

บทที่ 4

กรณีศึกษาและผลการทดสอบ

ในบทนี้จะเป็นการทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพของวิธีฝูงมด โดยได้ดำเนินการทดสอบกับฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์และระบบทดสอบกำลังไฟฟ้า 6 บัส 18 บัสและ 46 บัส ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่ ตามลำดับ เพื่อให้แน่ใจว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถใช้งานได้จริงและสามารถแก้ไขปัญหาได้หลากหลายรูปแบบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดสอบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิม การประมวลผลการทำงานของระบบทดสอบแต่ละระบบใช้โปรแกรม MatLab[®] Version 2008b และเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา Intel Core 2 Duo 1.73 GHz, หน่วยความจำ Ram ขนาด 1.50 GB

4.1 การทดสอบประสิทธิภาพด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์

หลักการทั่วไปของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ การแก้ไขปัญหาของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าฟังก์ชันสูงสุดหรือค่าฟังก์ชันต่ำที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งในส่วนนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการหาค่าเหมาะสมที่สุดของวิธีฝูงมดด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีรูปแบบที่หลากหลาย โดยเป้าหมายในการทดสอบคือ การหาค่าฟังก์ชันที่ต่ำสุดหรือสูงสุดของฟังก์ชันที่นำมาทดสอบ ซึ่งลักษณะของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าต่ำที่สุดแสดงดังตารางที่ 4.1 [41]

ตารางที่ 4.1

แสดงค่าฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ทดสอบ

Function Name	Expression	Ranges	Solution
1.ชวอบส์เฟอร์ (Schaffer)	$f_1(x) = 0.5 + \frac{\sin^2(\sqrt{x_1^2 + x_2^2}) - 0.5}{(1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2))^2}$	$-10 \leq x_i \leq 10$	$f_1(0) = 0$

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)
แสดงค่าฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ทดสอบ

Function Name	Expression	Ranges	Solution
2. สเฟียส์ (Sphere)	$f_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$-100 \leq x_i \leq 100$	$f_2(0) = 0$
3. โรเซินบรอกค (Rosenbrock)	$f_3(x) = \sum_{i=1}^{n-1} 100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2$	$-2.048 \leq x_i \leq 2.048$	$f_3(0) = 0$
4. กรีแวงค (Griewank)	$f_4(x) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	$-600 \leq x_i \leq 600$	$f_4(0) = 0$
5. ราสตรินจิ้นส์ (Rastrigin)	$f_5(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)$	$-5.12 \leq x_i \leq 5.12$	$f_5(0) = 0$

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.

จากตารางที่ 4.1 สามารถเขียนอธิบายฟังก์ชันต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันที่ 1 (f_1) คือฟังก์ชันซอโบลอฟเฟอร์ ในฟังก์ชันนี้มีตัวแปร (x_i) มีค่าขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดอยู่ระหว่าง $[-10,10]$ สำหรับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วบริเวณ (Global Optimum) ของฟังก์ชันเท่ากับศูนย์และค่าตัวแปรแต่ละตัวสามารถหาคำตอบได้มีค่าเท่ากับ $x = (x_1, x_2) = 0,0$ สำหรับลักษณะของพื้นผิวตอบสนองและระดับเส้นของฟังก์ชันแสดงดังภาพที่ 4.1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

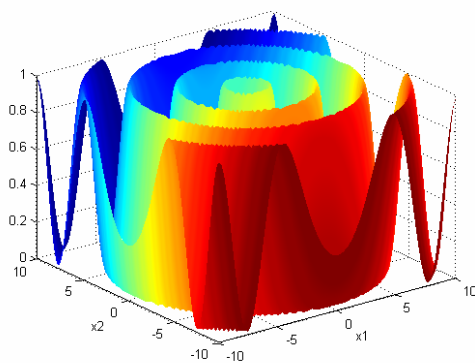
ฟังก์ชันที่ 2 (f_2) คือฟังก์ชันสเฟียส์ ซึ่งฟังก์ชันนี้เป็นตัวแปรแบบต่อเนื่อง (Continuous Variable) โดยให้ตัวแปร (x_i) มีค่าขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดอยู่ระหว่าง $[-100,100]$ สำหรับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วบริเวณของฟังก์ชันนี้มีค่าเท่ากับศูนย์และค่าตัวแปรที่สามารถหาค่าได้เท่ากับ $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 0,0,0,0,0$ สำหรับลักษณะของพื้นผิวตอบสนองและระดับเส้นของฟังก์ชันแสดงดังภาพที่ 4.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ฟังก์ชันที่ 3 (f_3) คือฟังก์ชันโรเซินบรอกค ฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันดั้งเดิมสำหรับแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยฟังก์ชันนี้เป็นตัวแปรแบบต่อเนื่อง โดยให้ตัวแปร (x_i) มีค่าขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดอยู่ระหว่าง $[-2.048,2.048]$ สำหรับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วบริเวณของ

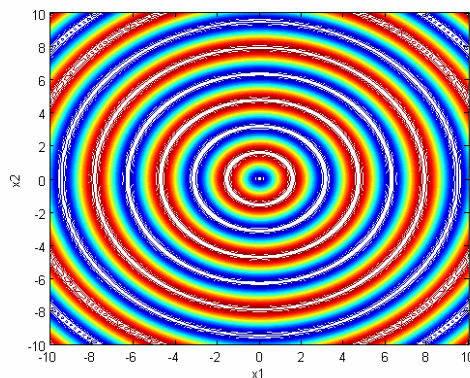
ฟังก์ชันนี้มีค่าเท่ากับศูนย์และค่าตัวแปรที่สามารถหาค่าได้เท่ากับ $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 1, 1, 1, 1, 1$ สำหรับลักษณะของพื้นผิวตอบสนองและระดับเส้นของฟังก์ชันแสดงดังภาพที่ 4.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ฟังก์ชันที่ 4 (f_4) คือฟังก์ชันกริแวงค์ สำหรับฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันที่มีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้นและเป็นฟังก์ชันแบบต่อเนื่องหลายรูปแบบ (Multi-Modal) เข้าด้วยกัน โดยให้ตัวแปร (x_i) มีค่าขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดอยู่ระหว่าง $[-600, 600]$ สำหรับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วบริเวณของฟังก์ชันนี้มีค่าเท่ากับศูนย์และค่าตัวแปรที่สามารถหาค่าได้เท่ากับศูนย์และค่าตัวแปรที่สามารถหาค่าได้เท่ากับ $x = (x_1, x_2, \dots, x_{10}) = 100, 100, \dots, 100$ สำหรับลักษณะของพื้นผิวตอบสนองและระดับเส้นของฟังก์ชันแสดงดังภาพที่ 4.4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ฟังก์ชันที่ 5 (f_5) คือฟังก์ชันราสทริจินส์ สำหรับฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันที่ค่อนข้างหาคำตอบได้ยุ่งยากที่สุดเนื่องจากคำตอบเฉพาะถิ่น (Local Optimum) ค่อนข้างมาก โดยให้ตัวแปร (x_i) มีค่าขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดอยู่ระหว่าง $[-5.12, 5.12]$ สำหรับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วบริเวณของฟังก์ชันนี้มีค่าเท่ากับศูนย์และค่าตัวแปรที่สามารถหาค่าได้เท่ากับศูนย์และค่าตัวแปรที่สามารถหาค่าได้เท่ากับ $x = (x_1, x_2, \dots, x_{10}) = 0, 0, \dots, 0$ สำหรับลักษณะของพื้นผิวตอบสนองและระดับเส้นของฟังก์ชันแสดงดังภาพที่ 4.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



