

การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาม
SOLVING THE ECONOMIC DISPATCH PROBLEM USING TABU SEARCH

สุวิทย์ คำสว่าง
SUWIT KHAMSAWANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 074-324-886-2

การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่

SOLVING THE ECONOMIC DISPATCH PROBLEM USING TABU SEARCH



สุวิทย์ คำสว่าง

SUWIT KHAMSAWANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 254๕

ISBN 794-324-886-2

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 48944
วัน, เดือน, ปี 13 ส.ค. 2547

.b.....
.i.....

SOLVING THE ECONOMIC DISPATCH PROBLEM USING TABU SEARCH

SUWIT KHAMSAWANG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-886-2

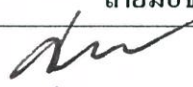


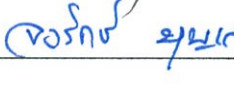

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การแก้ปัญหาการจ่ายไหลได้อย่างประหยัดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาม
SOLVING THE ECONOMIC DISPATCH PROBLEM USING
TABU SEARCH
ชื่อนักศึกษา นายสุวิทย์ คำสว่าง
รหัสประจำตัว 42061005
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.จรงค์ษ์ บุญเส็ง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ศุภี	บรรจงจิตร	
รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
ผศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.จรงค์ษ์	บุญเส็ง	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 27 ตุลาคม 2546 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 ห้อง (E12-402)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



(รศ.ดร. บุญวัฒน์ อัครชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 24 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2546

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามู
นักศึกษา	นายสุวิทย์ คำสว่าง
รหัสประจำตัว	42061005
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ร.ศ. จงรักษ์ บุญเส็ง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามู ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน เพราะเป็นวิธีที่สามารถหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น (local solution) โดยอาศัยการจดจำช่วงสั้นๆ ของคำตอบที่ผ่านมาแล้ว และใช้ประโยชน์จากการจดจำคำตอบเหล่านี้นำไปสู่การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบทั่วไป (global solution) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในวิทยานิพนธ์นี้ทำการทดสอบการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดใน 4 กรณีศึกษา ในกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของคำตอบกับวิธีการต่างๆ เช่น วิธีจินตติก อัลกอริทึมวิธีฮอปฟิลด์ นิวรอลเน็ตเวิร์ค วิธีชีวภูมูเลตเตด แอนนีลลิ่ง และวิธีการเท่ากันของแลมบ์ดา ในกรณีศึกษาที่ 3 ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของคำตอบกับวิธีจินตติก อัลกอริทึม และจากผลการดำเนินงานพบว่าวิธีการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูนั้น ได้ผล ลัพธ์ของคำตอบดีกว่าทั้งสี่วิธีดังกล่าว ในกรณีศึกษาที่ 4 ทำการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด โดยพิจารณาผลของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเข้าไว้ด้วย จากผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 4 พบว่าวิธีการค้นหาแบบตามูยังคงให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบทั่วไปได้ และง่ายต่อการประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาที่มีลักษณะของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หลากหลายรูปแบบ

Thesis Title	Solving the Economic Dispatch Problem Using Tabu Search
Student	Mr. Suwit Khamsawang
Student ID.	42061005
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Chongrak Boonseng

ABSTRACT

This thesis presents an efficient approach for solving the Economic Dispatch problem (ED) using Tabu Search algorithm (TS). Nowadays the TS is the most popular meta-heuristic technique for optimization application because it has the ability to escape local optima by a short-term memory of recent solutions leading to global optima. In this thesis, four case studies are considered. Effectiveness of the proposed method is compared with many methods such as Genetic Algorithm (GA), Hopfield Neuron Network (HNN), Simulated Annealing (SA) and equal lambda (λ). The results in case 1 and 2 are compared with GA, HNN, SA and λ . The results in case 3 are compared with GA. In case 4, the ED problem considers power flow constrains. The program is implemented by MATLAB. The results have shown that solving the ED problem using TS on case 1 and 2 can yield better solutions than GA, HNN, SA and λ . In case 4, the result shows that the proposed method can provide accurate solutions, and has the potential to be applied to other power engineering problems and easy to implementation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะความช่วยเหลือและเอาใจใส่ของอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ จงรักษ์ บุญเส็ง ที่ได้ดูแลเอาใจใส่และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำการวิจัย ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่นที่ให้การสนับสนุนทางด้านเวลาและทุนการศึกษา ขอขอบคุณเพื่อนๆ ผู้ร่วมงานทุกคนที่คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น ที่ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ และขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์สถานที่ทำงาน และประสิทธิประสาทวิชาความรู้จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ คุณจิตติพัฒน์ ตรียางกูรศรี หัวหน้าหน่วยปฏิบัติการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่นที่อนุเคราะห์ข้อมูลที่เป็นประโยชน์

สุวิทย์ คำสว่าง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตในการทำวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการงาน	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการต่างๆ	4
2.1.1 วิธีการจำลองแอนะลิติก.....	4
2.1.2 วิธีจิ้นติก.....	5
2.1.3 วิธีฮอปฟิลด์ นิวรอลเน็ตเวิร์ค	6
บทที่ 3 การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	7
3.1 ชนิดของบัลในการคำนวณไหลของกำลังไฟฟ้า.....	7
3.2 รูปแบบทั่วไปของการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	9
3.3 บัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์เมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากหม้อแปลง.....	11
3.3.1 หม้อแปลงแบบอัตราส่วนจำนวนรอบคงที่.....	11
3.3.2 หม้อแปลงแบบเปลี่ยนอัตราส่วนได้ตามสถานะโหลด.....	15
3.3.3 หม้อแปลงแบบเลื่อนเฟส.....	16
3.3.4 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบพิกัดเชิงขั้ว	22
3.3.5 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบโพลาร์.....	22
3.4 เทคนิคในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า	22
3.4.1 วิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1.1 การประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันแก้ปัญหасวมการเดี่ยว.....	23
3.4.1.2 การประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันแก้ปัญหасวมการแบบหลาย ตัวแปร.....	24
3.4.2 การประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันในการแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	25
3.5 สมการความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบสายส่ง.....	28
บทที่ 4 ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	36
4.1 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดเมื่อไม่คิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย.....	38
4.2 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดเมื่อคิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง.....	39
บทที่ 5 วิธีการค้นหาแบบตามู.....	44
5.1 บทนำ.....	44
5.2 หลักการพื้นฐานของวิธีการค้นหาแบบตามู.....	46
5.2.1 นิยาม.....	50
5.3 การประยุกต์ใช้ตัวดำเนินการของวิธีการค้นหาแบบตามู.....	57
5.3.1 ตัวแปรของการเคลื่อนย้าย.....	57
5.3.2 ตามูลิสต์และข้อจำกัดตามู.....	59
5.3.3 ขนาดของตามูลิสต์.....	60
5.3.4 รูปแบบของเกณฑ์แอสไพเรชัน.....	62
5.3.5 เกณฑ์การหยุด.....	63
5.4 การแก้ปัญหการหาค่าสูงสุดและต่ำสุดของฟังก์ชันคณิตศาสตร์.....	64
บทที่ 6 ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเพื่อแก้ปัญหการจ่ายโหลด อย่างประหยัด.....	77
6.1 รูปแบบของปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	77
6.2 วิธีการค้นหาแบบตามูสำหรับแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	78
6.3 กรณีศึกษาที่ 1.....	79
6.4 กรณีศึกษาที่ 2.....	82
6.5 กรณีศึกษาที่ 3.....	83

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.6 กรณีศึกษาที่ 4.....	86
6.6.1 ระบบทดสอบ 6 บัส.....	87
6.6.2 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส.....	89
6.6.3 ระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (เขต 2).....	93
6.6.3.1 ผลการคำนวณก่อนแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	95
6.6.3.2 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ.....	99
บทที่ 7 สรุป วิจารณ์และข้อเสนอแนะ.....	105
บรรณานุกรม.....	108
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	111
ภาคผนวก ข.....	112
ประวัติผู้เขียน.....	124

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ปริมาณต่างๆ ที่ต้องกำหนดสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	8
5.1 ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ทำการทดสอบ.....	63
5.2 ผลการทดสอบฟังก์ชัน F_4 จำนวน 10 ครั้ง.....	66
5.3 ผลการทดสอบฟังก์ชัน F_5 จำนวน 10 ครั้ง.....	68
5.4 ผลการทดสอบฟังก์ชัน F_6 จำนวน 10 ครั้ง.....	69
5.5 ผลการทดสอบฟังก์ชัน F_7 จำนวน 10 ครั้ง.....	71
5.6 ผลการทดสอบฟังก์ชัน F_8 จำนวน 10 ครั้ง.....	72
5.7 ผลการทดสอบฟังก์ชัน F_9 จำนวน 10 ครั้ง.....	74
5.8 ผลการทดสอบฟังก์ชัน F_{10} จำนวน 10 ครั้ง.....	75
6.1 รายละเอียดของเครื่องกำเนิด กรณีศึกษาที่ 1.....	79
6.2 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	81
6.3 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	82
6.4 รายละเอียดของเครื่องกำเนิด กรณีปัญหาที่ 3.....	84
6.5 ผลการทดสอบกรณีปัญหาที่ 3.....	85
6.6 ข้อมูลเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องของระบบ 6 บัส.....	87
6.7 ผลการคำนวณ โหลด โฟลว์ก่อนแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	88
6.8 ต้นทุนการผลิตก่อนแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	88
6.9 ผลการคำนวณ โหลด โฟลว์หลังแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	89
6.10 ต้นทุนการผลิตหลังแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู.....	89
6.11 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง.....	89
6.12 ผลการคำนวณ โหลด โฟลว์ก่อนแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	90
6.13 ต้นทุนการผลิตก่อนแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	91
6.14 ผลการคำนวณ โหลด โฟลว์หลังแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	92
6.15 ต้นทุนการผลิตหลังแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู.....	93
6.16 ราคาค่าเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแต่ละแห่ง.....	95
6.17 ปริมาณน้ำที่ใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำแต่ละแห่ง.....	96
6.18 ปริมาณน้ำของเขื่อนแต่ละแห่งที่สามารถระบายได้ในแต่ละวัน.....	96
6.19 ขีดจำกัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละช่วงความต้องการไฟฟ้า.....	96
6.20 ต้นทุนการผลิตที่ใช้ในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด.....	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.21 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด.....	97
6.22 ราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าปานกลาง.....	97
6.23 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าปานกลาง.....	98
6.24 ราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ.....	98
6.25 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ.....	99
6.26 ราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด.....	101
6.27 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด.....	102
6.28 ราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าปานกลาง.....	102
6.29 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าปานกลาง.....	102
6.30 ราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ.....	103
6.31 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ.....	103
6.32 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตก่อนและหลังแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	103
ข.1 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อพิจารณาการจ่ายโหลดตลอด 24 ชั่วโมง.....	112
ข.2 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อพิจารณาการจ่ายโหลดตลอด 24 ชั่วโมง.....	113
ข.3 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธี ๑ ในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อไม่พิจารณาค่าการ เปิด-ปิดของวาล์วไอน้ำ ทำการจ่ายโหลด 24 ชั่วโมง.....	115
ข.4 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ ในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อ ไม่พิจารณาค่าการเปิด-ปิดของวาล์วไอน้ำ ทำการจ่ายโหลด 24 ชั่วโมง.....	116
ข.5 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธี ๑ ในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อประมาณค่า ฟังก์ ชันวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปแบบโพลิโนเมียลกำลังสองทำการจ่ายโหลด 24 ชั่วโมง.....	118
ข.6 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ ในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อ ประมาณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปแบบโพลิโนเมียลกำลังสอง ทำ การจ่ายโหลด 24 ชั่วโมง.....	120
ข.7 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ ในกรณีศึกษาที่ 3 ทำการจ่ายโหลด 24 ชั่วโมง.....	121

