกำลังไฟฟ้า 6 บัสของ Garver's โดยเปรียบเทียบกับวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ผลปรากฏว่าวิธีการที่นำเสนอมีสมรรถนะและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการค้นหาคำตอบดีกว่า

คำสำคัญ: วิธีฝูงมด วิธีการเชิงพันธุกรรม การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า

Abstract

This paper proposes an application of Ant Colony Optimization (ACO) to solve a Static Transmission Expansion Planning (STEP) problem with security constraints 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 physical and economic constraints. To appraise the achievability of ACO, a traditional systems i.e. the Garver's six-bus system is applied to test the proposed method. The experimental results obtained by ACO are compared to those obtained by the conventional approaches i.e. Genetic Algorithm (GA) 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, and Transmission expansion planning

1. บทนำ

การวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าถือว่าเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งของการวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง โดยหลักการของการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าคือ การหารูปแบบเครือข่ายของระบบส่งที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้สามารถรองรับกับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาของการวางแผน ซึ่งอาจจะเป็น 5 ปีหรือ 10 ปี โดยต้องเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังและประหยัดค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สุด

การวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบ่งได้สองแบบ คือ แบบขั้นตอนเดียว (static model) และแบบหลายขั้นตอน (dynamic model) สำหรับวิธีการวางแผนแบบขั้นตอนเดียวคือ การวางแผนตามระยะเวลาที่ผู้วางแผนกำหนดไว้และใช้เทคนิคต่างๆ แก้ปัญหา เพื่อตอบคำถามต่างๆ เหล่านี้ คือ เส้นทางของการเพิ่มสายส่งเส้นใหม่ที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ในตำแหน่งใด (Where to build) และจำนวนวงจรที่ก่อสร้างขึ้นใหม่จะต้องใช้งบประมาณเท่าไร (How many to investment) จึงจะเหมาะสมที่สุดตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ ส่วนการวางแผนแบบหลายขั้นตอนคือ เอาคำตอบของขั้นตอนแรกมาเป็นฐานเพื่อที่จะได้คำตอบถัดไป และกระทำจนกว่าจะครบช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งนอกจากจะตอบคำถามเบื้องต้นที่กล่าวมาแล้ว จะตอบคำถามได้ว่าสายส่งเส้นใหม่ที่จะเพิ่มไปในระบบควรเป็นเมื่อไร (When to build) จึงจะเหมาะสมกับความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคต [1] การวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีผู้เสนอเทคนิคต่างๆ มาแล้วหลายวิธี อาทิเช่น ในปี ค.ศ. 1970 Garver [2] นำเสนอการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP), ในปี ค.ศ. 1996 R. Romero et. al [3] นำเสนอวิธีจำลองการเย็นตัวของโลหะ (Simulated Annealing: SA), ในปี ค.ศ. 1998 R. A. Gallego et. al. [4] นำเสนอวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA), และในปี ค.ศ. 2000 R. A. Gallego et. al. [5] วิธีการค้นหาแบบตาบ (Tabu Search: TS) เป็นต้น

วิธีฝูงมด (Ant Colony Optimization) เป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหนึ่ง โดยได้แนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรม การหาอาหารของมดและได้ทำการพิสูจน์แล้วว่าสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการนำไปใช้

บทความนี้นำเสนอวิธีฝูงมด (Ant Colony Optimization: ACO) ประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาความมั่นคงของระบบ (N-1) ทำการทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส ซึ่งพิจารณา 2 กรณี คือ พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงและไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) สำหรับบทความที่นำเสนอใช้วิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ ดี.ซี (dc power flow model).

2. การจำลองปัญหา (Problem Formulation)

2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าในบทความนี้คือ ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ ภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังและทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

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

2.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

$$Sf + g - d = 0 \quad (2)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij} (n_{ij}^0 + n_{ij}) (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (3)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) f_{ij}^{\max} \quad (4)$$

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

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{\max} \quad (6)$$

n_{ij} is integer variable, f_{ij}, θ_j unbounded, $(i, j) \in \Omega$

2.3 เงื่อนไขบังคับพิจารณาความมั่นคง (N-1)

$$Sf^{n-1} + g^{n-1} - d^{n-1} = 0 \quad (7)$$

$$f_{ij}^{n-1} - \gamma_{ij} (n_{ij}^0 + n_{ij} - 1) (\theta_i^{n-1} - \theta_j^{n-1}) = 0 \quad (8)$$

$$|f_{ij}^{n-1}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij} - 1) f_{ij}^{\max} \quad (9)$$

$$g_i^{\min} \leq g_i^{n-1} \leq g_i^{\max} \quad (10)$$

$$0 \leq (n_{ij} - 1) \leq n_{ij}^{\max} \quad (11)$$

n_{ij} is integer variable, $f_{ij}^{n-1}, \theta_j^{n-1}$ unbounded, $(i, j) \in \Omega$

and $(n-1) \in \Omega$

โดยที่ C_T คือ ต้นทุนรวมทั้งหมด, c_{ij} คือ ต้นทุนของสายส่งที่เพิ่มเข้าไปในเครือข่ายจากบัส $i-j$, n_{ij} คือ สายส่งที่เพิ่มใหม่ในเครือข่ายจากบัส $i-j$, S คือ branch-node incidence matrix, f คือ กำลังไฟฟ้าที่บัสใด ๆ, g คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสใด ๆ, d คือ ความต้องการไฟฟ้าที่บัสใด ๆ, $|f_{ij}|$ คือ กำลังไฟฟ้าสมมูลที่ไหลจากบัส $i-j$, f_{ij} คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส $i-j$, $f_{ij}^{\max}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลจากบัส $i-j$, γ_{ij} คือ ค่า susceptance ของสายส่งจากบัส $i-j$, $g_i^{\min}$, $g_i^{\max}$ คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i , n_{ij}^0