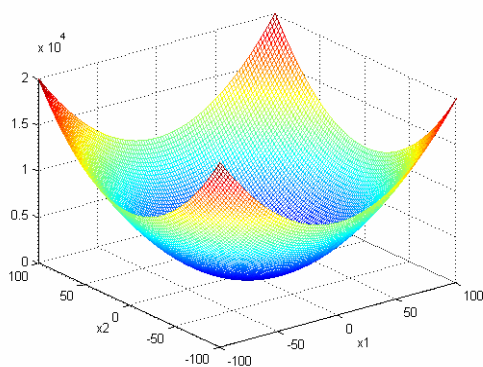
(ก) Surface plot



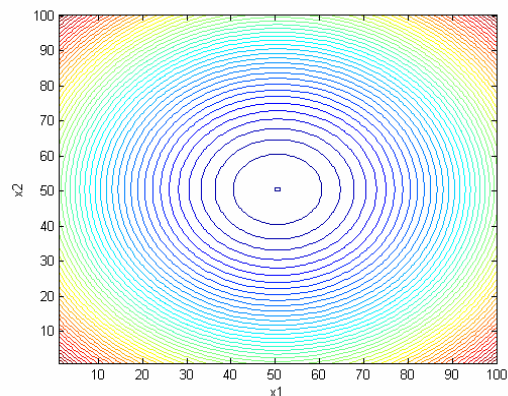
(ข) Contour lines

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 4.1 แสดงพื้นผิวตอบสนองและระดับเส้นของฟังก์ชันซอบส์เฟอร์



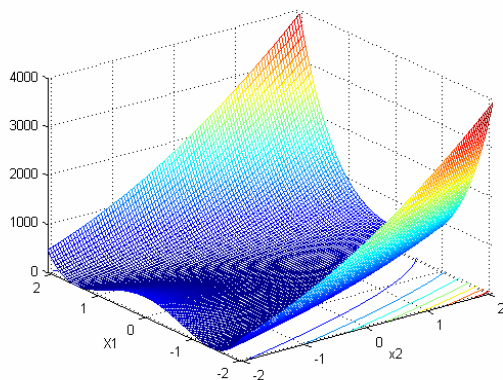
(ก) Surface plot



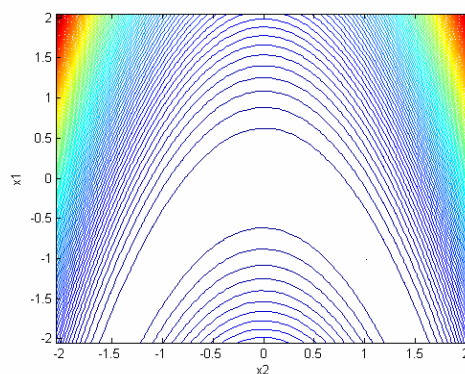
(ข) Contour lines

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 4.2 แสดงพื้นผิวตอบสนองและระดับเส้นของฟังก์ชันสเฟียส์



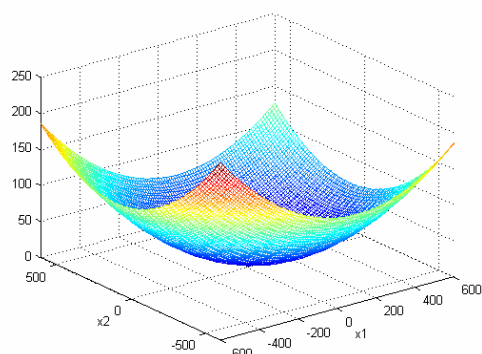
(ก) Surface plot



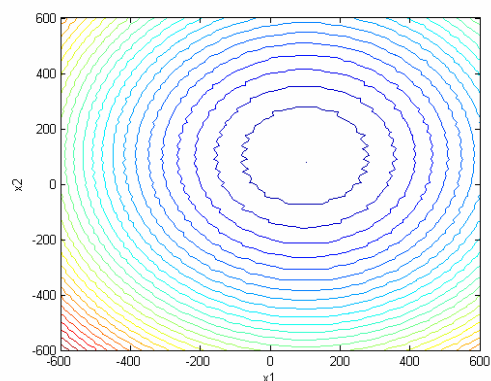
(ข) Contour lines

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 4.3 แสดงพื้นผิวตอบสนองและระดับเส้นของฟังก์ชันโรเซินบรอด



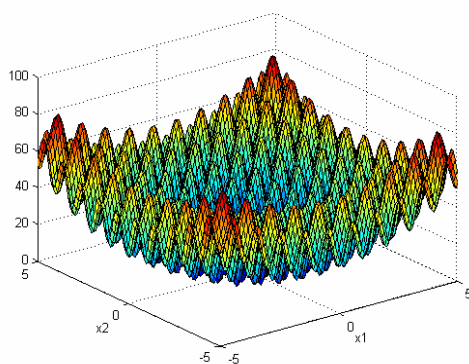
(ก) Surface plot



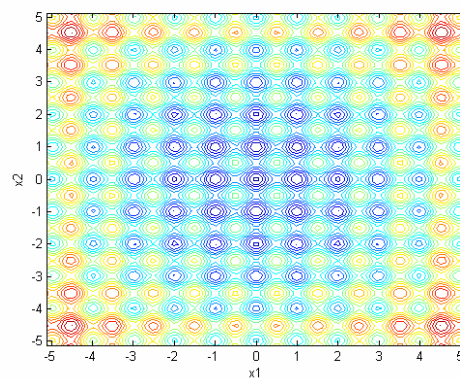
(ข) Contour lines

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 4.4 แสดงพื้นผิวตอบสนองและระดับเส้นของฟังก์ชันกรีนเบิร์ก



(ก) Surface plot



(ข) Contour lines

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 4.5 แสดงพื้นผิวตอบสนองและระดับเส้นของฟังก์ชันราสตรินส์

1. ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบกับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมดด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอทั้ง 5 รูปแบบ โดยกระทำซ้ำๆ กัน 30 ครั้ง และค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิมที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2 จากการทดสอบพบว่าวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เหนือกว่าวิธีพันธุกรรม ทั้งในด้านคุณภาพของคำตอบและประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ โดยขึ้นอยู่กับคำตอบเริ่มต้นและความซับซ้อนของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่นำมาทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.3-4.7

ตารางที่ 4.2

แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรม

ACO		CGA	
Parameter	Value	Parameter	Value
Number of Ant (a)	5	Population size	50
Pheromone of the trail (α)	1	Crossover rate	10%
heuristic information rate (β)	0.95	Mutation rate	10%
Evaporation rate (ρ)	0.05	Maximum Iteration	1000
Maximum Iteration	1000	Maximum Time (sec.)	60
Maximum Time (sec.)	60	Number of seek	30
Number of seek	30		

ตารางที่ 4.3

แสดงคำตอบของวิธีวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมของฟังก์ชันซอบส์เฟอร์

Methods	Worst	Average	Min.	SD	Average	% get
					CPU time (sec.)	optimum solution
CGA	2.71E-05	5.78E-06	0	4.52E-06	28.88	60
ACO	0*	0*	0*	0*	1.35	100

ตารางที่ 4.4

แสดงคำตอบของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมของฟังก์ชันสเฟียส์

Methods	Max.	Average	Min.	SD	Average CPU time (sec.)	% get optimum solution
CGA	0*	0*	0*	0*	2.62	100
ACO	0*	0*	0*	0*	0.34	100

ตารางที่ 4.5

แสดงคำตอบของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมของฟังก์ชันโรเซ็นบร็อค

Methods	Max.	Average	Min.	SD	Average CPU time (sec.)	% get optimum solution
CGA	5.53E-03	2.43E-04	0*	2.70E-04	49.23	37
ACO	0*	0*	0*	0	2.23	100

ตารางที่ 4.6

แสดงคำตอบของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมของฟังก์ชันกรีนเวจด์

Methods	Max.	Average	Min.	SD	Average CPU time (sec.)	% get optimum solution
CGA	6.50E-01	4.92E-03	0*	7.45E-02	56.20	10
ACO	2.93E-05	3.81E-06	0*	4.35E-06	5.68	86

ตารางที่ 4.7

แสดงคำตอบของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมของฟังก์ชันราสตรินส์

Methods	Max.	Average	Min.	SD	Average CPU time (sec.)	% get optimum solution
CGA	6.21E-01	7.41E-02	0*	6.24E-02	58.66	3
ACO	2.15E-05	3.13E-06	0*	2.86E-06	8.44	70

0* หมายถึงคำตอบที่ได้มีค่ามากกว่า E-08 ($0^* \geq 10^{-8}$)