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ลักษณะการไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัสต่างๆ.....	10
3.2 วงจรสมมูลย์แบบพายน้ของหม้อแปลงแบบแท็ปคองที่.....	12
3.3 วงจรสมมูลย์แบบพายน้ของหม้อแปลง.....	14
3.4 แบบจำลองของหม้อแปลงแบบเลื่อนเฟส.....	16
3.5 แบบจำลองที่สังเคราะห์แล้ว (generalized) ของตัวเลื่อนเฟส.....	20
3.6 แบบจำลองของตัวเลื่อนเฟส.....	20
4.1 กราฟต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดชนิดต่างๆ.....	37
4.2 การจ่ายโหลดคร่อมกันของเครื่องกำเนิดเมื่อไม่คิดค่ากำลังสูญเสีย.....	38
4.3 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในการจ่ายโหลดอย่างประหยัด.....	41
4.4 แบบจำลองการควบคุมการจ่ายโหลดอย่างประหยัดจากศูนย์กลางการควบคุม.....	42
5.1 ลักษณะการบันทึกราคาของดาบูลิสต์.....	46
5.2 ผังการดำเนินงานของวิธีการค้นหาแบบดาบูล.....	47
5.3 รูปแบบอัลกอริทึมของวิธีการค้นหาแบบดาบูล.....	48
5.4 รูปกราฟของตัวอย่างปัญหาที่น่าเสนอ.....	51
5.4 ลักษณะการเคลื่อนย้ายเพื่อหาค่าคำตอบที่เหมาะสม.....	59
5.5 ลักษณะของดาบูลิสต์ที่ออกแบบสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	61
5.6 ลักษณะกราฟฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_1 และ F_2	64
5.7 กราฟลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบในลักษณะต่างๆ ของฟังก์ชัน F_1 และ F_2	64
5.8 ลักษณะกราฟ (ก) และลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบ (ข) ของฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_3	65
5.9 ลักษณะของฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_4	65
5.10 ลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบในการทดสอบ F_4	66
5.11 ลักษณะของฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ทำการทดสอบ F_5	67
5.12 ลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบในการทดสอบ F_5	67
5.13 รูปฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_6	68
5.14 ลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบในการทดสอบ F_6	69
5.15 ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ทำการทดสอบ F_7	70
5.16 ลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบในการทดสอบ F_7	70
5.17 ลักษณะฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_8	71
5.18 ลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบในการทดสอบ F_8	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19 รูปภาพฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_g	73
5.20 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบในการทดสอบ F_g	73
5.21 ภาพฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_{10}	74
5.22 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบในการทดสอบ F_{10}	75
6.1 schematic diagram ของกรณีศึกษาที่ 1.....	77
6.2 ลักษณะกราฟฟังก์ชันค่าเฉลี่ยเพลิงของเครื่องกำเนิดในกรณีศึกษาที่ 1.....	78
6.3 การลู่เข้าสู่คำตอบที่เป็นคำตอบของกรณีศึกษาที่ 1.....	79
6.4 Schematic diagram ของระบบในกรณีที่ 2.....	79
6.5 การลู่เข้าสู่คำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมของกรณีศึกษาที่ 2.....	80
6.6 กราฟกำลังไฟฟ้าเนื่องจากผลของ valve - point loading กรณีศึกษาที่ 3.....	81
6.7 ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบในกรณีศึกษาที่ 3.....	82
6.8 ผังการทำงานในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดสำหรับกรณีที่ 4.....	84
6.9 ระบบทดสอบ 6 บัส.....	85
6.10 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส.....	87
6.11 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ...91	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไฟฟ้าในปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดจึงมีความน่าสนใจเพิ่มขึ้น จากบรรณานุกรมของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดแสดงให้เห็นว่ามีการคิดค้นเทคนิคหรือวิธีการต่างๆ ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดต่อเนื่องกันมาเป็นเวลานานและสม่ำเสมอ [1-20] อย่างไรก็ตามเห็นได้ว่าวิธีการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดแบบเก่ามีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นตามขนาดของปัญหา [22] และมีข้อจำกัดในแง่ของผลของคำตอบที่ได้รับ เนื่องจากความไม่แน่นอนของคำตอบ (robustness) และประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบ ดังนั้น การคิดค้นวิธีการต่างๆ เพื่อปรับปรุงผลลัพธ์ของคำตอบ ความเร็วที่ใช้ในการประมวลผล ประสิทธิภาพของวิธีการค้นหา และความเชื่อถือได้ของวิธีการ ยังต้องมีการพัฒนาต่อไปเรื่อยๆ

เป้าหมายหลักของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน ในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ การหาค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องให้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ โดยใช้ราคาเชื้อเพลิงน้อยที่สุด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขีดจำกัดการทำงาน of เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch problem) เป็นปัญหาสำคัญของระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ในการดำเนินการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้ และมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ซึ่งเป็นปัญหาที่น่าสนใจและท้าทาย ทำให้เป็นที่สนใจของนักวิจัยหลายท่าน [1-22] วัตถุประสงค์ของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดต้องทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลิตกำลังไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงในการผลิตน้อยที่สุด จึงถือได้ว่าเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization problem) ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำหนดให้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิง (fuel cost function) ซึ่งมักจะอยู่ในรูปของสมการพหุนาม (polynomials) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) เพื่อต้องการให้มีค่าน้อยที่สุด แต่ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด เป็นปัญหาที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น (local optimal) หลายค่า จึงทำให้ปัญหานี้เป็นที่น่าสนใจ และมีงานวิจัยจำนวนมาก ที่ใช้กรรมวิธีในการค้นหาแบบสุ่ม (heuristic) วิธีต่างๆ มาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ เช่น วิธี วิถีเงินเนติก [1-13] ชิวมูลเตตเตด แอนนิลลิ่ง(simulated annealing) [5], [15] และ วิธี นิวรอลเน็ตเวิร์ค (neural network) [16-18] เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู (tabu search) [27-33] ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดวิธีหนึ่งของวิธีในการค้นหาแบบสุ่ม และได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เพราะว่ามีประสิทธิภาพหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น (local

optimal) ไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วไป (global optimal) ได้อย่างมีประสิทธิภาพและง่ายต่อการประยุกต์สำหรับแก้ปัญหาต่างๆ

วิธีการค้นหาแบบตามูถูกนำเสนอโดย F.Glover ในปี 1977 ซึ่งได้สรุปแนวคิดและขั้นตอนของวิธีการค้นหาแบบตามู (Tabu Search) และต่อมา J.A. Bland and G.P. Dawson [30] ได้นำเสนอวิธีการนี้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม โดยเฉพาะการหาค่าที่เหมาะสมของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization problems) ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากนั้นก็เป็นที่ยอมรับแพร่หลายมากขึ้นเรื่อยๆ ปัจจุบันวิธีการค้นหาแบบตามูได้เป็นที่ยอมรับแล้วว่า มีความสามารถที่จะหลีกเลี่ยงการให้คำตอบสุดท้ายที่เป็นค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น และยังสามารถดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วไป หลักการของการค้นหาแบบตามูเองก็ยังเป็นหลักการที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาต่างๆ ได้เป็นอย่างดี และมีขั้นตอนค่อนข้างง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ หลักการพื้นฐานที่การค้นหาแบบตามูแตกต่างไปจากการค้นหาแบบธรรมดา ก็คือ มีการเพิ่มตามูลิสต์ (tabu list) และเกณฑ์ปรารถนา (aspiration criteria) ทำให้การค้นหาคำตอบดำเนินการได้เร็วขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เรียนรู้การประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตามู ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมในลักษณะต่างๆ
2. ศึกษาพฤติกรรมการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน และโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน โดยพิจารณาถึงเงื่อนไขต่างๆ เช่น จำกัดกำลังการผลิต, ความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า เป็นต้น
3. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้เทคนิควิธีการค้นหาแบบตามู และนำโปรแกรมที่ออกแบบไปทดสอบกับระบบตัวอย่าง เพื่อทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพของโปรแกรม
4. สามารถนำงานวิจัยที่ได้ ไปประยุกต์ใช้กับการเรียนการสอน และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ

1.3 ขอบเขตในการทำวิจัย

ข้อกำหนดเบื้องต้นในการทำวิทยานิพนธ์ได้แก่

1. ไม่พิจารณาเงื่อนไขกำลังคน เงื่อนไขด้านสิ่งแวดล้อม เงื่อนไขขีดจำกัดของสายส่ง เงื่อนไขขีดจำกัดการเพิ่มกำลังการผลิต (ramp rate)
2. โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันก๊าซและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไอน้ำนั้นพิจารณารวมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดียว

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการงาน

1. ศึกษาปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการแบบต่างๆ จากบรรณานุกรม
2. จัดหาอุปกรณ์ได้แก่ เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อรองรับกับโปรแกรมที่จะออกแบบ ซึ่งอาจจะต้องมีความเร็วในการประมวลผลเพื่อประโยชน์ในการทำงาน และค้นหาข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการชนิดต่างๆ ที่เชื่อถือได้เพื่อประโยชน์ในการใช้อ้างอิง
3. ออกแบบโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัด เขียนโปรแกรมตามที่ได้ออกแบบไว้
4. ทดสอบและปรับปรุงการทำงานของโปรแกรมกับกรณีศึกษาแบบต่างๆ โดยใช้ข้อมูลกรณีศึกษาต่างๆ จากบรรณานุกรม
5. เปรียบเทียบผลการทำงานของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการต่างๆ ที่ผ่านมา โดยเปรียบเทียบผลของค่าตอบแทนสุดท้ายสุดของกระบวนการค้นหา
6. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
7. เรียบเรียงผลงานวิจัย พิมพ์ผลงานและจัดเข้ารูปเล่มเพื่อนำเสนอต่อคณะกรรมการ