คือ สายส่งที่มีอยู่เดิมในเครือข่ายจากบัส $i-j$, θ_i คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i , θ_j คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส j , $n-1$ คือ เหตุการณ์ที่สายส่งหลุดออกจากระบบจำนวนหนึ่งเส้นและ Ω คือ เซตทั้งหมดของเส้นทางเดินสายส่ง สมการที่ (2) คือ สมการสมดุลไฟฟ้าหรือกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ สมการที่ (3) สมการการไหลกำลังไฟฟ้าของวงจรสมมูลแบบ ดี.ซี (dc load flow equation) หรือเรียกว่ากฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ สมการที่ (4) คือ พิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าต้องไม่เกินพิกัดของระบบส่ง สมการที่ (5) พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสใด ๆ ต้องไม่เกินกำลังการผลิตสูงสุด สมการที่ (6) พิกัดของจำนวนวงจรสายส่งเส้นใหม่ต้องไม่เกินจำนวนวงจรสูงสุด จากสมการที่ (2) สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส i ได้ดังนี้

$$f_i = \sum_{k=1}^{Nb} B_{ik} (\theta_i - \theta_k) \quad ; i = 1, 2, \dots, Nb \quad (12)$$

โดยที่ f_i คือ กำลังไฟฟ้าที่บัส i , B_{ik} คือ ค่า susceptance ของสายส่งจากบัส $i-k$, Nb คือ จำนวนบัสทั้งหมดของระบบและสมการที่ (3) สามารถหาได้จากสมการที่ (13)

$$f_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} (n_{ij}^0 + n_{ij}) (\theta_i - \theta_j) \quad (13)$$

เมื่อ x_{ij} คือ ค่า reactance ของสายส่งจากบัส $i-j$.

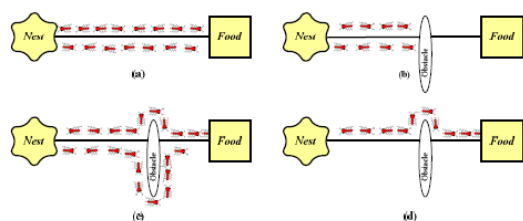
3. วิธีพหุติกรรมฝูงมด (Ant Colony Optimization: ACO)

Marco Dorigo et.al [6] ได้สรุปแนวคิดและขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีพหุติกรรมฝูงมด ซึ่งวิธีการนี้อาศัยพื้นฐานการเลียนแบบพฤติกรรมของมดจริง โดยพฤติกรรมของมดจริงสามารถหาเส้นทางที่สั้นที่สุดได้ทั้งๆ ที่มองไม่เห็นเส้นทาง โดยธรรมชาติแล้วเมื่อมดจริงเดินทางออกจากรังมด (nest) เพื่อไปหาอาหารตามแหล่งอาหาร (food source) ในขณะที่มดเดินทางไปหาอาหาร มดจะปล่อยสารเคมีชีวภาพที่เรียกว่า สารฟีโรโมน (pheromone) ไว้บนพื้น เพื่อเป็นร่องรอยการเดินทางกลับรัง อีกทั้งยังเป็นการสื่อสารกับมดตัวอื่นๆ

เมื่อนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้กับการหาค่าที่เหมาะสม จะกระจายการค้นหาคำตอบผ่านตัวกระทำที่เรียกว่า “มด (ants)” หรือ “ตัวแทน (agent)” ที่มีความสามารถพิเศษ ในการเดินทางของมดฝูงแรก ที่เริ่มออกจากรังจะเดินแบบสุ่ม (Random) ส่วนมดในฝูงต่อมาจะเดินทางตามเส้นทางโดยจะพิจารณาเส้นทางจากข้อมูลความหนาแน่นของฟีโรโมนที่มดฝูงก่อนหน้าปล่อยทิ้งเอาไว้ ซึ่งในปัจจุบันวิธีพหุติกรรมฝูงมดเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง และได้ทำการพิสูจน์แล้วในการแก้ปัญหาต่างๆ เช่น ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem: TSP) และปัญหาการกำหนดสมการกำลังสอง (quadratic assignment problem: QAP) เป็นต้น

พิจารณาตัวอย่างของการทำงานที่แสดงให้เห็นดังรูปที่ 1 จากรูปแสดงเส้นทางการเดินทางของมด (จากตัวอย่างเป็นการเดินทางไปกลับระหว่างรังกับแหล่งอาหาร) ดังแสดงในรูปที่ 1 (a) ทันใดนั้น เมื่อ

มีสิ่งกีดขวาง (Obstacle) มาปิดกั้นเส้นทางเดิม ดังนั้น มดที่กำลังเดินทางจากรังจะไปแหล่งอาหาร (หรือมดที่กำลังเดินทางจากแหล่งอาหารจะไปรัง) ต้องตัดสินใจว่าจะเดินทางไปทางด้านซ้ายหรือขวา ดังแสดงในรูปที่ 1 (b) เส้นทางที่มดตัดสินใจเลือกเดินทางนั้นจะมีอิทธิพลมาจากความหนาแน่นของจำนวนสารฟีโรโมนที่มดตัวก่อนหน้านี้อปล่อยเอาไว้เป็นตัวชี้แนะ เนื่องจากไม่มีสารฟีโรโมนถูกวางไว้ก่อนหน้านี้นี้ทั้งสองทิศทาง มดจึงตัดสินใจเดินทางไปทั้งสองทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (c) จากรูปจะเห็นว่าเส้นทางด้านบนจะสั้นกว่าเส้นทางด้านล่าง มดตัวแรกที่เดินทางตามเส้นทางด้านบนจะเดินทางข้ามสิ่งกีดขวางได้ก่อนมดตัวแรกที่เดินทางตามเส้นทางด้านล่าง ทำให้มดตัวต่อมาจะหาเส้นทางตามเส้นทางที่มีความหนาแน่นของฟีโรโมนบนเส้นทางด้านบน เป็นเหตุให้มดส่วนใหญ่ตัดสินใจเลือกเดินทางตามเส้นทางด้านบน เนื่องจากมีความหนาแน่นของปริมาณฟีโรโมนมากกว่า และเป็นเส้นทางที่สั้นกว่าด้วย ทำให้มดมีแนวโน้มที่จะเลือกเดินทางตามเส้นทางที่มีระยะทางสั้นกว่าอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (d)