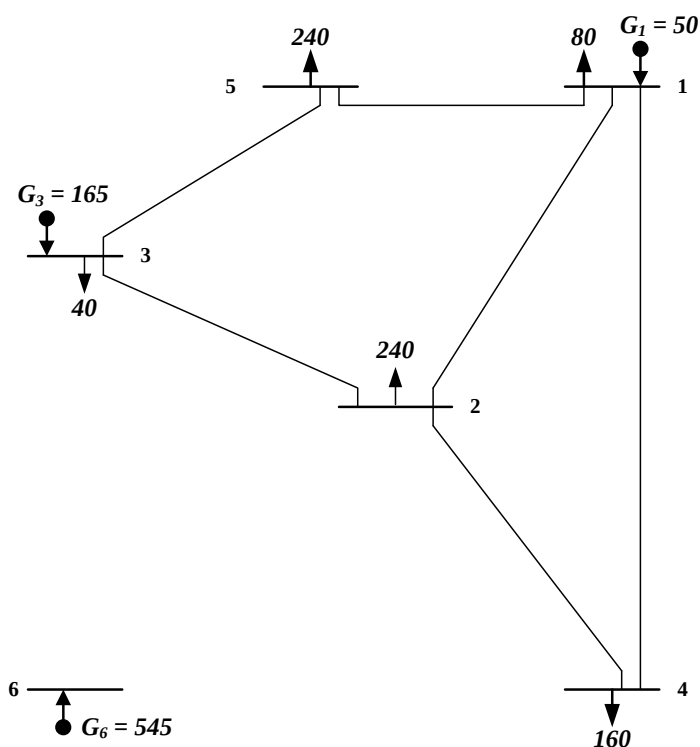
4.2 การทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการทางฮิวริสติกที่เรียกว่า วิธีฝูงมด โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ที่ต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ ของระบบกำลังไฟฟ้าและทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบกับระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังทั้งหมด 3 ระบบ คือ ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัสของ Garver ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 18 บัสของภาคตะวันตกของประเทศจีนและระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส ซึ่งเป็นระบบจริงที่อยู่ทางตอนใต้ของประเทศบราซิล ตามลำดับ เพื่อให้แน่ใจว่าวิธีการที่นำเสนอดีกว่าวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส

ในการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีฝูงมดได้ทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง 6 บัสของ Garver ซึ่งเป็นผู้คิดค้นระบบทดสอบในปี ค.ศ. 1970 [2] แสดงดังภาพที่ 4.6 ซึ่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัสเป็นระบบที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายจากนักวิจัยทั้งในและต่างประเทศในการทดสอบวิธีการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า เดิมทีระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส มีทั้งหมด 5 บัส มีกำลังการผลิตรวมทั้งหมดเท่ากับ 510 เมกะวัตต์ แต่เมื่อในอนาคตมีการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้นรวมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 760 เมกะวัตต์ ทำให้จำเป็นต้องมีการขยายกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นเข้ามาในระบบ (ก่อสร้างโรงไฟฟ้าแห่ง

ใหม่) ซึ่งมีขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าเท่า 545 เมกะวัตต์และกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 600 เมกะวัตต์ โดยต่ออยู่กับบัสที่ 6 จึงทำให้กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1,100 เมกะวัตต์ ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการขยายและก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ขึ้นมาในระบบ เพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายได้อย่างเพียงพอ โดยมีความเป็นไปได้ในการก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังมีค่าเท่ากับ 15 เส้นทางและจำนวนวงจรสูงสุดที่สามารถก่อสร้างได้ในแต่ละเส้นทางเท่ากับ 4 วงจร ดังนั้นขอบเขตความเป็นไปได้ของสายส่งเส้นใหม่ทั้งหมดเท่ากับ $(4+1)^{15}$ [8] และสายส่งเส้นใหม่ที่จะก่อสร้างจะต้องอยู่ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขที่กำหนดตามสมการที่ (3.1-3.6) และสายส่งเส้นใหม่จะต้องเป็นแปรรูปจำนวนเต็ม (Integer Variable) อีกด้วย ส่วนข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความต้องการไฟฟ้าและค่าพารามิเตอร์ของสายส่งในแต่ละเส้น ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างในแต่ละเส้นทางแสดงในภาคผนวก ข. ตารางที่ ข.1 และตารางที่ ข.2 ตามลำดับ

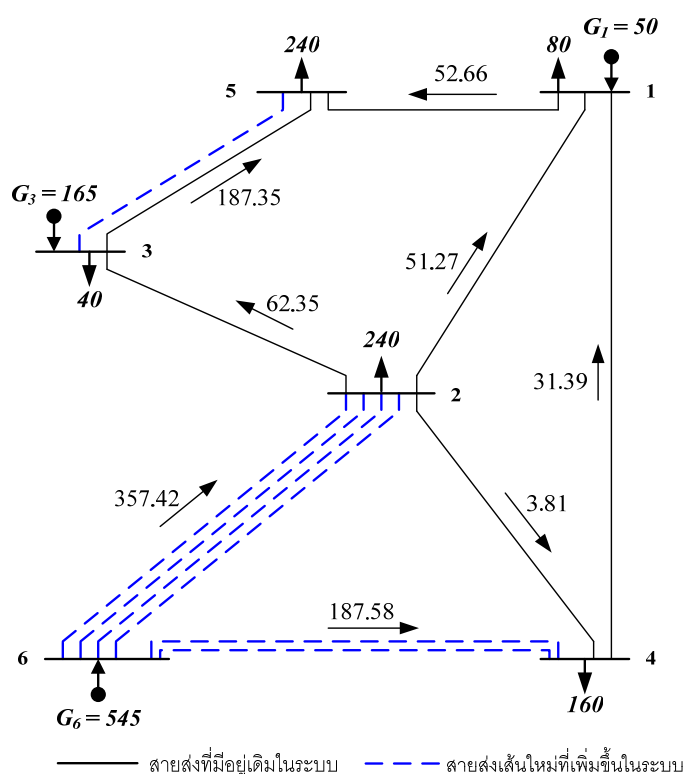


ที่มา: L. L. Garver, "Transmission network estimation using linear programming," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-89, pp. 1688-1697, Sept.-Oct. 1970.

ภาพที่ 4.6 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส

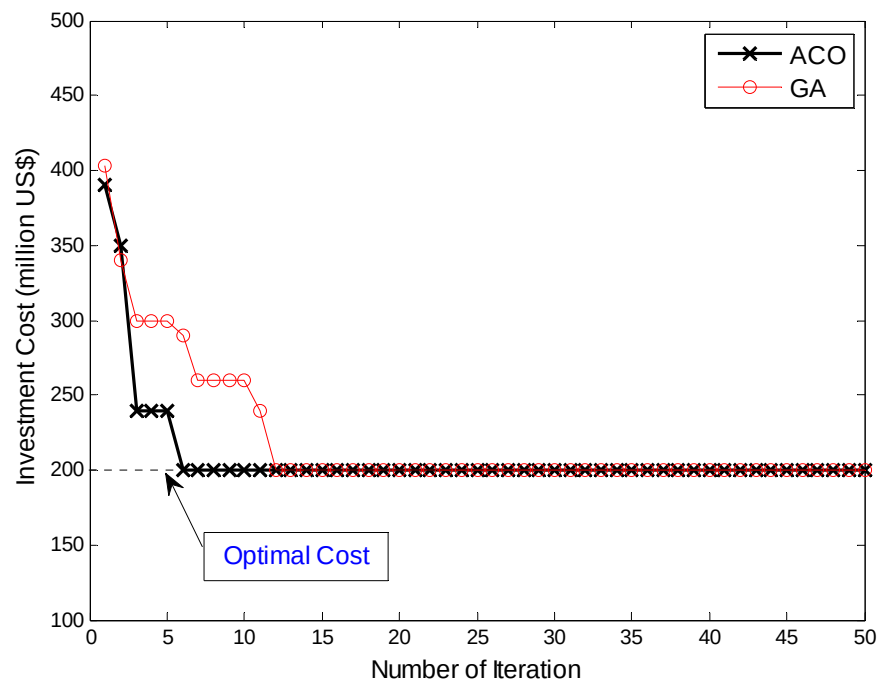
1. ผลการทดสอบระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส

ผลการทดสอบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมดและเปรียบเทียบกับวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิม โดยกระทำซ้ำๆ กันรวมทั้งหมด 30 ครั้ง ค่าพารามิเตอร์และค่าคงที่ที่ใช้ในการแก้ปัญหาก็ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัสที่ดีที่สุดของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิมแสดงในตารางที่ 4.8 โดยผลลัพธ์ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส มีต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่รวมทั้งหมดเท่ากับ 200,000 ดอลลาร์ และสายส่งเส้นใหม่ที่พิจารณาในการก่อสร้างรวมทั้งหมด 7 วงจรคือ $n_{3-5} = 1$, $n_{2-6} = 4$ และ $n_{4-6} = 2$ แสดงดังภาพที่ 4.7

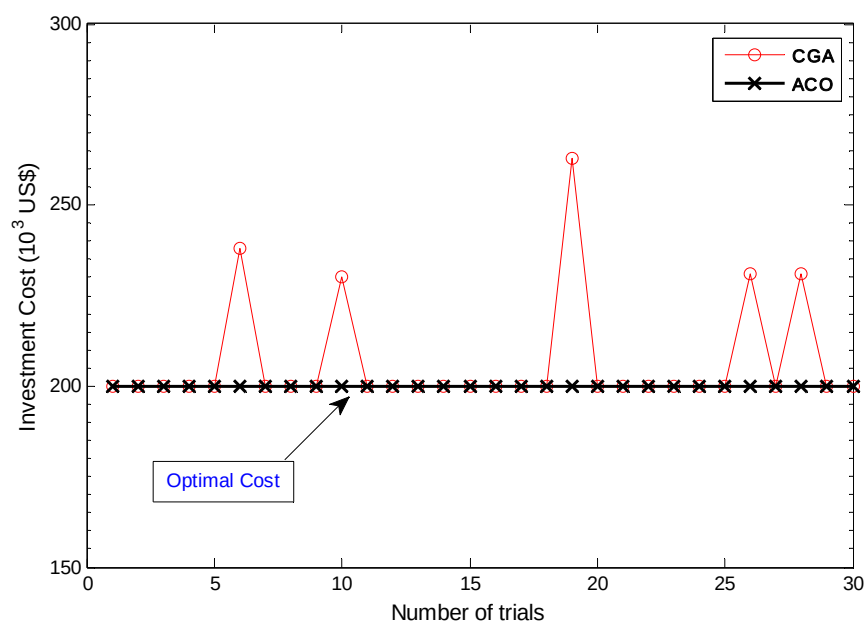


ภาพที่ 4.7 แสดงคำตอบของระบบ 6 บัสที่ได้จากการทดสอบของวิธีฝูงมด

จากการทดสอบพบว่าวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เหนือกว่าวิธีพันธุกรรมทั้งในด้านคุณภาพของคำตอบและประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบดังแสดงในตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.8 แสดงลักษณะการรู้เข้าหาคำตอบของวิธีฝูงมดกับวิธีพันธุกรรม จากภาพพบว่าจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบของวิธีฝูงมดมีค่าเท่ากับ 6 รอบส่วนวิธีพันธุกรรมมีค่าเท่ากับ 13 รอบ ซึ่งจะเห็นว่าวิธีฝูงมดดีกว่าวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิมถึง 2 เท่าในการค้นหาคำตอบและภาพที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของคำตอบที่กระทำซ้ำๆ กัน 30 ครั้ง ของวิธีวิธีฝูงมด



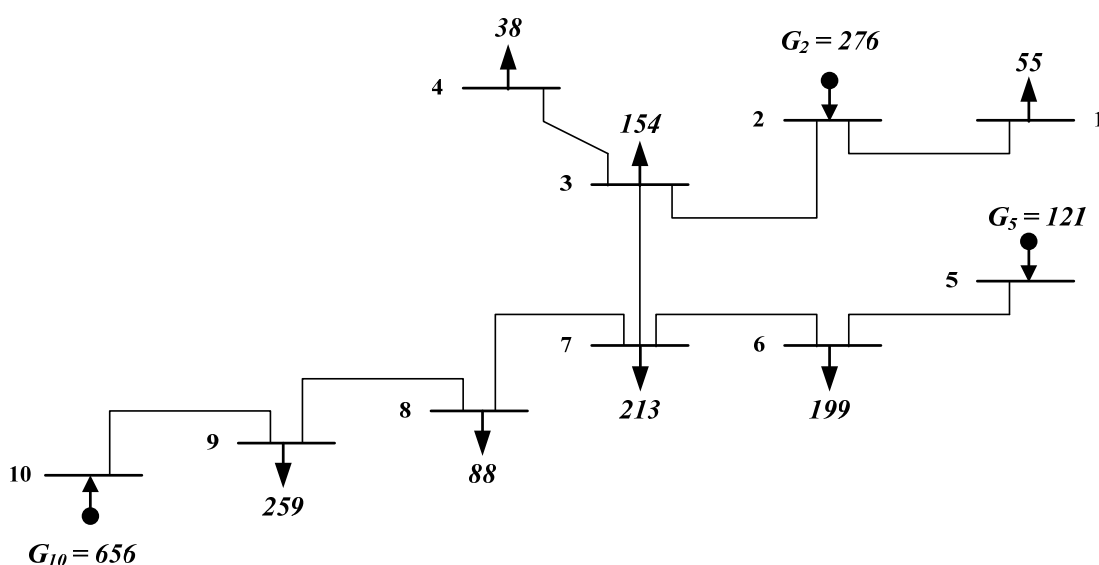
ภาพที่ 4.8 การหาค่าตอบของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมของระบบ 6 บัส



ภาพที่ 4.9 การกระจายคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เมื่อทำซ้ำ 30 ครั้ง

4.2.2 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังทางภาคตะวันตกของประเทศไทย 18 บัส

ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 18 บัส [35] เป็นระบบจริงที่อยู่ทางภาคตะวันตกของประเทศไทย ก่อนที่จะเริ่มทำการวางแผนระบบไฟฟ้าเดิมมีอยู่ทั้งหมด 10 บัส โดยมีบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ 3 บัส คือบัสที่ 2 มีกำลังการผลิตเท่ากับ 276 เมกะวัตต์ บัสที่ 5 มีกำลังการผลิตเท่ากับ 121 เมกะวัตต์ และบัสที่ 10 มีกำลังการผลิตเท่ากับ 656 เมกะวัตต์ รวมกำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 1053 เมกะวัตต์ ส่วนบัสที่มีความต้องการไฟฟ้าต่ออยู่ 7 บัส โดยมีความต้องการไฟฟารวมทั้งหมดเท่ากับ 1006 เมกะวัตต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.10