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ปัญหาการหาค่ากำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่ร่วมกันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด ในเวลาที่พิจารณาโดยจะต้องมีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าต่ำที่สุด โดยต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ ด้วย การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดสมัยเก่าจะนิยมใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดเพื่อเหมาะสมที่สุด ตัวอย่างเช่น วิธีการเท่ากันของแลมบ์ดา

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด เป็นปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นงานที่จะต้องกระทำเป็นประจำทุกวันในการดำเนินการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด โดยมีจุดประสงค์ คือต้องการให้ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้ามีต้นทุนที่ต่ำที่สุด โดยจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขต่างๆ ด้วย ตัวอย่างเช่น เงื่อนไขขีดจำกัดกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องที่ร่วมกันจ่ายโหลด เป็นต้น

2.1 การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการต่างๆ

การหาผลลัพธ์จากปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ยังคงเป็นปัญหาที่น่าสนใจและยังคงมีการพัฒนาเทคนิควิธีการต่างๆ มาแก้ปัญหานี้โดยตลอด วิธีต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด พอสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1) Simulated Annealing (SA)
- 2) Genetic Algorithm (GA)
- 3) Hopfield Neural Network (HNN)

แต่ละวิธีการมีหลักการพื้นฐานแตกต่างกัน ซึ่งเป็นแนวคิดที่ประยุกต์มาจากสภาพต่างๆ ในทางกายภาพ หลักการพื้นฐานของวิธีการต่างๆ พอสรุปได้ดังนี้

2.1.1 วิธีวิฆูมเลตเตด แอนนีลิ่ง (Simulated Annealing, SA)

วิธีวิฆูมเลตเตด แอนนีลิ่ง เป็นเทคนิคในการหาค่าที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง เนื่องจากวิธีการนี้สามารถเข้าสู่หาคำตอบใกล้เคียงคำตอบที่เหมาะสมแบบทั่วไปได้ วิธีการนี้มีความคล้ายคลึงกับวิธีการแบบวิธีการค้นหาแบบโลคอล (local search, LS) ซึ่งได้คำตอบเป็นคำตอบที่

เหมาะสมเฉพาะถิ่นเท่านั้น อย่างไรก็ตามวิธี SA ใช้ประโยชน์จากความน่าจะเป็นในการเลือกยอมรับคำตอบจากคำตอบสมาชิก (candidate solution) ในกระบวนการค้นหาเพื่อกระโดดออกจากคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะถิ่นได้ วิธี SA ได้ถูกนำมาประยุกต์ในการหาค่าที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลังอย่างมากมาย แต่อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการทำงานเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก และเวลาที่ใช้ในการคำนวณสูงเมื่อนำไปประยุกต์แก้ปัญหาจริง

การประยุกต์ใช้วิธี SA สำหรับแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด เปรียบปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเสมือนกับการเย็นตัวของโลหะ การเย็นตัวของโลหะแบบช้าๆ นั้นสามารถเปรียบเทียบให้เข้ากับความต้องการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด โดยความต้องการนั้นคือคำตอบกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด ซึ่งคำตอบของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด อาจจะออกแบบให้ค่าเริ่มต้นเป็นแบบสุ่ม และคำตอบในรอบถัดๆ ไป จะยอมรับได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับว่ามีค่าน้อยกว่าคำตอบในรอบที่แล้วหรือไม่ หรือขึ้นอยู่กับค่าความเป็นไปได้ ในแต่ละรอบจะได้คำตอบที่มีค่าใช้จ่ายที่ลดน้อยลงเรื่อยๆ จนกระทั่งเข้าสู่ค่าที่ดีที่สุดในรอบสุดท้าย สำหรับงานวิจัยที่นำวิธีชีววิวัฒนาการ แอนนิลลิ่ง เข้ามาแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดประกอบด้วย [11], [14-15] หลักการคำนวณแบบชีววิวัฒนาการ แอนนิลลิ่งจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันการยอมรับ ซึ่งจะเลือกคำตอบจากสถานะ (state space) ต่างๆ ขึ้นมาด้วยวิธีการสุ่มและจะยอมรับคำตอบจากสถานะที่ถูกเลือกขึ้นมา ถ้าคำตอบที่ได้ค่าน้อยกว่าคำตอบ ณ ขณะนั้น แต่ถ้าคำตอบที่ได้ไม่ใช่ว่าค่าน้อยกว่า ก็จะยอมรับเป็นคำตอบด้วยกฎเกณฑ์ความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นที่จะยอมรับมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิหรือค่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนด

2.1.2 วิธีจีเนติก อัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA)

วิธีจีเนติก อัลกอริทึม เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากในการนำมาประยุกต์ เพื่อใช้แก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด วิธีจีเนติก อัลกอริทึมได้ถูกนำเสนอโดย J. H. Holland [36] ในปี ค.ศ. 1970 วิธีจีเนติก อัลกอริทึม เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบสุ่ม โดยเลียนแบบการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ วิธี GA ทำงานอยู่บนพื้นฐานของจำนวนของสมาชิกคำตอบที่เหมาะสมที่ถูกเข้ารหัสเป็นเลขฐานสอง ซึ่งเรียกว่า โครโมโซม ในการหาค่าตอบที่เหมาะสมโครโมโซมแต่ละโครโมโซมจะมีการแลกเปลี่ยนซึ่งกันและกันเพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีขึ้น วิธี GA ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีรูปแบบดั้งเดิมในการค้นหาค่าตอบ ไม่มีการหาค่าอนุพันธ์หรือใช้ความรู้อื่นๆ เข้าช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วิธีจีเนติก อัลกอริทึม เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบสุ่มวิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นการจำลองปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด เปรียบเสมือนกับวิธีทางพันธุกรรม วิธีการเชิงพันธุกรรมนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาไปสู่สิ่งที่ดีขึ้น ดังนั้นปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด สามารถจำลองให้เข้ากับรูปแบบการผลิตไฟฟ้าได้ โดยสิ่งที่ต้องการให้ดีขึ้นคือราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้า วิธีจีเนติกมี

โครโมโซมเป็นตัวบ่งชี้ลักษณะการถ่ายโอนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลักษณะเริ่มต้นของโครโมโซม ได้จากการสุ่ม และในแต่ละรอบของการสร้างชุดโครโมโซมใหม่ จะเป็นลักษณะการจำลองเชิงทางพันธุกรรม ซึ่งคำตอบที่ดีขึ้นของปัญหาการถ่ายโอนอย่างประหยัด เปรียบเสมือนกับการอยู่รอดทางพันธุกรรม

2.1.3 วิธีฮอปฟิลด์ นิวรอลเน็ตเวิร์ค (Hopfield Neural Network, HNN)

โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) ได้เริ่มมีการศึกษานานนับมาตั้งแต่ ค.ศ. 1940 โดยในช่วงเวลาที่ก่อให้เกิดสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดต่างๆ คือในปี ค.ศ. 1943 Warren McCulloch และ Walter Pitts ได้ออกแบบนิวรอลที่ถือเป็นต้นกำเนิดและพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมในปัจจุบัน

บทความที่วิจัยบางส่วนที่นำเสนอโดย Hopfield ได้เป็นจุดเริ่มต้นในการเปิดศักราชใหม่ของวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมสมัยใหม่ ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประยุกต์วิธีการนี้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ถูกนำเสนอในวารสาร Power Engineering Journal โดยแบ่งออกเป็นสามตอน คือ ตอนที่ 1 บทความที่ตีพิมพ์ในเดือนมิถุนายนในปี 1997 ตอนที่ 2 เดือนกุมภาพันธ์ปี 1998 และตอนที่ 3 เดือนธันวาคมในปี 1998 วิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบ Hopfield มีลักษณะโครงข่ายแบบรีเคอร์เรนต์ (recurrent network) ซึ่งอาศัยความเข้าใจทางฟิสิกส์อย่างลึกซึ้ง นั่นคือ มีการเก็บส่วนการติดต่อที่มีสถานะอยู่ตัวแล้ว (stable configuration) สิ่งจำเป็นที่สุดในการประยุกต์ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบฮอปฟิลด์ เพื่อแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ การประยุกต์ใช้ฟังก์ชันกำลัง (energy function) ของวิธีการนี้ให้สมมูลกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสม จากนั้นกระบวนการค้นหาที่เหมาะสมของฟังก์ชันกำลังของวิธีการนี้ ก็เปรียบได้กับการค้นหาที่เหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมนั่นเอง ขอบเขตเงื่อนไขในการค้นหาสามารถประยุกต์เข้ากับวิธีการนี้โดยการป้อนกลับค่าตัวแปรที่ได้จากโครงข่าย (คือ การคำนวณหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม) ที่ไม่มีเงื่อนไขไปยังโครงข่ายที่มีเงื่อนไข (นั่นคือ การคำนวณฟังก์ชันที่มีขอบเขต) ดังนั้น สิ่งสำคัญที่สุดในการประยุกต์ใช้วิธีการนี้ คือการสร้างโครงข่ายให้สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่นการกำหนดค่าน้ำหนัก (weights) ของการเชื่อมโยงในโครงข่ายต่างๆ ฟังก์ชันเทรชโฮลด์ (threshold) ที่ใช้กำหนดระดับเอาต์พุต เป็นต้น

บทที่ 3

การไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษาเกี่ยวกับการไหลของกำลังไฟฟ้า (power flow) ได้ถูกนำมาใช้ในการวางแผนควบคุมการทำงานของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีอยู่ในปัจจุบัน ขณะเดียวกันก็ใช้ในการวางแผนระบบไฟฟ้าที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต การที่จะทำให้ระบบไฟฟ้าทำงานอย่างถูกต้อง จำเป็นจะต้องทราบถึงผลกระทบของการเชื่อมต่อระบบภายใน การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าเพิ่มเติมเข้าไปในระบบ การติดตั้งสถานีผลิตไฟฟ้าเพิ่มหรือการต่อสายส่งเพิ่มเข้าไปในระบบจะมีผลอย่างไร ก่อนที่สิ่งต่างๆ เหล่านี้จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบ การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าทำให้ทราบว่า ขนาดหรือตำแหน่งของคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมในการติดตั้งเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง หรือการรักษาระดับแรงดันที่บัสต่างๆ ของระบบไฟฟ้า การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าช่วยให้เราทราบตำแหน่งที่จะติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของโรงไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าย่อยหรือสายส่งใหม่ที่ต้องการเพิ่มเข้าไปในระบบ