รูปที่ 1 การหาหนทางที่สั้นที่สุดของฝูงมดจริง

4. การประยุกต์ใช้วิธีฝูงมดสำหรับการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Implementation of ACO for STEP)

สำหรับการประยุกต์ใช้วิธีฝูงมดในการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ต้นทุนในการลงทุนสายส่งเส้นใหม่มีค่าที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะอาศัยเครือข่ายของระบบไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบกราฟ $G(n,b)$ เมื่อ n คือ บัสของระบบไฟฟ้า และ b คือ จำนวนวงจรที่ต่อระหว่างบัส $i-j$ ซึ่งมดจะใช้สารฟีโรโมนเป็นตัวกลางในการติดต่อสื่อสารข้อมูลกันทำให้เส้นทางที่สั้นที่สุดมีสารฟีโรโมนมากกว่าเส้นทางอื่นๆ โดยมดแต่ละตัวในฝูงจะสุ่มเลือก (Random) เส้นทางเดินเพื่อสร้างคำตอบที่เป็นไปได้ และทำการเดินซ้ำๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด โดยหลักการเลือกเส้นทางของมดในแต่ละรอบเรียกว่า กฎการเปลี่ยนสถานะ (State transition rule) และหลักเกณฑ์การปรับปรุงความหนาแน่นของฟีโรโมน เรียกว่า กฎการปรับปรุงทั่วไป (global updating rule) มดจะใช้หลักการทั้งสองอย่างในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแก้ไขปัญหการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า ส่วน Flow chart ของวิธีฝูงมดสำหรับแก้ไขปัญหแสดงในรูปที่ 2

4.1 หลักการของระเบียบวิธีฝูงมด

(ก) กฎการเปลี่ยนสถานะ (State transition rule)

สำหรับวิธีฝูงมดหรือระบบมดเทียม มดเทียม (m) จะสร้างคำตอบที่เป็นไปได้ โดยเริ่มแรกจะทำการสุ่มเลือกเส้นทาง เริ่มต้นมาก่อน และจะเลือกเส้นทางถัดไปในแต่ละครั้งจะใช้สมการที่ (14)

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{m=1}^m [\tau_{im}(t)]^\alpha [\eta_{im}(t)]^\beta} \quad (14)$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{C_{ij}} \quad (15)$$

โดยที่ $p_{ij}^k(t)$ คือ ความเป็นไปได้ในการเลือกเส้นทางของมดตัวที่ k จากบัส $i-j$, τ_{ij} คือ ความหนาแน่นของฟีโรโมนระหว่างบัส $i-j$, η_{ij} คือ ข้อมูลอิทธิพลระหว่างบัส $i-j$, C_{ij} คือ ต้นทุนของสายส่งเส้นใหม่ระหว่างบัส $i-j$, α คือ ค่าคงที่ที่ใช้สำหรับถ่วงน้ำหนัก (weight) ให้กับปริมาณฟีโรโมน, β คือ ค่าคงที่ใช้อถ่วงน้ำหนักของข้อมูลอิทธิพล

(ข) กฎการปรับปรุงทั่วไป (Global updating rule)

ขบวนการค้นหาของวิธีฝูงมดไม่สามารถรับประกันได้ว่าคำตอบที่ได้จะเป็นไปตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์และตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดได้หรือไม่ จึงได้มีการปรับปรุงค่าฟีโรโมน (τ) คือถ้าคำตอบที่ได้ในรอบถัดไปเป็นคำตอบที่ดีขึ้นจะให้ค่าฟีโรโมนมาก แต่ถ้าคำตอบที่ได้ในรอบถัดไปเป็นคำตอบที่ไม่ดีขึ้นจะมีค่าฟีโรโมนน้อย ซึ่งถ้าได้คำตอบในรอบถัดไปไม่ดีขึ้นก็มีเงื่อนไขในการปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นสามารถปรับปรุงความหนาแน่นฟีโรโมนได้จากสมการที่ (16)

$$\tau_{ij}(t) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t-1) + \Delta\tau_{ij} \quad (16)$$

และ $\Delta\tau_{ij}$ หาได้จากสมการที่ (17), $\Delta\tau_{ij}^k$ หาได้จากสมการที่ (18)

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (17)$$

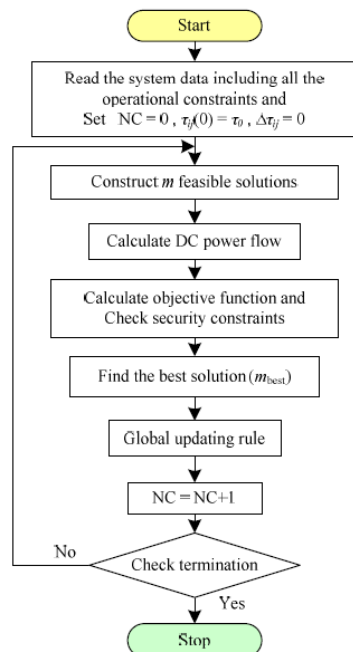
$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } k^{\text{th}} \text{ ant chooses path} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

เมื่อ $\tau_{ij}(t)$ คือ ร่องรอยของฟีโรโมนในรอบที่ t , $\Delta\tau_{ij}^k$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟีโรโมนของมดตัวที่ k จากบัส $i-j$, m คือ จำนวนมดที่ใช้ในการค้นหา, ρ คือ สัมประสิทธิ์ของฟีโรโมน โดยที่การระเหยของฟีโรโมน มีค่าเท่ากับ $(1-\rho)$

5. ผลการทดสอบ

วิธีการที่นำเสนอทำการทดสอบกับระบบกำลังไฟฟ้า 6 บัสของ Garver's สำหรับข้อมูลของระบบทดสอบแสดงใน [2] เส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ 15 เส้นทาง มีความต้องการไฟฟ้ารวมทั้งหมดเท่ากับ 760 MW และพิกัดจำนวนวงจรของสายส่งเส้นใหม่เท่ากับ 4 วงจร บทความนี้ไม่พิจารณาการจัดสรรกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้า ผลการทดสอบวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับ GA แสดงในตารางที่ 1 และ 2

โดยมีต้นทุนรวมทั้งหมดเท่ากับ 200×10^3 US\$ และคำตอบที่เหมาะสมที่สุด คือ $n_{3-5} = 1$, $n_{2-6} = 4$ และ $n_{4-6} = 2$ และเมื่อพิจารณาความมั่นคงของระบบ (N-1) จะมีต้นทุนรวมทั้งหมดเท่ากับ 298×10^3 US\$ และคำตอบที่เหมาะสมที่สุดคือ $n_{2-6} = 4$, $n_{3-5} = 2$, $n_{3-6} = 1$, $n_{4-6} = 3$ ส่วนรูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของคำตอบที่กระทำซ้ำกัน 30 ครั้ง ของวิธี ACO และ GA.