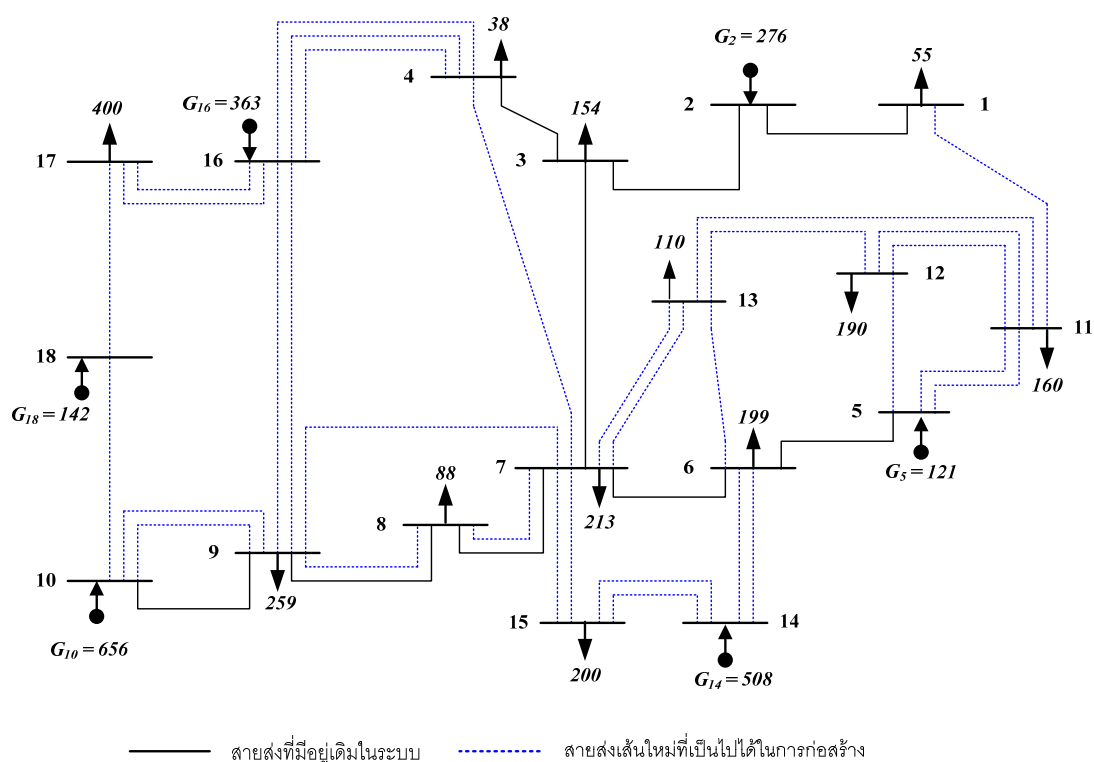


ที่มา: X. Wang and J. McDonald, "Modern Power System Planning," McGraw-Hill International (UK) Limited, 1994.

ภาพที่ 4.10 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 10 บัสก่อนเพิ่มกำลังการผลิต

แต่ในอนาคตการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็น 2,066 เมกะวัตต์ โดยได้ก่อสร้างบัสขึ้นมาใหม่คือบัส 11, 12, 13, 15 และ 17 จึงมีการวางแผนขยายกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นเข้ามาในระบบ (ก่อสร้างโรงไฟฟ้าแห่งใหม่) ซึ่งมีขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าเท่า 508, 363, 142 เมกะวัตต์ และกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 540, 495, 142 เมกะวัตต์ ตามลำดับ ทำให้ระบบนี้มีกำลังการผลิตสูงสุดรวมทั้งหมด 3,587 เมกะวัตต์ โดยได้ก่อสร้างบัสขึ้นมาใหม่คือบัสที่ 14, 16 และ 18 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.11 ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ดังนั้นจึงต้องมีการก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่เข้ามาในระบบ เพื่อให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้

ไฟฟ้าแต่ละรายได้อย่างเพียงพอ โดยมีความเป็นไปได้ในการก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังมีค่าเท่ากับ 27 เส้นทางและจำนวนวงจรสูงสุดที่สามารถก่อสร้างได้ในแต่ละเส้นทางเท่ากับ 4 วงจร ดังนั้นขอบเขตความเป็นไปได้ของสายส่งเส้นใหม่ทั้งหมดเท่ากับ $(4+1)^{27}$ [8] และกำหนดให้ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ในแต่ละเส้นทางมีค่าเท่ากับ 25,000 US\$/km. [42] ส่วนข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความต้องการไฟฟ้าในแต่ละบัสและค่าพารามิเตอร์ของสายส่งแต่ละเส้น ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างของสายส่งแต่ละเส้นทางแสดงในภาคผนวก ข. ตารางที่ ข.3 และตารางที่ ข.4 ตามลำดับ



ที่มา: X. Wang and J. McDonald, "Modern Power System Planning," McGraw-Hill International (UK) Limited, 1994.

ภาพที่ 4.11 แสดงการเพิ่มกำลังการผลิตและความต้องการไฟฟ้าในขนาดของระบบ 18 บัส

1. ผลการทดสอบระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 18 บัส

ผลจากการทดสอบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมดและเปรียบเทียบกับวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิม กระทำซ้ำๆ กันรวมทั้งหมด 30 ครั้ง ค่าพารามิเตอร์และค่าคงที่ที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 18 บัสที่ดีที่สุดของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมแสดงใน

ตารางที่ 4.10 โดยผลลัพธ์ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 18 บัสมีต้นทุนในการก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่รวมทั้งหมดเท่ากับ $40,375 \times 10^3$ ดอลลาร์ และสายส่งเส้นใหม่ที่พิจารณาในการก่อสร้างทั้งหมด 14 วงจรคือ $n_{1-11} = 1$, $n_{4-16} = 1$, $n_{5-12} = 1$, $n_{6-14} = 2$, $n_{7-8} = 1$, $n_{7-13} = 1$, $n_{8-9} = 1$, $n_{9-10} = 2$, $n_{14-15} = 1$, $n_{16-17} = 2$ และ $n_{17-18} = 1$ แสดงดังภาพที่ 4.12

ตารางที่ 4.10

แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมของระบบ 18 บัส

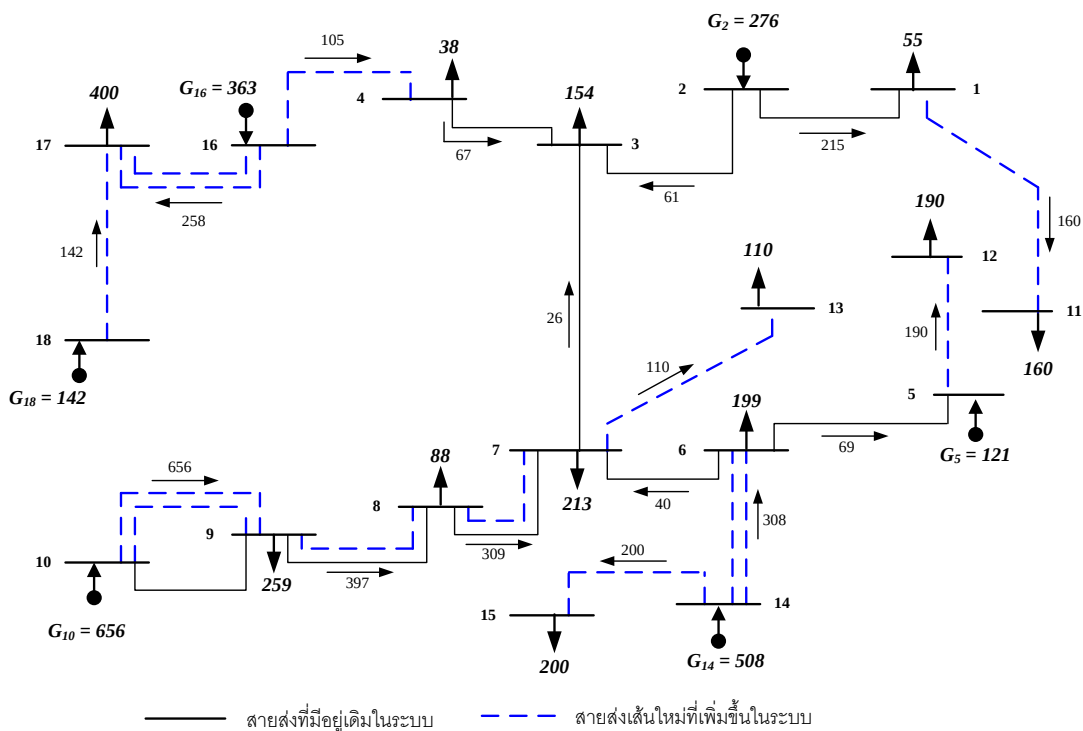
Parameter	Method						
	Value						
	ACO1	ACO2	ACO3	ACO4	ACO5	ACO6	CGA
Number of Ant (a)	5	10	15	20	25	30	-
Pheromone of the trail (α)	1	1	1	1	1	1	-
Heuristic information rate (β)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	-
Evaporation rate (ρ)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-
Population size	-	-	-	-	-	-	100
Crossover rate	-	-	-	-	-	-	30%
Mutation rate	-	-	-	-	-	-	10%
Maximum Iteration	500	500	500	500	500	500	500
Maximum Time (sec.)	180	180	180	180	180	180	180
Number of seek	30	30	30	30	30	30	30