ในระบบไฟฟ้ากำลัง การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าจะถูกนำไปใช้เพื่อทำนายสถานการณ์ต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าภายใต้สถานการณ์ที่เราต้องการรู้ เช่น ขนาดของอุปกรณ์ตรวจจับสถานะโหลดเกิน และขีดจำกัดของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า การวิเคราะห์คอนทินเจนซี (contingency) เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดมีความเกี่ยวข้องกับการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบที่กำลังพิจารณาเพื่อทดสอบผลกระทบของการควบคุมไม่ได้ (outage) ของสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทราบได้หลังจากการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า คือ ขนาดและมุมของแรงดันของแต่ละบัส รวมถึงกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งแต่ละสาย

3.1 ชนิดของบัสในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

โดยทั่วไปบัสในระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ บัสเครื่องกำเนิด บัสโหลด และบัสอ้างอิง ในแต่ละบัสจะมีปริมาณที่ทราบค่าอยู่ 4 ค่า ประกอบด้วย

- 1) ขนาดของแรงดัน ($|V|$)
- 2) มุมของแรงดันไฟฟ้า (Φ)
- 3) กำลังไฟฟ้าจริง (P)
- 4) กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q)

ในแต่ละบัสจะกำหนดปริมาณต่างๆ ดังนี้

1. บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (หรือบัสควบคุมแรงดัน) ซึ่งเราเรียกว่า $P-V$ บัส ที่บัสนี้จะรู้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้า

2. โหลดบัสหรือเรียกว่า $P-Q$ บัส ที่บัสนี้จะรู้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ
3. บัสอ้างอิง ที่บัสนี้ขนาดแรงดันและมุมเฟสของแรงดันเป็นตัวแปรที่รู้ค่า บัสนี้มีหน้าที่ในการเสริมกำลังไฟฟารีแอกทีฟ เนื่องจากปริมาณกำลังไฟฟ้าทั้งสองที่บัสนี้ไม่สามารถรู้ได้จนกว่าการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจะลู่อเข้าสู่จุดที่เรากำหนด นั่นคือ ค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 ปริมาณต่างๆที่ต้องกำหนดสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ชนิดของบัส	P	Q	$ V $	ϕ	รายละเอียด
บัสควบคุมแรงดัน	ทราบ	-	ทราบ	-	กำหนดให้ $ V $ มีค่าคงที่ตลอด โดยที่ค่า Q มีค่าเท่าไรก็ได้
บัสเครื่องกำเนิด	ทราบ	-	ทราบ ($Q^{\min} < Q_g$ $Q_g < Q^{\max}$)	-	ในกรณีที่เครื่องกำเนิดมีค่า Var จำกัด Q^{\min} แทนค่าต่ำสุดของ Var Q^{\max} แทนค่าสูงสุดของ Var ค่า $ V $ จะมีค่าคงที่ทราบที่ค่า Q_g อยู่ในขอบเขต
	ทราบ	ทราบ $Q_g < Q^{\min}$ $Q_g < Q^{\max}$	-	-	
บัสอ้างอิง	-	-	ทราบ	ทราบ	เป็นบัสที่คอยจ่าย กำลังไฟฟ้าชดเชยให้กับบัสอื่นๆ โดยที่แรงดันไม่เปลี่ยนแปลง
บัสโหลด	ทราบ	ทราบ	-	-	แทนบัสโหลดใดๆ

ในบางปัญหาที่กำหนดว่าบัสใดเป็นบัสอ้างอิง โดยทั่วไปแล้วจะกำหนดให้บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีค่าพิกัดสูงสุดเป็นบัสอ้างอิง ซึ่งบัสอ้างอิงอาจมีได้มากกว่าหนึ่งบัสก็ได้ ตารางที่ 3.1 กล่าวถึงรายละเอียดปริมาณต่างๆ ในแต่ละบัสที่กำหนดเพื่อเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ไม่เพียงคำนึงถึงระบบกลไกต่างๆ ที่ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเท่านั้น แต่ยังคำนึงถึงการเลือกจุดเหมาะสมที่สุดสำหรับการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ ซึ่งสามารถสรุปข้อดีของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

- 1) การเชื่อมโยงสายส่งสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นั่นคือสายส่งที่มาเชื่อมต่อไม่ต้องทำงานที่สภาวะใกล้จุดไม่เสถียรภาพ หรือจุดที่เกินขอบเขตขีดจำกัดปริมาณความร้อน เนื่องจากสามารถทำนายค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งได้
- 2) มีความจำเป็นที่ต้องจะรักษาระดับแรงดันที่บัสต่างๆ ให้อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งจะทำให้เราสามารถจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้
- 3) ถ้าระบบที่เราสนใจเป็นส่วนหนึ่งของตลาดกลางไฟฟ้าขนาดใหญ่ ระบบที่เราศึกษานี้อาจจะเป็นตัวเลือกให้เป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่างระบบเชื่อมโยงอื่นๆ กับระบบที่อยู่ใกล้เคียงกัน

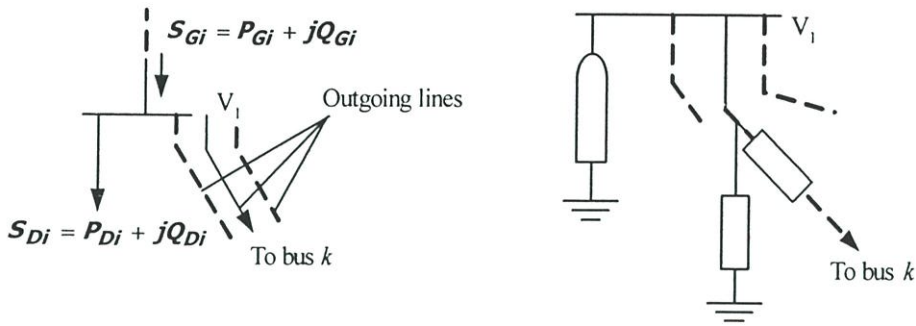
ปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้าแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

- 1) สูตรหรือแบบจำลองระบบต้องถูกต้องตามหลักคณิตศาสตร์ จะต้องอธิบายความเกี่ยวข้องกับระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้าภายในระบบนั้นๆ ได้
- 2) การกำหนดเงื่อนไขบังคับทั้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันควรจะทำหลายๆ บัสในระบบ
- 3) การคำนวณเชิงตัวเลขควรพิจารณาเงื่อนไขที่กำหนดด้วย ซึ่งการคำนวณนี้อาจจะประกอบด้วยความถูกต้องของพารามิเตอร์ต่างๆ รวมถึงแรงดันที่บัสต่างๆ ทุกบัส
- 4) เมื่อใดที่บัสแรงดันถูกกำหนดขึ้นมา การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเชื่อมโยงทั้งหมดจะถูกคำนวณ

3.2 รูปแบบทั่วไปของการไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจะใช้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้แผนภาพประกอบในการอธิบายเพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เราเรียกว่า “สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power-flow equation)” ในรูปที่ 3.1 ถ้าพิจารณาที่บัส i ก็สามารถหา กำลังไฟฟ้าปรากฏที่บัส i ได้คือ

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} = P_{Gi} - P_{Di} + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1 ลักษณะการไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัสต่างๆ

สายส่งจะเชื่อมต่อบัส i ไปยังบัสที่ k ใดๆที่อยู่ในระบบ ส่วนมากจะมีสายส่งที่ต่อออกไปเป็นจำนวน $n-1$ ซึ่งแต่ละสายส่งจะมีแบบจำลองเป็นวงจรสมมูลย์แบบ (π equivalent) ซึ่งอาจจะต่อแบบอนุกรม Y_{sik} หรือ ต่อแบบขนาน Y_{pik} ถ้าบัสใดไม่มีสายส่งเชื่อมต่อถึงกัน ค่าแอดมิตแดนซ์ก็จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสมการกระแสสมมูล คือ

$$\begin{aligned}
 I_i &= \frac{S_i^*}{V_i^*} = V_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n y_{pik} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n y_{sik} (V_i - V_k) \\
 &= V_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n y_{sik} (V_i - V_k) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (-y_{sik}) V_k \quad \text{โดยที่ } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 3.2 สมการเขียนใหม่ได้คือ

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{ii}V_i + \dots + Y_{in}V_n \quad \text{โดยที่ } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.3)$$

$$Y_{ii} \equiv \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (y_{pik} - y_{sik}) \quad (3.4)$$

และ

$$Y_{ik} = Y_{ki} \equiv -\frac{1}{2} y_{sik} \quad (3.5)$$

โดยที่เวกเตอร์กระแสและแรงดันที่บัสใดๆ คือ

$$bus = \begin{bmatrix} I_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$bus = \begin{bmatrix} V_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix}$$

บัสแอดมิตแตนซ์และบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ เขียนได้ดังนี้

$$bus = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdot & \cdot & Y_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{n1} & \cdot & \cdot & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$bus = bus^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdot & \cdot & Z_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{n1} & \cdot & \cdot & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

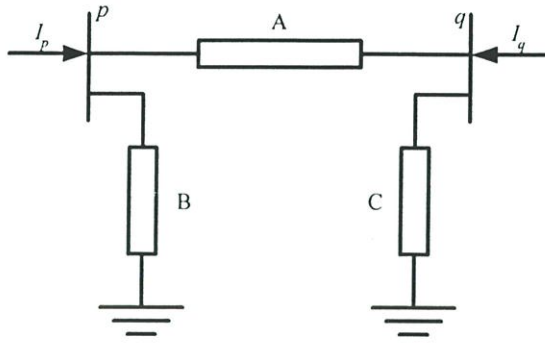
3.3 บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์เมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากหม้อแปลง

โดยทั่วไปหม้อแปลงที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. หม้อแปลงแบบอัตราจำนวนรอบคงที่ (fixed tap transformer)
2. หม้อแปลงแบบสามารถเปลี่ยนอัตราส่วนรอบได้ตามสภาวะโหลด (tap changing under load transformer, TCUL)
3. หม้อแปลงแบบเลื่อนเฟส (phase-shifting transformer)

3.3.1 หม้อแปลงแบบอัตราส่วนจำนวนรอบคงที่

หม้อแปลงแบบอัตราส่วนจำนวนรอบคงที่ สามารถแทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแตนซ์ Y_{pq} ต่อแบบอนุกรมกับหม้อแปลงแบบอุดมคติ จากรูปที่ 3.2 หม้อแปลงต่ออยู่ที่บัส p โดยต่อกับสายส่ง L_{p-q} อัตราส่วนของหม้อแปลงคือ