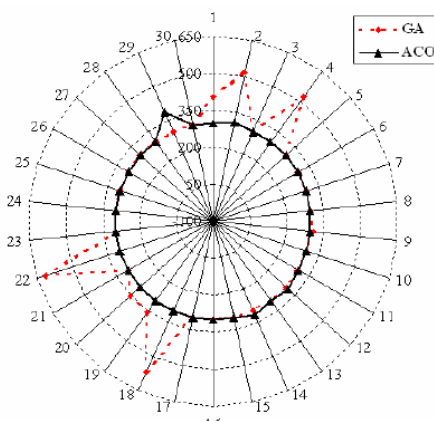
รูปที่ 2 ระเบียบขั้นตอนของวิธีการฝูงมดสำหรับแก้ปัญหาวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบวิธีการที่นำเสนอเทียบกับ GA ไม่พิจารณาความมั่นคง

Results of static TEP	Method	
	ACO	GA
Best cost ($\times 10^3$ US\$)	200	200
Average cost ($\times 10^3$ US\$)	200	227
Worst cost ($\times 10^3$ US\$)	200	368
Standard deviation	0	57
Average CPU Time (sec)	17	46
Line addition for the best result	$n_{2-6} = 4, n_{3-5} = 1, n_{4-6} = 2$	

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบวิธีการที่นำเสนอเทียบกับ GA พิจารณาความมั่นคง

Results of static TEP	Method	
	ACO	GA
Best cost ($\times 10^3$ US\$)	298	298
Average cost ($\times 10^3$ US\$)	302	340
Worst cost ($\times 10^3$ US\$)	385	615
Standard deviation	16	90
Average CPU Time (sec)	79	132
Line addition for the best result	$n_{2-6} = 4, n_{3-5} = 2, n_{3-6} = 1, n_{4-6} = 3$	



รูปที่ 3 การกระจายของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เมื่อทำซ้ำ 30 ครั้ง

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการแก้ไขปัญหาวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมดโดยพิจารณาความมั่นคงของระบบ (N-1) ซึ่งมีมูลค่าการลงทุนรวมเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยเปรียบเทียบกับวิธีการเชิงพันธุกรรม พบว่าการแก้ปัญหาคด้วยวิธีการที่นำเสนอมีสมรรถนะดีกว่า ทั้งในด้านความถูกต้องของคำตอบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการหาค่าตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์อีกด้วยวิธีฝูงมดยังง่ายต่อการนำไปใช้และมีประสิทธิภาพอีกวิธีหนึ่ง

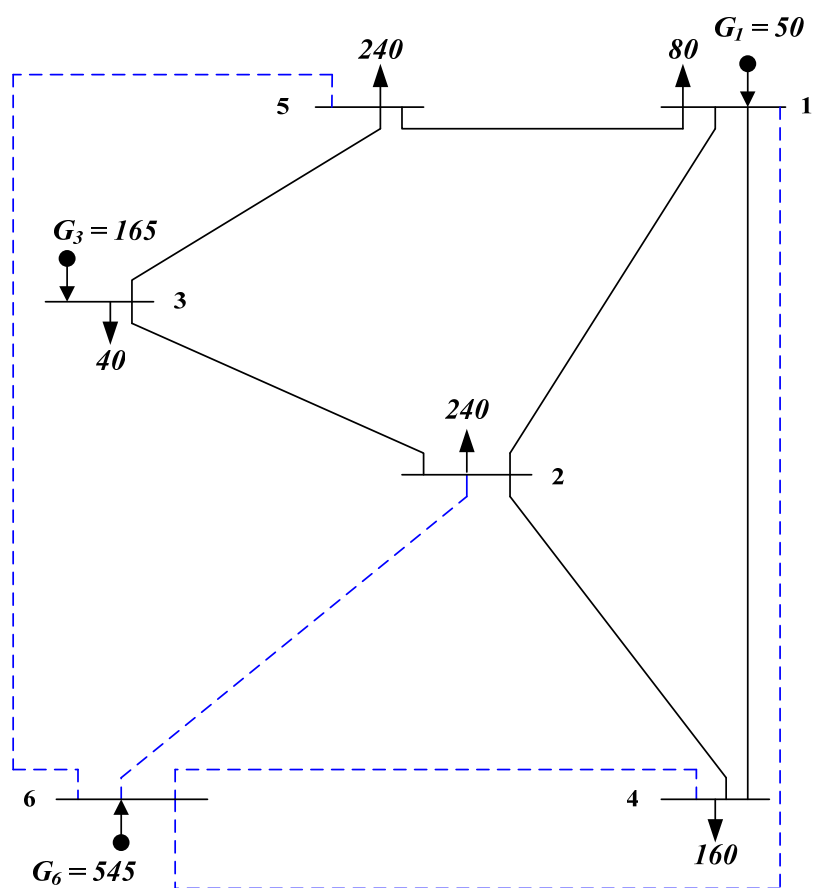
เอกสารอ้างอิง

- [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," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib.*, vol. 150, pp. 521-526, Sept. 2003.
- [2] L. L. Garver, "Transmission network estimation using linear programming," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-89, pp. 1688-1697, Sept.-Oct. 1970.
- [3] R. Romero, R. A. Gallego, and A. Monticelli, "Transmission system expansion planning by simulated annealing," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, pp. 364-369, Feb 1996.
- [4] R. A. Gallego, A. Monticelli, and R. Romero, "Transmission system expansion planning by an extended genetic algorithm," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib.*, vol. 145, pp. 329-335, May 1998.
- [5] R. A. Gallego, R. Romero, and A. J. Monticelli, "Tabu search algorithm for network synthesis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, pp. 490-495, May 2000.
- [6] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colomi, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE Trans. Syst., Man and Cybernetics, Part B*, vol. 26, pp. 29-41, Feb. 1996.