จากการทดสอบพบว่าวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เหนือกว่าวิธีพันธุกรรมทั้งในด้านคุณภาพของคำตอบและประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบดังแสดงในตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.13 แสดงลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธีฝูงมดกับวิธีพันธุกรรม จากภาพพบว่าจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบของวิธีฝูงมดมีค่าเท่ากับ 15 รอบส่วนวิธีพันธุกรรมมีค่าเท่ากับ 44 รอบ ซึ่งจะเห็นว่าวิธีฝูงมดดีกว่าวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิมถึง 29 รอบของการค้นหาคำตอบและภาพที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของคำตอบที่กระทำซ้ำๆ กัน 30 ครั้ง ของวิธีวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิม จากภาพแสดงให้เห็นว่าการกระจายคำตอบของวิธีการที่นำเสนอดีกว่าวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบดั้งเดิม

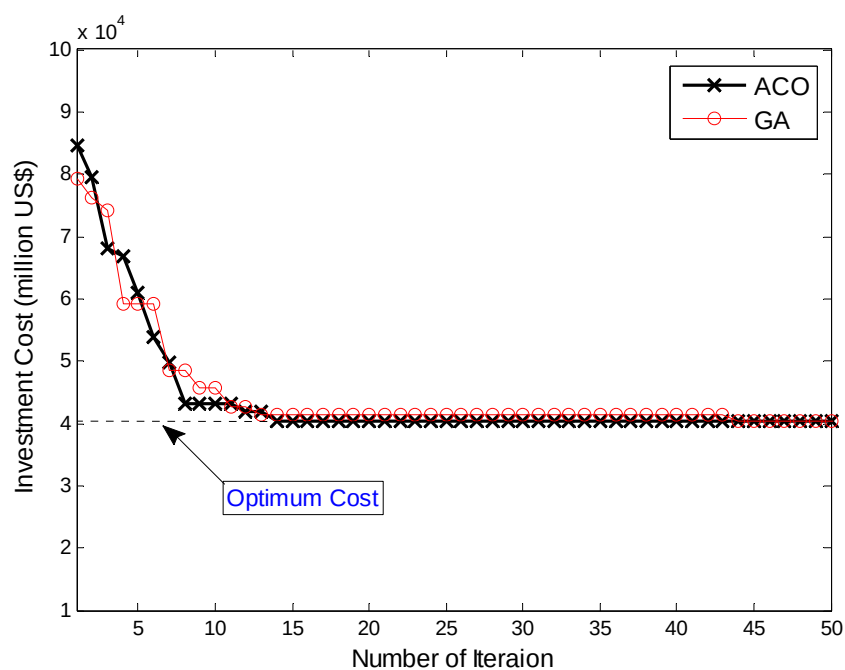
ตารางที่ 4.11

แสดงผลการทดสอบวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมของระบบ 18 บัส

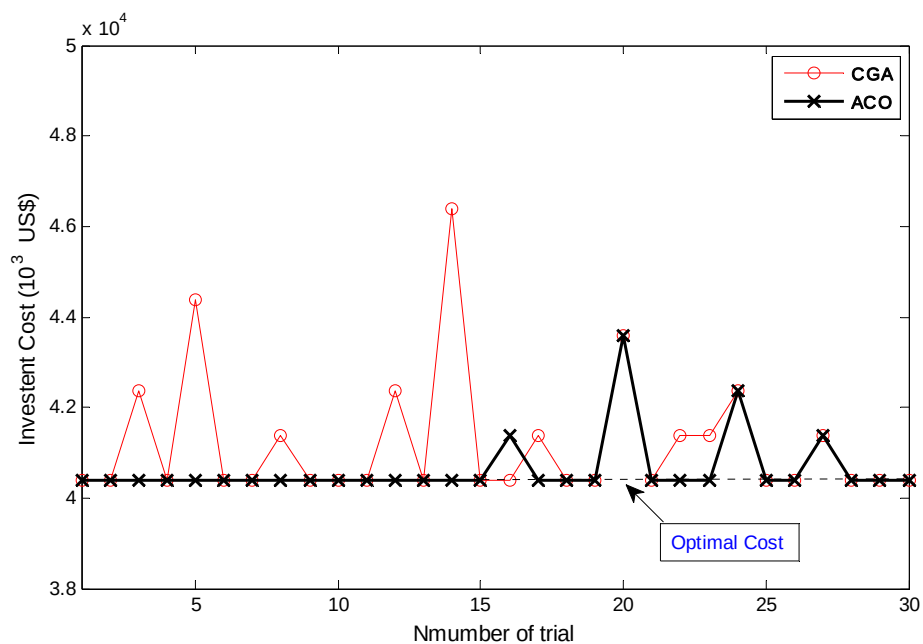
Results	Method						
	ACO1	ACO2	ACO3	ACO4	ACO5	ACO6	CGA
Best cost ($\times 10^3$ US\$)	40,375	40,375	40,375	40,375	40,375	40,375	40,375
Average cost ($\times 10^3$ US\$)	41,037.5	40,765	40,675	40,731.7	40,615	40,475	41,037.5
Worst cost ($\times 10^3$ US\$)	45,175	43,575	43,88	43,575	43,575	41,375	45,175
Standard deviation	1,512.93	897.55	870.34	892.67	707.40	305.13	1,245.52
Average CPU time (sec.)	61.38	56.08	75.49	66.47	84.23	73.1	120.86
% Get optimum solution	73.33	80	86.67	83.33	86.67	90	70
Line addition for the best result	$n_{1-11} = 1, n_{4-16} = 1, n_{5-12} = 1, n_{6-14} = 2, n_{7-8} = 1, n_{7-13} = 1, n_{8-9} = 1$ $n_{9-10} = 2, n_{14-15} = 1, n_{16-17} = 2, n_{17-18} = 1$						



ภาพที่ 4.12 แสดงคำตอบของระบบ 18 บัสที่ได้จากการทดสอบของวิธีฝูงมด



ภาพที่ 4.13 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมของระบบ 18 บัส



ภาพที่ 4.14 การกระจายคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เมื่อทำซ้ำ 30 ครั้ง

4.2.3 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังทางตอนใต้ของประเทศไทย 46 บัส