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลแบบพายนของหม้อแปลงแบบแท่งที่

$$\frac{V_p}{V_q} = \frac{i_q}{I_p} = a \quad (3.8)$$

เนื่องจากว่า

$$I_p = \frac{i_p}{a} = (V_t - V_q) \frac{y_{pq}}{a} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ 3.8

$$V_t = \frac{V_p}{a} \quad (3.10)$$

แทนสมการ 3.10 ในสมการ 3.9 จะได้

$$I_p = (V_p - aV_q) \frac{y_{pq}}{a^2} \quad (3.11)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} I_p &= (V_q - V_t) y_{pq} \\ &= (aV_q - V_p) \frac{y_{pq}}{a} \end{aligned} \quad (3.12)$$

เมื่อหม้อแปลงถูกต่อเข้ากับบัส p พร้อมด้วยสายส่ง $p-q$ เราสามารถแทนหม้อแปลงได้โดยวงจรสมมูลแบบพาย (π) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จากรูปที่ 3.2 กระแสในวงจรสมมูล คือ

$$I_p = [V_p - V_q]A + V_p B \quad (3.13)$$

$$I_q = [V_q - V_p]A + V_q C \quad (3.14)$$

ดังนั้นสามารถสร้างสมการกระแส I_p และ I_q ที่หัวของหม้อแปลง จากรูปที่ 3.2 ให้ $V_p = 0$, $V_q = 1$ จะได้สมการ 3.11 และ 3.13 ใหม่ดังนี้

$$I_p = -\frac{y_{pq}}{a} - A$$

นั่นคือ

$$A = \frac{y_{pq}}{a} \quad (3.15)$$

ในการทำงานเดียวกัน เราจะได้

$$I_q = Y_{pq} = A + C$$

โดยที่

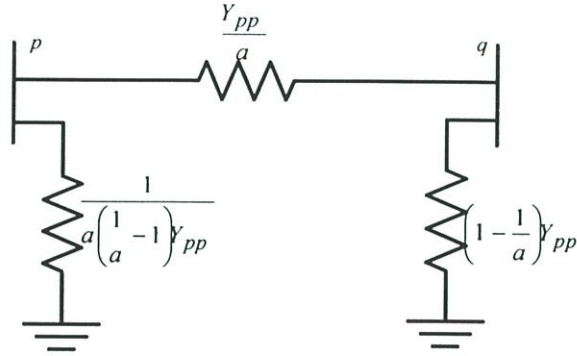
$$\begin{aligned} C &= y_{pq} - A = y_{pq} - \frac{y_{pq}}{a} \\ &= \left(1 - \frac{1}{a}\right)y_{pq} \end{aligned} \quad (3.16)$$

ในการทำงานเดียวกัน ค่า B ก็สามารถหาได้จากค่ากระแส I_p จากสมการที่ 3.11 และ 3.13
นั่นคือ

$$(V_p - aV_q)\frac{Y_{pq}}{a^2} = (V_p - V_q)A + V_p B \quad (3.17)$$

แทนค่า $A = \frac{Y_{pq}}{a}$ และให้ $V_p = 1$, $V_q = 0$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 B &= \frac{Y_{pq}}{a^2} - \frac{y_{pq}}{a} = \left[\frac{1}{a^2} - \frac{1}{a} \right] y_{pq} \\
 &= \frac{1}{a} \left[\frac{1}{a} - 1 \right] y_{pq}
 \end{aligned} \tag{3.18}$$



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลแบบพายน้ของหม้อแปลง

จากรูปที่ 3.2 เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ A, B และ C จะได้วงจรใหม่ในรูปที่ 3.3 ดังนั้น การแทนหม้อแปลงแบบนี้ลงในแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ bus จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 Y_{pp} &= y_{p1} + \dots + \frac{y_{pq}}{a} + \dots + y_{pn} + \frac{1}{a} \left[\frac{1}{a} - 1 \right] y_{pq} \\
 &= y_{p1} + \dots + \frac{y_{pq}}{a^2} + \dots + y_{pn}
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไป คือ

$$Y_{pq} = Y_{qp} = -\frac{y_{pq}}{a} \tag{3.20}$$

ในขณะที่ Y_{pq} ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

$$\begin{aligned}
 Y_{pp} &= y_{q1} + \dots + y_{pq} + \dots + y_{qn} \dots \left[1 - \frac{1}{a} \right] y_{pq} \\
 &= y_{q1} + \dots + y_{qp} + \dots + y_{qn}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

3.3.2 หม้อแปลงแบบเปลี่ยนอัตราส่วนได้ตามสภาวะโหลด

ในกรณีนี้ แท่งของหม้อแปลงสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อทำหน้าที่รักษาขนาดของแรงดันให้อยู่ขอบเขตที่ยอมรับได้ โดยปกติแล้วอัตราส่วนจำนวนรอบจะถูกปรับเปลี่ยนครั้งละประมาณ 2 รอบ และจะสัมพันธ์กับค่า Y_{pp} , Y_{pq} และ Y_{qq} ซึ่งจะถูกคำนวณเหมือนกับที่บัส P ใดๆ เราจะได้

$$|V_{pk} - V_p(\text{scheduled})| < \rho \quad (3.22)$$

อย่างไรก็ตามเพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์แบบอนุกรมของวงจรสมมูลแบบพายนจะสมมติให้มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์แบบอนุกรมของหม้อแปลง และค่าพารามิเตอร์แบบขนานคือ B และ C จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนของหม้อแปลงมีการเปลี่ยนแปลง

$$(V_p - V_q)A + V_p B = (V_p - aV_q) \frac{y_{pq}}{a^2} \quad (3.23)$$

โดยที่ $A = Y_{pq}$ ดังนั้น

$$(V_p - V_q)y_{pq} + v_p B = (V_p - aV_q) \frac{y_{pq}}{a^2} \quad (3.24)$$

จากสมการกระแส I_p สมการ 3.11 และ 3.13 เขียนให้ง่ายขึ้นโดยการแทน $A = Y_{pq}$ เราจะได้

$$[V_q - V_p]y_{pq} + v_q C = (aV_q - V_p) \frac{y_{pq}}{a} \quad (3.25)$$

ดังนั้นจะได้

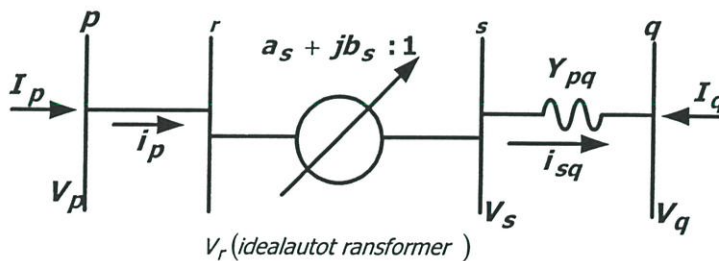
$$C = \left(1 - \frac{1}{a}\right) y_{pq} \frac{V_p}{V_q} \quad (3.26)$$

ดังนั้นจากสมการแอดมิตแตนซ์จะมี Y_{qq} และ Y_{pp} เท่านั้นที่ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง

3.3.3 หม้อแปลงแบบเลื่อนเฟส

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงมีผลต่อการควบคุมแรงดัน และ ยังส่งผลต่อการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วย นอกจากนี้แล้วเรายังสามารถควบคุมการเปลี่ยนมุมของแรงดันได้โดยการใช้หม้อแปลง ซึ่งจะส่งผลต่อการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงด้วย หม้อแปลงพิเศษนี้เรียกว่า “หม้อแปลงแบบเลื่อนเฟส” หรืออาจเรียกง่ายๆ ว่า “ตัวเลื่อนเฟส” เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้จะมีข้อจำกัดต่างๆ คือ ขีดจำกัดของย่านอัตราส่วนของจำนวนรอบ (tap-setting range) ขนาดของมุมที่เลื่อน (phase-shift range) และขนาดพิกัดของหม้อแปลงเอง ดังนั้น การนำอุปกรณ์เหล่านี้มาใช้งานต้องคำนึงถึงต้นทุนด้วยเช่นกัน ตัวเลื่อนเฟสมีราคาค่อนข้างสูง และทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อคำนึงถึงด้านเศรษฐศาสตร์ แต่ก็ยังเป็นทางเลือกที่วิธีหนึ่งที่ยอมรับกันในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง วิธีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสคือการติดตั้งภายในระหว่างบัสเชื่อมต่อใดๆ โดย มีจุดประสงค์หลักคือ การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างบัส

ตัวเลื่อนเฟสเป็นอุปกรณ์แบบสามเฟสโดยใช้หลักการติดตั้งแหล่งจ่ายแรงดัน V_{ser} ระหว่างสายส่งแต่ละสาย ถ้าแรงดัน V_{ser} ไม่อินเฟสกับแรงดันระหว่างสายกับนิวทรัลของแหล่งจ่าย V_{an} แรงดันเอาต์พุตของตัวเลื่อนเฟส V_{an}^{-1} จะถูกควบคุม ดังนั้นมุมของ V_{an}^{-1} จะขึ้นอยู่กับ V_{ser} และขนาดของแรงดัน V_{an}^{-1} ก็จะแปรค่าตาม V_{ser} ด้วย ดังนั้นเราสามารถสร้างตัวควบคุมมุมของแรงดัน V_{an}^{-1} ให้มีขนาดต่างๆ ได้ ในขณะที่ขนาดของแรงดัน V_{an}^{-1} ยังมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งรายละเอียดขนาดแรงดัน $|V_{an}^{-1}|$ ที่แปรเปลี่ยนเนื่องจากการเปลี่ยนมุมนั้นจะมีค่ามากขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในการออกแบบตัวเลื่อนเฟส



รูปที่ 3.4 แบบจำลองของหม้อแปลงแบบเลื่อนเฟส

แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลื่อนเฟสประกอบด้วย หม้อแปลงอุดมคติต่อร่วมกับอัตราส่วนที่เป็นค่าเชิงซ้อน $(a + jb)$ และต่ออนุกรมกับค่าอิมพีแดนซ์หรือค่าแอดมิตแตนซ์ Y_{pq} ดังรูปที่ 3.4 จากรูปจะทราบว่า $V_p = V_r$ ดังนั้น

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{V_r}{V_s} = a_s + jb_s \quad (3.26)$$

เนื่องจากกำลังสูญเสียในหม้อแปลงอุดมคติไม่นำมาพิจารณา ดังนั้น จากรูปที่ 3.4

$$V_p^* i_{pr} = V_s^* i_{sq}$$

นั่นคือ

$$\frac{i_{sq}}{i_{pr}} = \frac{V_p^*}{V_s^*} = a_s - jb_s \quad (3.27)$$

ในขณะที่

$$i_{sq} = (V_s - V_q)^* y_{pq}$$

ดังนั้น

$$i_{pr} = \frac{i_{sq}}{a_s - jb_s} = [(V_s - V_q)] \frac{y_{pq}}{(a_s - jb_s)} \quad (3.28)$$