ภาคผนวก ข

ข้อมูลของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง

ข.1 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส



ภาพที่ ข.1 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส

ตารางที่ ข.1

แสดงข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส

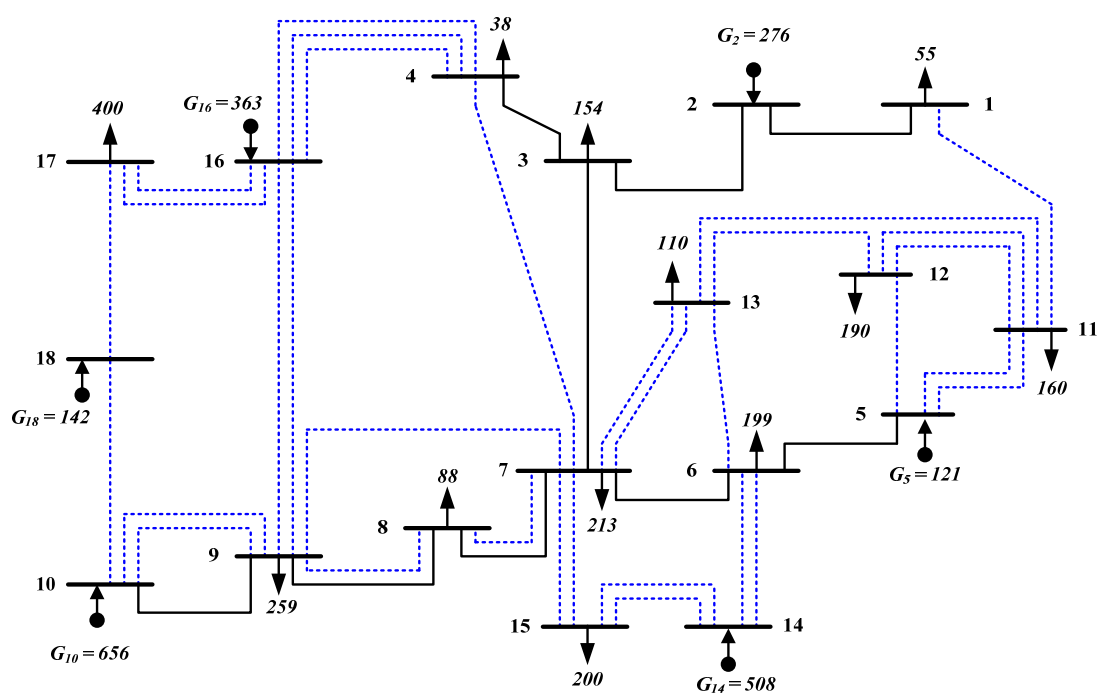
Bus	Generation (MW)		Demand (MW)
	Max.	Level	
1	150	50	80
2	-	-	240
3	360	165	40
4	-	-	160
5	-	-	240
6	600	545	-
Total	1,110	760	760

ตารางที่ ข.2

แสดงข้อมูลระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส

Line No.	From-To	n_{ij}^0	$n_{ij}^{\max}$	r_{ij} (p.u)	x_{ij} (p.u)	$f_{ij}^{\max}$ (MW)	Investment Cost (10^3 US\$)
1	1-2	1	4	0.10	0.40	100	40
2	1-3	0	4	0.09	0.38	100	38
3	1-4	1	4	0.15	0.60	80	60
4	1-5	1	4	0.05	0.20	100	20
5	1-6	0	4	0.17	0.68	70	68
6	2-3	1	4	0.05	0.20	100	20
7	2-4	1	4	0.10	0.40	100	40
8	2-5	0	4	0.08	0.31	100	31
9	2-6	0	4	0.01875	0.30	100	30
10	3-4	0	4	0.15	0.59	82	59
11	3-5	1	4	0.25	0.20	100	20
12	3-6	0	4	0.12	0.48	100	48
13	4-5	0	4	0.16	0.63	75	63
14	4-6	0	4	0.0375	0.30	100	30
15	5-6	0	4	0.15	0.61	78	61

ข.2 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 18 บัสทางตะวันตกของประเทศไทย