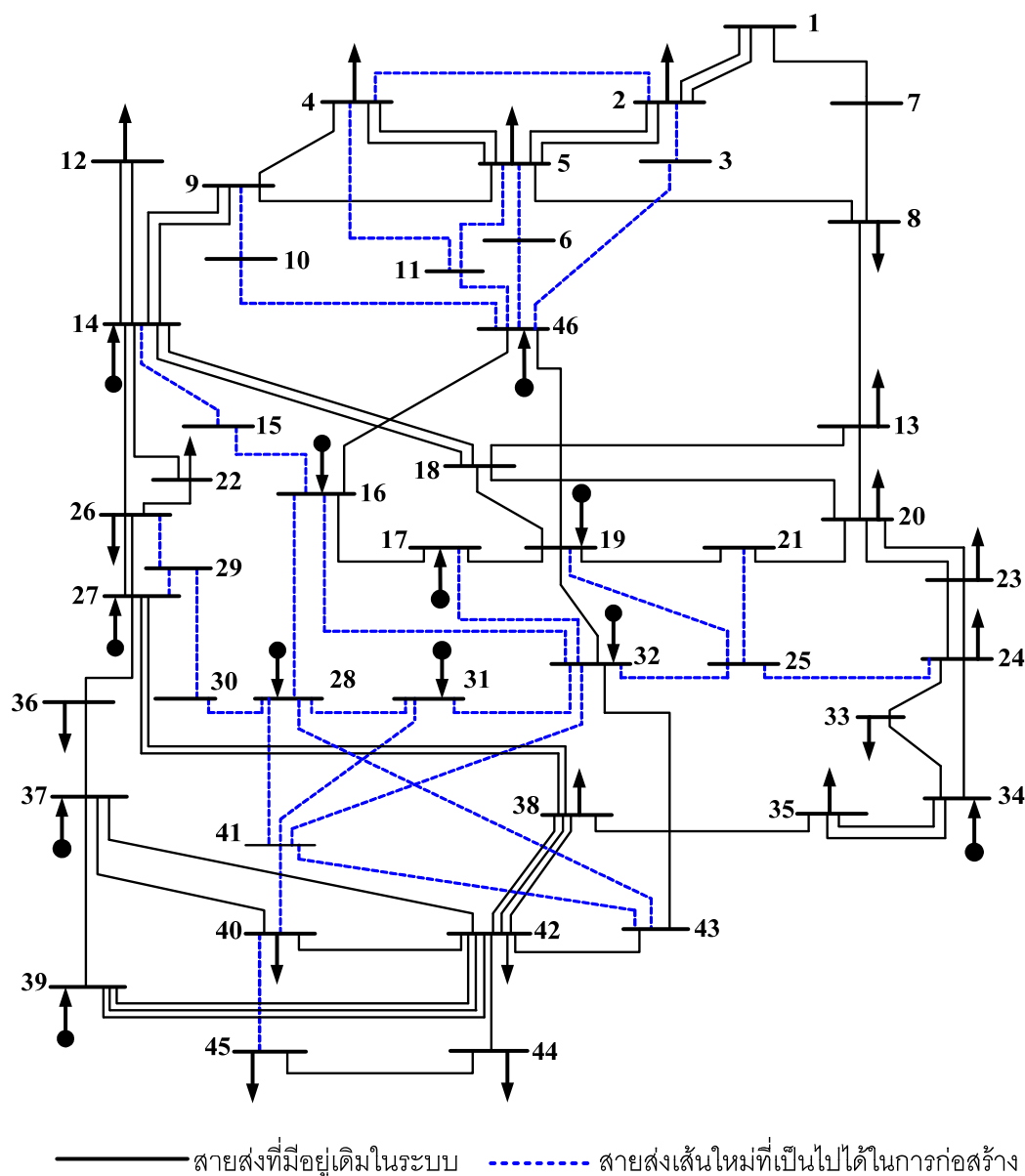
ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส [11] เป็นระบบไฟฟ้าที่ใช้จริงของประเทศไทยทางตอนใต้ แสดงในภาพที่ 4.15 ขนาดของระบบทดสอบไฟฟ้านี้เทียบกับระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในเขตปฏิบัติการทางภาคเหนือ ซึ่งเป็นระบบ 50 บัส ผู้วิจัยได้นำเทคนิคที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของโครงสร้างของระบบส่งที่มีอยู่เดิม โดยการเพิ่มเส้นทางสายส่งเส้นใหม่ เนื่องจากการก่อสร้างโรงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระบบ นอกจากนี้ระบบทดสอบดังกล่าวยังได้นำนักวิจัยผู้อื่นอ้างอิงถึงและนำไปใช้ในการทดสอบกับแบบจำลองที่นำเสนอขึ้นในการวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า ยังผลให้สามารถเปรียบเทียบมูลค่าในการลงทุนการก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่กับผลงานวิจัยที่ผ่านมาได้และมีข้อมูลเพียงพอในการทดสอบซึ่งมีเป็นสิ่งสำคัญต่อเทคนิคที่นำเสนอ โดยความเป็นไปได้ในการก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ของระบบ 46 บัสเท่ากับ 79 เส้นทางและจำนวนวงจรสูงสุดที่สามารถก่อสร้างได้ในแต่ละเส้นทางเท่ากับ 4 วงจร ดังนั้นขอบเขตความเป็นไปได้ของสายส่งเส้นใหม่ทั้งหมดเท่ากับ $(4+1)^{79}$ [8] ส่วนข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความต้องการใช้ไฟฟ้าและค่าพารามิเตอร์ของสายส่งแต่ละเส้น ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างของสายส่งแต่ละเส้นทางแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.5 และตารางที่ ข.6 ตามลำดับ

1. ผลการทดสอบระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัส

ผลการทดสอบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมดและเปรียบเทียบกับวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิม กระทำซ้ำๆ กันรวมทั้งหมด 30 ครั้ง ค่าพารามิเตอร์และค่าคงที่ที่ใช้ในการแก้ปัญหาในระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัสที่ดีที่สุดของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมแสดงในตารางที่ 4.12 โดยผลลัพธ์ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัสมีต้นทุนในการก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่รวมทั้งหมดเท่ากับ $154\,420 \times 10^3$ ดอลลาร์ และสายส่งเส้นใหม่ที่พิจารณาในการก่อสร้างทั้งหมด 16 วงจรคือ $n_{05-06} = 2$, $n_{19-25} = 1$, $n_{20-21} = 2$, $n_{24-25} = 2$, $n_{26-29} = 3$, $n_{28-30} = 1$, $n_{29-30} = 2$, $n_{31-32} = 1$, $n_{42-43} = 2$ และ $n_{46-06} = 1$. แสดงในตารางที่ 4.13

จากการทดสอบพบว่าวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เหนือกว่าวิธีพันธุกรรมทั้งในด้านคุณภาพของคำตอบและประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบดังแสดงในตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.16 แสดงลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธีฝูงมดกับวิธีพันธุกรรม จากภาพพบว่าจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบของวิธีฝูงมดมีค่าเท่ากับ 52 รอบส่วนวิธีพันธุกรรมมีค่าเท่ากับ 84 รอบ ซึ่งจะเห็นว่าวิธีฝูงมดดีกว่าวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิมถึง 32 รอบและภาพที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของคำตอบที่กระทำซ้ำๆ กัน 30 ครั้ง ของวิธีวิธีฝูงมดและวิธี

พันธุกรรมแบบดั้งเดิม จากภาพแสดงให้เห็นว่าการกระจายคำตอบของวิธีการที่นำเสนอดีกว่าวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบดั้งเดิมและตารางที่ 4.14 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลสายส่งในแต่ละเส้นของระบบทดสอบกำลังไฟฟ้า 46 บัส



ที่มา: S. Haffner, A. Monticelli, A. Garcia, J. Mantovani, and R. Romero, "Branch and bound algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib.*, vol. 147, pp. 149-156, May 2000.

ภาพที่ 4.15 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 46 บัสทางตอนใต้ของบราซิล

ตารางที่ 4.12

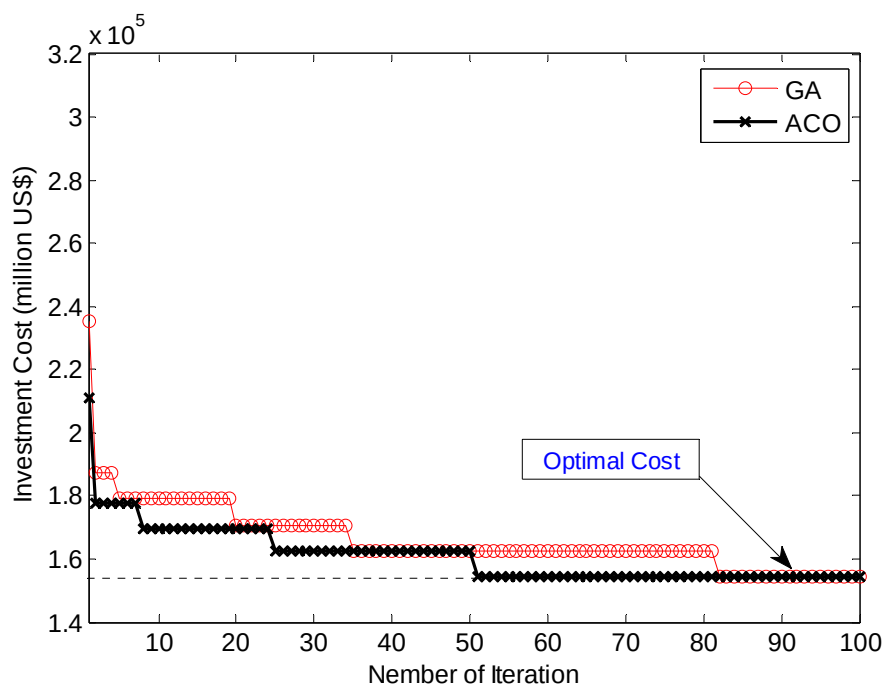
แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบของวิธีฝังและวิธีพันธุกรรมของระบบ 46 บัส