แต่เนื่องจากว่า

$$V_s = \frac{V_p}{a_s + jb_s} \quad (3.29)$$

แทนสมการ 3.29 ในสมการ 3.28 จะได้ว่า

$$i_{pr} = [(V_p - (a_s + jb_s)V_q)] \left(\frac{y_{pq}}{a_s^2 + b_s^2} \right) \quad (3.30)$$

ในการทำงานเดียวกัน

$$\begin{aligned} i_{qs} &= (V_q - V_s) y_{pq} \\ &= [(a_s + jb_s)V_q - V_p] \frac{y_{pq}}{a_s + jb_s} \end{aligned} \quad (3.31)$$

หลังจากนั้นทำการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของแอดมิตแตนซ์ Y_{Bus} โดยการทดสอบการลัดวงจร ค่าองค์ประกอบในแนวทแยงมุม คือ Y_{pp} สามารถหาได้โดยการต่อแหล่งจ่าย

แรงดันขนาด 1 หน่วย เข้าที่บัสที่ p^{th} และทำการลัดวงจรบัสอื่นๆ (นั่นคือ การแทนแรงดันที่บัสอื่นเท่ากับศูนย์) ดังนั้น

$$\begin{aligned} I_p &= Y_{pp} = I_{p1} + I_{p2} + \dots + i_{pr} \\ &= [V_p - V_1]Y_{p1} + [V_p - V_{p2}]y_{p2} + \dots + i_{pr} \\ &= y_{p1} + y_{p2} + \dots + [V_p - (a_s + jb_s)V_q] \frac{y_{pq}}{a_s^2 + b_s^2} \end{aligned} \quad (3.32)$$

เมื่อ $V_p = 1 p.u.$ และ $V_1 = 0$ โดยกำหนดให้ $i = 1, 2, \dots, n$ เมื่อ $i \neq p$ เราจะได้

$$I_p = Y_{pp} = y_{p1} + y_{p2} + \dots + \left(\frac{y_{pq}}{a_s^2 + b_s^2} \right) + \dots \quad (3.33)$$

ดังนั้นองค์ประกอบ Y_{pp} จะมีการเปลี่ยนแปลง ในทำนองเดียวกัน Y_{qq} สมการหาได้โดยการสมมติให้ $V_q = 1 p.u.$ และแรงดันที่บัสอื่นๆ กำหนดให้เท่ากับศูนย์ ดังนี้

$$\begin{aligned} I_q &= Y_{qq} = I_{q1} + I_{q2} + \dots + i_{qs} \\ &= [V_q - V_1]Y_{q1} + [V_q - V_2]y_{q2} + [(a_s + jb_s)V_q - V_p] \frac{y_{qq}}{a_s^2 + b_s^2} \end{aligned} \quad (3.34)$$

เนื่องจาก $V_q = 1 p.u.$ และแรงดันที่บัสอื่นๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ $V_1 = V_2 \dots = 0$ ดังนั้น

$$I_q = Y_{qq} = y_{q1} + y_{q2} + \dots + y_{pq} \quad (3.35)$$

ดังนั้นจะพบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ในแนวทแยงมุม

สำหรับแอดมิตแดนซ์ที่มีการต่อร่วม Y_{qp} กำหนดให้ $V_p = 1 p.u.$ และทำการวัดกระแส I_q ในขณะที่แรงดันที่บัสอื่นๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ (นั่นคือ $I_q = Y_{qp}V_p$) แต่เนื่องจากว่า $V_p = 1 p.u.$ จากสมการ 3.32 จะได้ว่า

$$I_q = Y_{qp} = - \frac{y_{pq}}{a_s^2 + b_s^2} \quad (3.36)$$

สำหรับ Y_{pq} เรากำหนดให้ $V_q = 1 p.u.$ และบัสอื่นทำการลัดวงจร ดังนั้นจากสมการ 3.32

$$I_p = Y_{pq} = -\frac{y_{pq}}{a_s - jb_s} \quad (3.37)$$

นอกจากนี้แล้วค่า $Y_{pq} \neq Y_{qp}$ ในขณะที่ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงเป็นค่าเชิงซ้อนนั้น คือ $a_s + jb_s = a[\cos\theta + j\sin\theta]$ ซึ่ง

$$|V_p| = a|V_s| \quad (3.38)$$

อย่างไรก็ตามถ้าค่า θ มีค่าเป็นบวก มุมของ $|V_p|$ จะมีค่าหน้า (leading) เมื่อเทียบกับ $|V_s|$ หรือ V_q

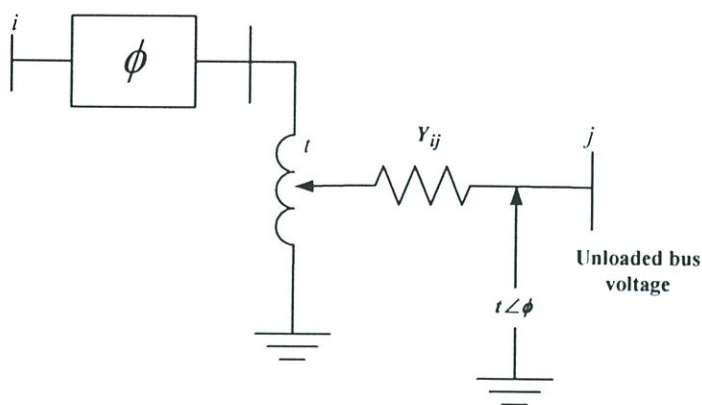
รูปที่ 3.5 แสดงแบบจำลองของตัวเลื่อนเฟสโดยที่ค่าขนาดแรงดันและมุมสามารถปรับเปลี่ยนได้ ตำแหน่งสมมูลของแทป คือ $t(\theta)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับค่ามุมปรับตั้ง (phase setting) เท่านั้น ในกรณีที่แรงดันมีการเปลี่ยนแปลง ค่า t จะมีค่าเท่ากับ 1 ค่าแอดมิตแตนซ์ของตัวเลื่อนเฟส คือ Y_{ij} วงจรสมมูลของตัวเลื่อนเฟสแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 จากรูปที่ 3.6 จะเห็นว่า

$$\begin{aligned} |V_i| &= |V_i'| \\ \delta_i' &= \delta_i + \phi \end{aligned}$$

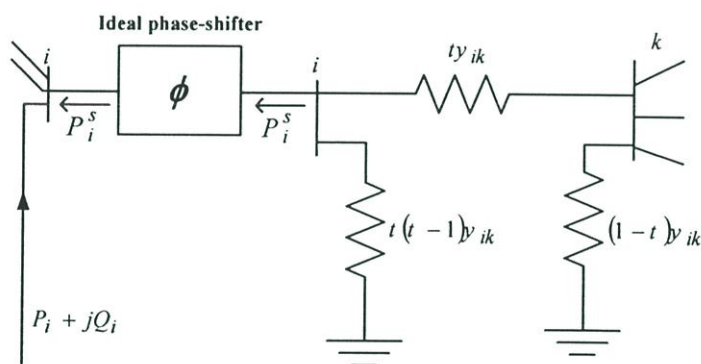
ค่ากำลังเชิงซ้อนแรงดันและกระแสที่ไหลเข้าไปที่ตัวเลื่อนเฟสที่บัส i จะถูกส่งผ่านไปยังบัส i' กำหนดให้บัส i' มีแอดมิตแตนซ์ที่ประกอบด้วย $[\delta \ V]_n$ มีค่า δ จะประกอบด้วยแอดมิตแตนซ์ย่อย ดังนั้นแทนแอดมิตแตนซ์นี้ด้วยตัวแปร δ_i' กำหนดให้ค่ามุมที่เลื่อนไปมีค่าเท่ากับ ϕ และเป็นตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่า

$$[\delta_2 \delta_3 \dots \delta_1 \phi \dots \delta_N \ V_2 \ V_3 \dots \ V_i \ V_{i+1} \dots]^T$$

จะสังเกตเห็นได้ว่า V_i' จะไม่มีค่าอยู่ในแอดมิตแตนซ์ย่อยของ $|V_{bus}|$ ดังนั้นค่าอนุพันธ์ย่อย $\frac{\partial}{\partial \delta_i'}$ และ $\frac{\partial}{\partial \delta_i}$ มีค่าเท่ากับ $\frac{\partial}{\partial \delta_i'}$ และ $\frac{\partial}{\partial \delta_i}$ ตามลำดับ เนื่องจาก $\delta_i' = \delta_i + \phi$ ดังนั้นองค์ประกอบของแรงดันที่หายไปคือ “Counter balance” นั่นคือว่า Δ ดังนั้นขนาดของ J คือ $2(N-1) - n\phi$ เมื่อ $n\phi$ คือ จำนวนตัวเลื่อนเฟสที่มีอยู่ในระบบ



รูปที่ 3.5 แบบจำลองที่สังเคราะห์แล้วของตัวเลื่อนเฟส



รูปที่ 3.6 แบบจำลองของตัวเลื่อนเฟส

ขั้นตอนการสร้างบัสที่มีตัวเลื่อนเฟสต่ออยู่ โดยที่ค่า ϕ สามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยตัวมันเองเพื่อให้ได้ค่า P_i^{ϕ} ที่จ่ายให้กับบัส i มีขั้นตอนดังนี้

1. สร้าง Y_{Bus} โดยใช้อัลกอริทึมแบบทั่วไป โดยยังไม่ต้องคำนึงถึงบัส i และ i' หรือบัส i และบัส k
2. ใช้วงจรสมมูลในรูปที่ 3.6 ต่อบัส i' และ k เข้ากับระบบ กำหนดค่าเริ่มต้นของมุม ϕ เพื่อหาค่า t เพราะโดยทั่วไปแล้วค่าสมมูลของ tap - setting จะแปรค่าตามมุม ϕ (ขึ้นอยู่กับการออกแบบ)
3. สร้างจาโคเบียนเมตริกซ์ กำจัดสมการ ΔQ ที่บัส i และกำจัดค่า $|V|$ ที่บัส i ออก
4. พิจารณากำลังไฟฟ้า P_i^{ϕ} ที่ไหลผ่านตัวเลื่อนเฟส ซึ่งเป็นกำลังที่จ่ายเข้าที่บัส i และส่งผ่านไปยังบัส i เท่านั้น
5. ทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจนกระทั่งมีการเข้าสู่ค่าตอบที่ยอมรับได้

ในแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ bus จะถูกใช้แทนอุปกรณ์แบบพาสซีฟของระบบที่มีจำนวน n บัส จากสมการ 3.4 และ 3.5 เราสามารถสรุปวิธีการสร้าง bus ได้ดังนี้