ภาพที่ ข.2 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 18 บัส

ตารางที่ ๑.3

แสดงข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 18 บัส

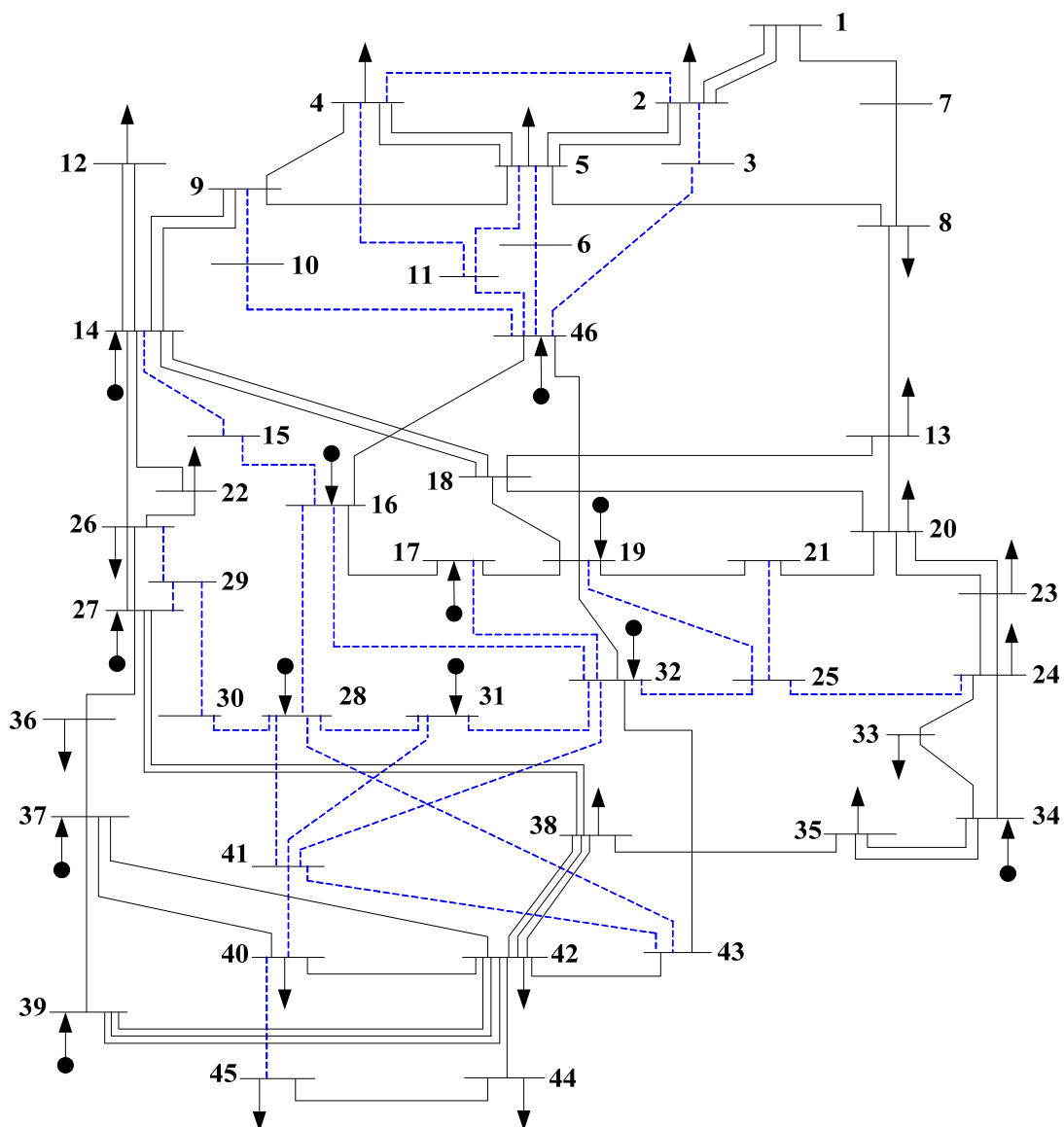
Bus	Generation (MW)		Demand (MW)	Bus	Generation (MW)		Demand (MW)
	Max.	Level			Max.	Level	
1	0	0	55	10	750	656	0
2	360	276	0	11	540	0	160
3	0	0	154	12	0	0	190
4	0	0	38	13	0	0	110
5	760	121	0	14	540	508	0
6	0	0	199	15	0	0	200
7	0	0	213	16	495	363	0
8	0	0	88	17	0	0	400
9	0	0	259	18	142	142	0
Total					3587	2066	2066

ตารางที่ ๑.4
แสดงข้อมูลระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 18 บัส

Line No.	From-To	n_{ij}^0	$n_{ij}^{\max}$	r_{ij} (p.u)	x_{ij} (p.u)	$f_{ij}^{\max}$ (MW)	Investment Cost (10^3 US\$)
1	1-2	1	4	0.001	0.0176	230	1750
2	1-11	0	4	0.001	0.0102	230	1000
3	2-3	1	4	0.001	0.0384	230	3450
4	3-4	1	4	0.001	0.0404	230	3875
5	3-7	1	4	0.001	0.0325	230	3225
6	4-7	0	4	0.001	0.0501	230	5000
7	4-16	0	4	0.001	0.0501	230	5000
8	5-6	1	4	0.001	0.0267	230	2650
9	5-11	0	4	0.001	0.0153	230	1500
10	5-12	0	4	0.001	0.0102	230	1000
11	6-7	1	4	0.001	0.0126	230	1250
12	6-13	0	4	0.001	0.0126	230	1250
13	6-14	0	4	0.001	0.0554	230	5500
14	7-8	1	4	0.001	0.0151	230	1500
15	7-9	0	4	0.001	0.0318	230	3150
16	7-13	0	4	0.001	0.0126	230	1250
17	7-15	0	4	0.001	0.0448	230	4450
18	8-9	1	4	0.001	0.0102	230	1000
19	9-10	1	4	0.001	0.0501	230	5000
20	9-16	0	4	0.001	0.0501	230	5000
21	10-18	0	4	0.001	0.0255	230	2500
22	11-12	0	4	0.001	0.0126	230	1250
23	11-13	0	4	0.001	0.0255	230	2500
24	12-13	0	4	0.001	0.0153	230	1500
25	14-15	0	4	0.001	0.0428	230	4250
26	16-17	0	4	0.001	0.0153	230	1500
27	17-18	0	4	0.001	0.0140	230	1375

*กำหนดให้ต้นทุนของสายส่งแต่ละเส้นเท่า 25,000 \$US ต่อ 1 km.

ข.2 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัสทางตอนใต้ของประเทศบราซิล



ภาพที่ ข.2 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส

ตารางที่ ๑.5

แสดงข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส

Bus	Generation (MW)		Demand (MW)	Bus	Generation (MW)		Demand (MW)
	Max.	Level			Max.	Level	
1	0.00	0.00	0.00	24	0.00	0.00	478.20
2	0.00	0.00	443.10	25	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	26	0.00	0.00	231.90
4	0.00	0.00	300.70	27	220.00	54.00	0.00
5	0.00	0.00	238.00	28	800.00	730.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	29	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	30	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	72.20	31	700.00	310.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	32	500.00	450.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	33	0.00	0.00	229.10
11	0.00	0.00	0.00	34	748.00	221.00	0.00
12	0.00	0.00	511.90	35	0.00	0.00	216.00
13	0.00	0.00	185.80	36	0.00	0.00	90.10
14	1257.00	944.00	0.00	37	300.00	212.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	38	0.00	0.00	216.00
16	2000.00	1366.00	0.00	39	600.00	221.00	0.00
17	1050.00	1000.00	0.00	40	0.00	0.00	262.10
18	0.00	0.00	0.00	41	0.00	0.00	0.00
19	1670.00	773.00	0.00	42	0.00	0.00	1607.90
20	0.00	0.00	1091.20	43	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00	44	0.00	0.00	79.10
22	0.00	0.00	81.90	45	0.00	0.00	86.70
23	0.00	0.00	458.10	46	700.00	599.00	0.00
Total				5977.00	4083.00	3382.90	