Parameter	Method						
	Value						
	ACO1	ACO2	ACO3	ACO4	ACO5	ACO6	CGA
Number of Ant (a)	5	10	15	20	25	30	-
Pheromone of the trail (α)	1	1	1	1	1	1	-
Heuristic information rate (β)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	-
Evaporation rate (ρ)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-
Population size	-	-	-	-	-	-	200
Crossover rate	-	-	-	-	-	-	30%
Mutation rate	-	-	-	-	-	-	20%
Maximum Iteration	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Maximum Time (sec.)	300	300	300	300	300	300	300
Number of seek	30	30	30	30	30	30	30

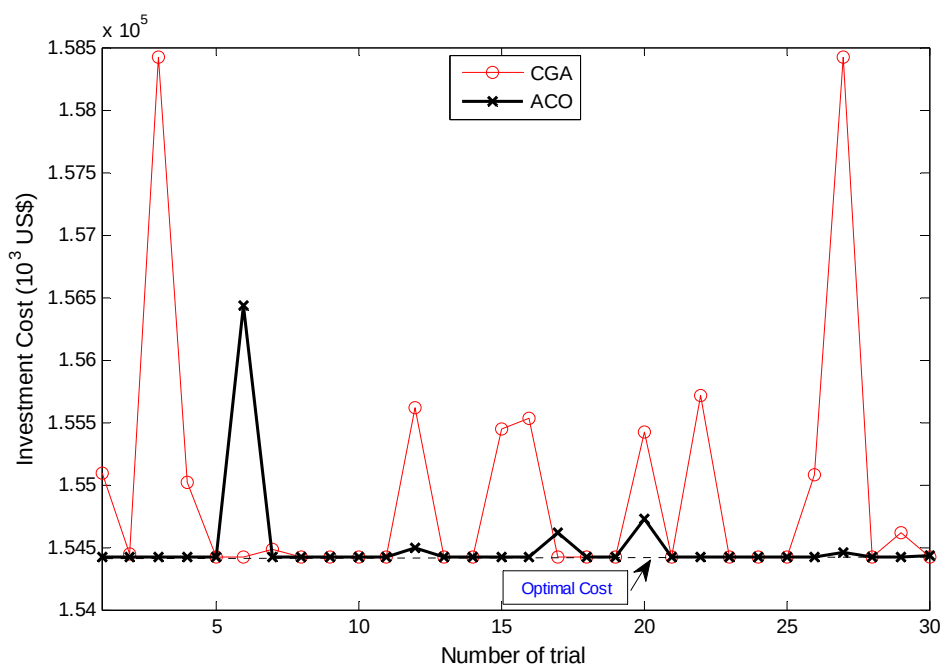
ตารางที่ 4.13

แสดงผลการทดสอบวิธีผู้ลงมดและวิธีพันธุ์กรรมของระบบ 46 บัส

[illegible]



ภาพที่ 4.16 การหาค่าตอบของวิธีฝูงมดและวิธีพันธุกรรมของระบบ 46 บัส



ภาพที่ 4.17 การกระจายคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เมื่อทำซ้ำ 30 ครั้ง

ตารางที่ 4.14
แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลสายส่งในแต่ละเส้นของระบบ 46 บัส

Item	From	To	f_{ij}	Item	From	To	f_{ij}
1	1	2	1.910	25	14	18	193.517
2	1	7	-1.910	26	14	22	33.668
3	2	3	0	27	14	26	-6.101
4	2	4	0	28	15	16	0
5	2	5	-441.190	29	16	17	806.417
6	3	46	0	30	16	28	0
7	4	5	-143.848	31	16	32	0
8	4	9	-156.852	32	16	46	559.583
9	4	11	0	33	17	19	1806.417
10*	5	6	-890.580	34	17	32	0
11	5	8	121.706	35	18	19	-196.366
12	5	9	-54.164	36	18	20	199.744
13	5	11	0.000	37	19	21	1050.810
14*	6	46	-890.580	38*	19	25	954.288
15	7	8	-1.910	39	19	32	645.955
16	8	13	47.596	40	19	46	-268.002
17	9	10	0	41*	20	21	-1050.810
18	9	14	-211.016	42	20	23	211.290
19	10	46	0	43	21	25	0
20	11	46	0	44	22	26	-48.232
21	12	14	-511.900	45	23	24	-246.810
22	13	18	-190.139	46*	24	25	-954.288
23	13	20	51.936	47	24	33	153.041
24*	14	15	0	48	24	34	76.236

ตารางที่ 4.14 (ต่อ)
แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลสายส่งในแต่ละเส้น

Item	From	To	f_{ij}	Item	From	To	f_{ij}
49	25	32	0	65	34	35	221.178
50	26	27	443.767	66	35	38	5.178
51*	26	29	-730.000	67	36	37	127.711
52	27	29	0	68	37	39	-59.355
53	27	36	217.811	69	37	40	251.144
54	27	38	279.956	70	37	42	147.922
55*	28	30	730.000	71	38	42	69.134
56	28	31	0	72	39	42	161.645
57	28	41	0	73	40	41	0.000
58	28	43	0	74	40	42	-10.956
59*	29	30	-730.000	75	40	45	0
60*	31	32	310.000	76	41	43	0
61	31	41	0	77*	42	43	-1405.955
62	32	41	0	78	42	44	165.800
63	32	43	1405.955	79	44	45	-86.700
64	33	34	-76.059				

* หมายถึงเส้นทางที่ต้องการก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่

4.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงกรณีศึกษาและผลการทดสอบวิธีการที่นำเสนอกับฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์และระบบทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังทั้งขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่ตามลำดับ จากตารางที่ 4.9 4.11 และตารางที่ 4.13 พบว่าความถูกต้องของคำตอบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงมดดีกว่าวิธีพันธุกรรมโดยคิดจากค่าเฉลี่ยของคำตอบประมาณ 15-32 % และระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบประมาณ 30-70 % นอกจากนั้นยังมีคุณภาพของคำตอบ

ยังเหนือกว่าวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิมอีกด้วย สาเหตุที่วิธีฝูงมดดีกว่าวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิมนั้น เป็นเพราะการกำหนดหรือสุ่มคำตอบแบบหลายคำตอบ โดยอาศัยความน่าจะเป็นและใช้ข้อมูลฮิวริสติก ซึ่งข้อมูลทางด้านฮิวริสติกตามความหมายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้นั้นก็คือ ต้นทุนในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเส้นใหม่ ถ้าข้อมูลในส่วนนี้มีค่าน้อยมดก็จะเลือกเส้นทางนั้นก่อนเส้นทางอื่นๆ จึงทำให้สามารถลดระยะเวลาและการรู้เข้าหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วกว่าวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิม อีกทั้งวิธีฝูงมดยังสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะถิ่น เนื่องจากมีหน่วยความจำในการจดจำข้อมูลในการค้นหาที่ผ่านมาแล้วนั้นก็คือ ปริมาณความหนาแน่นของสารฟีโรโมนบนเส้นทางที่ฝูงมดเดินทางผ่าน ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่สำคัญในการค้นหาคำตอบและวิธีฝูงมดยังเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาแบบโปรแกรมจำนวนเต็มมากที่สุด ในทางกลับกัน วิธีพันธุกรรมใช้วิธีการสุ่มแบบดั้งเดิมคือ สุ่มคำตอบแรกขึ้นมา จากนั้นใช้หลักการการดำเนินการทางด้านพันธุกรรม (Genetic Operator) เข้ามาพิจารณา ดังนั้นถ้าคำตอบเริ่มต้นไม่ดี คำตอบในรอบถัดไปก็อาจจะไม่ดีตามไปด้วย ทำให้ต้องใช้ระยะเวลานานในการค้นหาคำตอบและการรู้เข้าหาคำตอบจะต้องใช้จำนวนรอบในการค้นหาเป็นจำนวนมากเพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้อง

หลักการในการเลือกใช้ระบบทดสอบนั้น ผู้วิจัยได้นำระบบทดสอบที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่ได้รับการเผยแพร่และยอมรับว่ามีความถูกต้องเหมาะสมแทนที่จะนำระบบส่งกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยมาทดสอบในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นข้อมูลสำคัญของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตซึ่งไม่สามารถเปิดเผยได้