1. องค์ประกอบที่อยู่ในแนวทแยงมุม y_{ii} เป็นผลรวมของแอดมิตแตนซ์ ทั้งหมดที่มีอยู่ที่บัส i
2. องค์ประกอบที่อยู่นอกแนวทแยงมุม คือ $Y_{ik} = Y_{ki}$ เป็นแอดมิตแตนซ์ที่ต่ออยู่ระหว่างบัส i และ k และให้มีค่าเป็นค่าลบ

รูปแบบสมการในระบบไฟฟ้ากำลังที่อยู่ในรูปแบบของกำลังไฟฟ้าจะมีความนิยมนมากกว่าสมการที่อยู่ในรูปกระแส ดังนั้นทำให้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้ามี่ในรูปแบบเป็นสมการไม่เชิงเส้น

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \quad \text{โดยที่ } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.39)$$

สมการที่ 3.39 เป็นรูปแบบสมการการไหลกำลังไฟฟ้า จะสังเกตเห็นได้ว่ารูปแบบสมการจะเป็นสมการเชิงซ้อน ถ้าจำนวนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้ามีทั้งหมด n สมการ ดังนั้น จะมีสมการที่เป็นสมการจำนวนจริงและจินตภาพทั้งหมด $2n$ สมการ นั่นคือ

$$P_i = \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \equiv f_{ip} \quad (3.40)$$

$$Q_i = - \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \equiv f_{iq} \quad \text{โดยที่ } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.41)$$

สมการ 3.40 และ 3.41 เป็นสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในสถานะที่ระบบสมดุลที่บัส i กระแสที่ไหลใด ๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$P_i - jQ_i = (V_i^*) \sum_{j=1}^n (Y_{ij} V_j) \quad (3.42)$$

สมการ 3.42 สามารถกระจายให้อยู่ในรูปต่างๆ ได้ 2 ลักษณะ นั่นคือ สมการที่อยู่ในรูปพิกัดเชิงขั้ว (Rectangular Form) และสมการที่อยู่มนรูปโพลาร์ (Polar Form)

3.3.4 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบพิกัดเชิงขั้ว

ค่าแรงดันที่อยู่ด้านขวามือของสมการที่ 3.42 สามารถแทนได้ด้วยแรงดันที่อยู่ในรูปแบบพิกัดเชิงขั้ว นั่นคือ $V_j = e_j + jf_j$ ดังนั้นจะได้

$$P_i = e_i \left(\sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) \right) + f_i \left(\sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) \right) \quad (3.43)$$

$$Q_i = e_i \left(\sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) \right) + f_i \left(\sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) \right) \quad (3.44)$$

ค่าแอดมิตแตนซ์ จะเขียนให้อยู่ในรูปแบบพิกัดเชิงขั้ว นั่นคือ

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (3.45)$$

3.3.5 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบโพลาร์

แทนแรงดันที่บัสใดๆด้วย

$$\begin{aligned} V_i &= |V_i| e^{j\theta} \\ &= |V_i| \angle \theta_i \end{aligned} \quad (3.46)$$

จะทำให้ได้

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \psi_{ij}) \quad (3.47)$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \psi_{ij}) \quad (3.48)$$

โดยแทนค่าแอดมิตแตนซ์ Y_{ij} ให้อยู่ในรูปแบบโพลาร์ นั่นคือ $Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \psi_{ij}$

3.4 เทคนิคในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า

สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นกลุ่มของสมการที่ไม่เชิงเส้นดังนั้นในการหาผลเฉลยจะต้องอาศัยในการหาคำตอบแบบทำซ้ำ (iterative-techniques) วิธีการที่นิยมมีหลายวิธี เช่น วิธีการทำซ้ำแบบ เกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel iterative-technique) วิธีนิวตัน-ราฟสัน(Newton-Raphson

method) และวิธี ฟาสต์-ดีคัปเปิล นิวตัน (fast-decoupled Newton method) ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคการแก้ปัญหาค่าไหลของกำลังไฟฟ้า โดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

3.4.1 วิธีนิวตัน-ราฟสัน

3.4.1.1 การประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันแก้ปัญหาค่าสมการตัวแปรเดียว

วิธีนิวตัน-ราฟสัน เริ่มต้นโดยการสมมติให้คำตอบเริ่มต้นเป็น $x^{(0)}$ ขั้นตอนต่อไปเป็นการหาค่าผิดพลาด $\Delta x^{(0)}$ ที่มีค่าสัมพันธ์กับคำตอบเริ่มต้น โดยที่ค่า $x^{(0)} + \Delta x^{(0)}$ จะเป็นตัวกำหนดความถูกต้อง นั่นคือ เราต้องการให้

$$f(x^{(0)}) + \Delta x^{(0)} = 0 \quad (3.49)$$

ถ้าเรากระจาย $f(x)$ โดยวิธีเทย์เลอร์ซีรีส์รอบๆ คำตอบเริ่มต้น เราจะได้

$$f(x^{(0)}) + \Delta x^{(0)} \left(\frac{df}{dx} \right)^{(0)} + \frac{1}{2} (\Delta x^{(0)})^2 \left(\frac{d^2 f}{dx^2} \right)^{(0)} + \dots = 0 \quad (3.50)$$

เทอมที่เป็นค่าอนุพันธ์จะใช้คำนวณหาค่าเมื่อ $x = x^{(0)}$ ถ้าสมมติว่าค่าผิดพลาดมีค่าน้อยๆ แล้ว เทอมอนุพันธ์อันดับสูงๆ สามารถละทิ้งได้ ดังนั้นจะได้ว่า

$$f(x^{(0)}) + \Delta x^{(0)} \left(\frac{df}{dx} \right)^{(0)} \approx 0 \quad (3.51)$$

ดังนั้นเราสามารถประมาณค่าผิดพลาดได้

$$\Delta x^{(0)} = - \frac{f(x^{(0)})}{\left(\frac{df}{dx} \right)^{(0)}} \quad (3.52)$$

เราสามารถหาค่าเริ่มต้นในรอบต่อไปได้โดยการบวกค่าผิดพลาดเข้ากับค่าเริ่มต้น ดังนั้นเราจะได้คำตอบเริ่มต้นใหม่ $x^{(1)}$ คือ

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(0)} = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{\left(\frac{df}{dx} \right)^{(0)}}$$

โดยการทำซ้ำไปเรื่อยๆ ก็จะได้คำตอบขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาลักษณะนี้เรียกว่า “วิธีนิวตัน-กราฟสัน” และ อัลกอริทึมของวิธีนี้เขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$x^{(v+1)} = x^{(v)} - \frac{f(x^{(v)})}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(v)}} \quad (3.53)$$

3.4.1.2 การประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-กราฟสันแก้ปัญหาสมการแบบหลายตัวแปร

จากสมการ 3.47 นำมาพิจารณาเพื่อเป็นตัวอย่างของการแก้ปัญหาแบบหลายตัวแปรโดยใช้วิธีนิวตัน-กราฟสัน โดยการกระจายเทย์เลอร์ซีรีส์รอบๆ คำตอบเริ่มต้นของแต่ละสมการจะได้

$$X^{(0)} = \begin{bmatrix} 0 \\ X_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ X_n \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

และทำการหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งเทอมแรกของสมการจะได้

$$\begin{aligned} f_1(\cdot)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1 + \dots + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n &\approx 0 \\ f_n(\cdot)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1 + \dots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n &\approx 0 \end{aligned} \quad (3.55)$$

เราสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} f_1(\cdot)^{(0)} \\ \vdots \\ f_n(\cdot)^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \cdot & \cdot & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & & & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \cdot & \cdot & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

และเขียนให้อยู่ในรูปแบบกะทัดรัดได้ดังนี้

$$f(X^{(0)}) + J^{(0)} \Delta x^{(0)} \approx 0 \quad (3.56)$$

จากสมการ 3.56 เราสามารถหาค่าผิดพลาดได้

$$\Delta x^{(0)} \approx -[j^{(0)}]^{-1} f(x^{(0)}) \quad (3.57)$$

โดยการบวกสมการ 3.57 เข้ากับคำตอบเริ่มต้น และในขณะเดียวกันก็แสดงจำนวนรอบการคำนวณของกระบวนการของวิธีนิวตัน-ราฟสันด้วย ดังนั้นจะได้รูปแบบทั่วไปของวิธีการทำซ้ำแบบนิวตัน-ราฟสัน สำหรับแก้ปัญหสมการแบบหลายตัวแปรได้ดังนี้

$$x^{(v+1)} = x^{(v)} - [j^{(v)}]^{-1} f(x^{(v)}) \quad (3.58)$$

3.4.2 การประยุกต์ใช้นิวตัน-ราฟสันในการแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้า

รูปแบบสมการการไหลกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบโพลาร์ เมื่อประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน ในการแก้ปัญห กระทำได้โดยการกำหนดให้ที่บัส p ใดๆ มีค่าขนาดแรงดันดังนี้

$$V_i = |V_p| e^{j\delta_i} \quad \text{ดังนั้น} \quad V_i^* = |V_p| e^{-j\delta_i} \quad (3.59)$$

$$V_j = |V_q| e^{j\delta_j} \quad \text{ดังนั้น} \quad Y_{ij} = |Y_{ij}| e^{-j\theta_{ij}} \quad (3.60)$$

โดยที่ δ แทนมุมของแรงดันที่บัสใดๆ และ θ_{ij} แทนมุมของแอดมิตแตนซ์ นั่นคือที่บัสใดๆ

$$P_i - jQ_j = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (3.61)$$

แทนสมการ 3.41 ลงในสมการ 3.42

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| e^{-j(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j)} \quad (3.62)$$

ดังนั้น

$$P_i = \text{Real} \left[V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \right]$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{q=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \\
&= |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)
\end{aligned} \tag{3.63}$$

และ

$$\begin{aligned}
Q_i &= \text{Imaginary} \left[V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \right] \\
&= \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \\
&= |V_i V_i Y_{ii}| \sin(\theta_{ii}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)
\end{aligned} \tag{3.64}$$

โดยที่ $p=1,2,\dots,n-1$ โดยบัสที่ n^{th} เป็นบัสอ้างอิง สมการการไหลกำลังของไฟฟ้าในรูปแบบโพลาร์จะมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & \cdot & J_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ J_3 & \cdot & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \tag{3.65}$$

โดยที่ค่า J_1, J_2, J_3 และ J_4 เป็นองค์ประกอบของจาโคเบียนเมตริกซ์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.63 และ 3.64 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

องค์ประกอบของ J_1

องค์ประกอบในแนวทแยงมุม

$$\left. \frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} \right|_{p \neq q} = |V_p V_q Y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \tag{3.66}$$

องค์ประกอบนอกแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} = - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |V_p V_q Y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \tag{3.67}$$