ตารางที่ ๑.6
แสดงข้อมูลระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส

Line No.	From-To	n_{ij}^0	$n_{ij}^{\max}$	r_{ij} (p.u)	x_{ij} (p.u)	$f_{ij}^{\max}$ (MW)	Investment Cost (10^3 US\$)
1	1-2	2	4	0.03882	0.1065	270	7076
2	1-7	1	4	0.02245	0.0616	270	4349
3	2-3	0	4	0.00455	0.0125	600	8178
4	2-4	0	4	0.03214	0.0882	270	5965
5	2-5	2	4	0.01181	0.0324	270	2581
6	3-46	0	4	0.00739	0.0203	1800	24319
7	4-5	2	4	0.02063	0.0566	270	4046
8	4-9	1	4	0.03368	0.0924	270	6217
9	4-11	0	4	0.08186	0.2246	240	14247
10	5-6	0	4	0.00455	0.0125	600	8178
11	5-8	1	4	0.04126	0.1132	270	7480
12	5-9	1	4	0.04275	0.1173	270	7732
13	5-11	0	4	0.03335	0.0915	270	6167
14	6-46	0	4	0.00466	0.0128	2000	16005
15	7-8	1	4	0.03728	0.1023	270	6823
16	8-13	1	4	0.04913	0.1348	240	8793
17	9-10	0	4	0.00455	0.0125	600	8178
18	9-14	2	4	0.064	0.1756	220	11267
19	10-46	0	4	0.00295	0.0081	2000	10889
20	11-46	0	4	0.00455	0.0125	600	8178
21	12-14	2	4	0.02697	0.074	270	5106
22	13-18	1	4	0.06579	0.1805	220	11570
23	13-20	1	4	0.03911	0.1073	270	7126
24	14-15	0	4	0.01363	0.0374	270	2884

ตารางที่ ๗.6 (ต่อ)
แสดงข้อมูลระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส

Line No.	From-To	n_{ij}^0	$n_{ij}^{\max}$	r_{ij} (p.u)	x_{ij} (p.u)	$f_{ij}^{\max}$ (MW)	Investment Cost (10^3 US\$)
25	14-18	2	4	0.05518	0.1514	240	9803
26	14-22	1	4	0.03061	0.0840	270	5712
27	14-26	1	4	0.05883	0.1614	220	10409
28	15-16	0	4	0.00455	0.0125	600	8178
29	16-17	1	4	0.00284	0.0078	2000	10505
30	16-28	0	4	0.00809	0.0222	1800	26365
31	16-32	0	4	0.01133	0.0311	1400	36213
32	16-46	1	4	0.00739	0.0203	1800	24319
33	17-19	1	4	0.00222	0.0061	2000	8715
34	17-32	0	4	0.00845	0.0232	1700	27516
35	18-19	1	4	0.00455	0.0125	600	8178
36	18-20	1	4	0.07279	0.1997	200	12732
37	19-21	1	4	0.01013	0.0278	1500	32632
38	19-25	0	4	0.01184	0.0325	1400	37748
39	19-32	1	4	0.0071	0.0195	1800	23423
40	19-46	1	4	0.008	0.0222	1800	26365
41	20-21	1	4	0.00455	0.0125	600	8178
42	20-23	2	4	0.03397	0.0932	270	6268
43	21-25	0	4	0.00634	0.0174	2000	21121
44	22-26	1	4	0.02879	0.0790	270	5409
45	23-24	2	4	0.02821	0.0774	270	5308
46	24-25	0	4	0.00455	0.0125	600	8178
47	24-33	1	4	0.05278	0.1448	240	9399
48	24-34	1	4	0.06003	0.1647	220	10611

ตารางที่ ๗.6 (ต่อ)
แสดงข้อมูลระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส

Line No.	From-To	n_{ij}^0	$n_{ij}^{\max}$	r_{ij} (p.u)	x_{ij} (p.u)	$f_{ij}^{\max}$ (MW)	Investment Cost (10 ³ US\$)
49	25-32	0	4	0.01162	0.0319	1400	37109
50	26-27	2	4	0.03032	0.0832	270	5662
51	26-29	0	4	0.01971	0.0541	270	3894
52	27-29	0	4	0.03637	0.0998	270	6672
53	27-36	1	4	0.03335	0.0915	270	6167
54	27-38	2	4	0.07581	0.2080	200	13237
55	28-30	0	4	0.00211	0.0058	2000	8331
56	28-31	0	4	0.00193	0.0053	2000	7819
57	28-41	0	4	0.01235	0.0339	1300	39283
58	28-43	0	4	0.01479	0.0406	1200	46701
59	29-30	0	4	0.00455	0.0125	600	8178
60	31-32	0	4	0.00167	0.0046	2000	7052
61	31-41	0	4	0.01013	0.0278	1500	32632
62	32-41	0	4	0.01126	0.0309	1400	7052
63	32-43	1	4	0.01126	0.0309	1400	35957
64	33-34	1	4	0.04611	0.1265	270	8288
65	34-35	2	4	0.01789	0.0491	270	3591
66	35-38	1	4	0.07217	0.1980	200	12631
67	36-37	1	4	0.03852	0.1057	270	7025
68	37-39	1	4	0.01031	0.0283	270	2329
69	37-40	1	4	0.04669	0.1281	270	8389
70	37-42	1	4	0.07672	0.2105	200	13388
71	38-42	3	4	0.03306	0.0907	270	6116
72	39-42	3	4	0.07399	0.2030	200	12934

ตารางที่ ๗.6 (ต่อ)
แสดงข้อมูลระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส

Line No.	From-To	n_{ij}^0	$n_{ij}^{\max}$	r_{ij} (p.u)	x_{ij} (p.u)	$f_{ij}^{\max}$ (MW)	Investment Cost (10 ³ US\$)
73	40-41	0	4	0.00455	0.0125	600	8178
74	40-42	1	4	0.03397	0.0932	270	6268
75	40-45	0	4	0.08037	0.2205	180	13994
76	41-43	0	4	0.00506	0.0139	2000	17284
77	42-43	1	4	0.00455	0.0125	600	8178
78	42-44	1	4	0.04395	0.1206	270	7934
79	44-45	1	4	0.06794	0.1864	200	11924

ภาคผนวก ค

แสดงผลการทดสอบของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีผู้มด

ค.1 แสดงผลการทดสอบของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส เมื่อกระทำครบ 30 ครั้ง

Trial	1	2	3	4	5	6	7
C_T	200	200	200	200	200	200	200
Time (sec.)	10.547	7.031	7.734	10.000	5.859	7.125	3.719
Trial	8	9	10	11	12	13	14
C_T	200	200	200	200	200	200	200
Time (sec.)	10.031	5.547	6.688	9.875	8.047	6.953	6.594
Trial	15	16	17	18	19	20	21
C_T	200	200	200	200	200	200	200
Time (sec.)	6.656	13.000	7.141	6.984	6.641	9.094	7.406
Trial	22	23	24	25	26	27	28
C_T	200	200	200	200	200	200	200
Time (sec.)	7.844	8.953	9.234	4.469	9.797	7.188	3.938
Trial	29	30					
C_T	200	200					
Time (sec.)	8.031	8.859					

Best Cost ($C_T^{\min}$) = 200 10^3 US\$

Worst Cost (C_T^{worst}) = 200 10^3 US\$

Average Cost (C_T^{avg}) = 200 10^3 US\$

Standard Deviation (SD) = $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{T_i} - C_{T_{\text{avg}}})^2}$ = $\sqrt{\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} (C_{T_i} - C_{T_{\text{avg}}})^2}$ = 0 10^3 US\$

Average Computational Time (t_{avg}) = $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$ = $\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} t_i$ = 7.699

Percentage of Getting the Near Optimum Cost = $\frac{\text{NOC}}{N} \times 100$ = $\frac{30}{30} \times 100$ = 100 %

ค.2 แสดงผลการทดสอบของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 18 บัส เมื่อกระทำครบ 30 ครั้ง

Trial	1	2	3	4	5	6	7
C_T	40,375	40,375	40,375	40,375	40,375	40,375	40,375
Time (sec.)	73.141	50.578	64.109	72.594	50.516	68.516	90.438
Trial	8	9	10	11	12	13	14
C_T	40,375	40,375	40,375	40,375	40,375	40,375	40,375
Time (sec.)	49.906	47.063	42.875	65.922	50.422	37.203	46.234
Trial	15	16	17	18	19	20	21
C_T	40,375	41,375	40,375	40,375	41,375	40,375	40,375
Time (sec.)	39.328	180.422	47.375	92.688	183.203	39.188	49.266
Trial	22	23	24	25	26	27	28
C_T	43,875	40,375	40,375	40,375	40,375	40,375	40,375
Time (sec.)	184.547	50.953	48.500	60.031	39.266	140.500	59.984
Trial	29	30					
C_T	40,375	43,575					
Time (sec.)	59.969	180.125					

Best Cost ($C_T^{\min}$) = 40,375 10^3 US\$

Worst Cost (C_T^{worst}) = 43,875 10^3 US\$

Average Cost (C_T^{avg}) = 40,665 10^3 US\$

$$\begin{aligned} \text{Standard Deviation (SD)} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{T_i} - C_{T_{\text{avg}}})^2} = \sqrt{\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} (C_{T_i} - C_{T_{\text{avg}}})^2} \\ &= 870.335 \cdot 10^3 \text{ US\$} \end{aligned}$$

$$\text{Average Computational Time } (t_{\text{avg}}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} t_i = 75.495$$

$$\text{Percentage of Getting the Near Optimum Cost} = \frac{\text{NOC}}{N} \times 100 = \frac{26}{30} \times 100 = 86.667 \%$$

ค.3 แสดงผลการทดสอบของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส เมื่อกระทำครบ 30 ครั้ง

Trial	1	2	3	4	5	6	7
C_T	154,420	154,420	154,420	154,420	193,890	154,420	154,420
Time (sec.)	218.930	173.591	173.222	292.575	300.000	106.492	156.000
Trial	8	9	10	11	12	13	14
C_T	154,420	154,420	154,420	154,420	154,420	197,854	154,420
Time (sec.)	245.207	171.100	230.571	105.974	240.000	300.000	256.252
Trial	15	16	17	18	19	20	21
C_T	154,420	154,420	154,420	154,420	173,174	154,420	154,420
Time (sec.)	183.865	237.927	251.636	105.565	300.000	211.988	144.000
Trial	22	23	24	25	26	27	28
C_T	154,420	154,420	154,420	154,420	154,420	154,420	154,420
Time (sec.)	297.592	171.044	120.000	286.654	142.390	264.530	196.141
Trial	29	30					
C_T	200560	154,420					
Time (sec.)	300.000	204.097					

Best Cost ($C_T^{\min}$) = 154,420 10^3 US\$

Worst Cost (C_T^{worst}) = 200,560 10^3 US\$

Average Cost (C_T^{avg}) = 159,346.600 10^3 US\$

$$\begin{aligned} \text{Standard Deviation (SD)} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{T_i} - C_{T_{\text{avg}}})^2} = \sqrt{\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} (C_{T_i} - C_{T_{\text{avg}}})^2} \\ &= 13,386.643 \text{ } 10^3 \text{ US\$} \end{aligned}$$

$$\text{Average Computational Time } (t_{\text{avg}}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} t_i = 212.911 \text{ sec.}$$

$$\text{Percentage of Getting the Near Optimum Cost} = \frac{NOC}{N} \times 100 = \frac{26}{30} \times 100 = 86.667 \%$$