องค์ประกอบของ J_2

องค์ประกอบในแนวทแยงมุม

$$\left. \frac{\partial P_p}{\partial |V_p|} \right|_{p \neq q} = |V_p Y_{pq}| \cos(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad (3.68)$$

องค์ประกอบนอกแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial P_p}{\partial |V_p|} = -2|V_p Y_{pq}| \cos(\theta_{pq}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |V_q Y_{pq}| \cos(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad (3.69)$$

องค์ประกอบของ J_3

องค์ประกอบในแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = -|V_p V_q Y_{pq}| \cos(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad (3.70)$$

องค์ประกอบนอกแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} = - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |V_p V_q Y_{pq}| \cos(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad (3.71)$$

องค์ประกอบของ J_4

องค์ประกอบในแนวทแยงมุม

$$\left. \frac{\partial Q_p}{\partial |V_q|} \right|_{p \neq q} = |V_p Y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad (3.72)$$

องค์ประกอบนอกแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial Q_p}{\partial |V_p|} = 2|V_p Y_{pp}| \sin(\theta_{pp}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |V_q Y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad (3.73)$$

องค์ประกอบของจาโคเบียนเมตริกซ์จะทำการคำนวณทุกครั้งที่ได้ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าในรอบการคำนวณครั้งล่าสุด

3.5 สมการความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบสายส่ง

ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ความสูญเสียของกำลังไฟฟ้าสายส่งบางครั้งจำเป็นต้องนำมาพิจารณาด้วย โดยที่สมการความสูญเสียในระบบสายส่งจะอยู่ในฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง โดยทั่วไปแล้วสามารถคำนวณหาฟังก์ชันความสูญเสียในสายส่งได้หลายวิธี และวิธีที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์เป็นวิธีที่เสนอโดย Kron และ Kirchmayer เรียกว่าวิธี “สัมประสิทธิ์ความสูญเสีย” หรือ “บีเมตริกซ์ (B-matrix)” ได้ดังต่อไปนี้ [26]

ถ้ากำหนดให้จำนวนไฟฟ้าปรากฏ S_i โหลดเข้าที่บัส i ดังสมการ

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (3.74)$$

ผลรวมของกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสจะแสดงถึงค่าความสูญเสียในระบบสายส่ง ดังสมการ

$$P_i + jQ_i = \sum_{i=1}^n V_i I_i^* = V_{bus}^T I_{bus}^T \quad (3.75)$$

โดยที่ P_L คือ ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงของระบบสายส่งทั้งหมด
 Q_L คือ ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าแฝงของระบบสายส่งทั้งหมด
 V_{bus} คือ เวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัส
 I_{bus} คือ เวกเตอร์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส

จัดรูปแบบเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบใหม่ดังนี้

$$V_{bus} = Y_{bus}^{-1} I_{bus} = Z_{bus} I_{bus} \quad (3.76)$$

โดยที่ส่วนกลับของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ ในสมการ 3.75 แสดงถึงบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ และค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์จะมีลักษณะไม่เป็นซิงกูลาร์ ถ้ามีส่วนของโครงข่ายที่ต่อขนานโดยตรงกับกราวด์ (บัสลำดับ 0) เช่น ค่าชั้สเซบแดนซ์ของคาปาซิเตอร์

โดยทั่วไปแล้วบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์จะมีลักษณะสเปาร์ กล่าวคือ ค่าเมตริกซ์จะรวมอยู่ในแนวทแยงมุม ($Y_{bus}(i, j) : i = j$) เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงของบัสต่างๆ ที่อยู่ใกล้กัน

แทนสมการ 3.76 ในสมการ 3.75 จะได้

$$P_L + jQ_L = [Z_{bus} I_{bus}]^T I_{bus}^* \quad (3.77)$$

เมตริกซ์ Z_{bus} ที่ได้จะมีลักษณะสมมาตร ดังนั้น $Z_{bus} = Z_{bus}^T$ และสมการความสูญเสียในระบบสายส่งจะกลายเป็น

$$P_L + jQ_L = Z_{bus} I_{bus}^T I_{bus}^* \quad (3.78)$$

โดยที่สมการดังกล่าวสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของดัชนีเมตริกซ์ดังนี้

$$P_L + jQ_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_i Z_{ij} I_j^* \quad (3.79)$$

และจากคุณลักษณะความสมมาตรของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$P_L + jQ_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Z_{ij} (I_i I_j^* + I_j I_i^*) \quad (3.80)$$

จะพบว่าค่าในวงเล็บของสมการ 3.80 จะเป็นค่าจำนวนจริง ดังนั้นค่าความสูญเสียในระบบสายส่งสามารถแยกออกได้เป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ประกอบด้วยค่าจำนวนจริงและส่วนที่ประกอบด้วยค่าจำนวนจินตภาพ ดังนี้

$$P_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} (I_i I_j^* + I_j I_i^*) \quad (3.81)$$

$$Q_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij} (I_i I_j^* + I_j I_i^*) \quad (3.82)$$

โดยที่ค่า R_{ij} และ X_{ij} คือส่วนประกอบที่เป็นจำนวนจริงและส่วนประกอบที่จำนวนจินตภาพของบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ตามลำดับ ถ้า $R_{ij} = R_{ji}$ สมการความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบสายส่งสามารถแปลงกลับไปเป็น

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_i R_{ij} I_j^* \quad (3.83)$$

หรือถ้าจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ จะได้

$$P_L = I_{bus}^T R_{bus} I_{bus}^* \quad (3.84)$$

โดยที่ R_{bus} คือ ส่วนประกอบค่าจำนวนจริงของบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

ในการสร้างสมการของความสูญเสียในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องนั้น จะพิจารณาได้จากกระแสโวลตรวม ดังสมการ

$$I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} + \dots + I_{Lnd} = I_D \quad (3.85)$$

โดยที่ n_d คือ จำนวนของบัสโหลด และ I_D คือกระแสโวลตรวม ถ้ากำหนดให้ค่ากระแสโวลตรวมในแต่ละบัสมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสโวลตรวม

$$I_{Lk} = I_k I_D \quad k = 1, 2, \dots, n_d \quad (3.86)$$

และถ้ากำหนดบัส 1 เป็นบัสอ้างอิง (สแลคบัส) จะได้สมการ

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \dots + Z_{1n}I_n \quad (3.87)$$

ซึ่งถ้ากำหนดให้ n_g คือ จำนวนบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สมการข้างต้นสามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของกระแสโวลตรวมและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้ดังนี้

$$V_1 = \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} + \sum_{k=1}^{n_d} Z_{1k} I_{Lk} \quad (3.88)$$

แทน I_{Lk} ในสมการ 3.86 ลงในสมการ 3.88 จะได้

$$\begin{aligned} V_1 &= \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} + I_D \sum_{k=1}^{n_d} Z_{1k} I_{Lk} \\ &= \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} + I_D^T \end{aligned} \quad (3.89)$$

โดยที่

$$T = \sum_{k=1}^{n_d} I_k Z_{1k} \quad (3.90)$$

ถ้ากำหนดให้ I_0 คือค่ากระแสที่ไหลออกจากบัส 1 โดยที่กระแสไหลกลับที่บัสอื่นมีค่าเป็น 0 จะทำให้

$$V_1 = -Z_{11} I_0 \quad (3.91)$$

แทนสมการ V_1 ในสมการ 3.89 และคำนวณหาค่า I_D จะได้

$$I_D = -\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} - \frac{1}{T} Z_{11} I_0 \quad (3.92)$$

จากนั้นแทนค่า I_D ที่ได้ลงในสมการ 3.86 ค่ากระแสไหลกลับสามารถเขียนได้เป็น

$$I_{Lk} = -\frac{l_k}{T} \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} - \frac{l_k}{T} Z_{11} I_0 \quad (3.93)$$

ซึ่งถ้า

$$\rho = -\frac{l_k}{T} \quad (3.94)$$

ดังนั้น

$$I_{Lk} = \rho_k \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} + \rho_k Z_{11} I_0 \quad (3.95)$$

ค่ากระแสทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_{g1} \\ I_{g2} \\ \vdots \\ I_{gn_g} \\ I_{L1} \\ I_{L2} \\ \vdots \\ I_{Ln_d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ \rho_1 Z_{11} & \rho_1 Z_{12} & \dots & \rho_1 Z_{1n_g} & \rho_1 Z_{11} \\ \rho_2 Z_{11} & \rho_2 Z_{11} & \dots & \rho_2 Z_{1n_g} & \rho_2 Z_{11} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_k Z_{11} & \rho_k Z_{12} & \dots & \rho_k Z_{1n_g} & \rho_k Z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{g1} \\ I_{g2} \\ \vdots \\ I_{gn_g} \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (3.96)$$

ถ้าแทนเมตริกซ์ข้างต้นด้วยตัวแปร C จะได้

$$I_{bus} = CI_{new} \quad (3.97)$$

นำค่า I_{bus} แทนค่าลงในสมการ ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_L &= [CI_{new}]^T C^* R_{bus} I_{new} \\ &= I_{new}^T C^T R_{bus} C^* I_{new} \end{aligned} \quad (3.98)$$

โดยถ้า S_{gi} คือค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส กระแสของหน่วยผลิตไฟฟ้าคือ

$$\begin{aligned} I_{gi} &= \frac{S_{gi}^*}{V_i^*} = \frac{P_{gi} + jQ_{gi}}{V_i^*} \\ &= \frac{1 - j \frac{Q_{gi}}{P_{gi}}}{V_i^*} P_{gi} \end{aligned} \quad (3.99)$$

หรือ

$$I_{gi} = \psi_i P_{gi} \quad (3.100)$$

โดยที่

$$\psi_i = \frac{1 - j \frac{Q_{gi}}{P_{gi}}}{V_i^*} \quad (3.101)$$

ถ้าเพิ่มกระแส I_0 ลงในเวกเตอร์กระแส I_{gi} จะได้

$$\begin{bmatrix} I_{g1} \\ I_{g2} \\ \vdots \\ I_{gn_g} \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \psi_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \psi_{n_g} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gn_g} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.102)$$

หรือ

$$I_{new} = \Psi P_{G1} \quad (3.103)$$

โดยที่

$$P_{G1} = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gn} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.104)$$

นำสมการ 3.101 แทนลงในสมการ 3.98 สมการความสูญเสียในระบบสายส่งจะได้เป็น

$$\begin{aligned} P_L &= [\Psi P_{G1}]^T C^T R_{bus} C^* \Psi^* P_{G1}^* \\ &= P_{G1}^T \Psi^T C^T R_{bus} C^* \Psi^* P_{G1}^* \end{aligned} \quad (3.105)$$

โดยค่าเมตริกซ์ที่ได้จะอยู่ในรูปค่าตัวประกอบเชิงเส้น ซึ่งถ้าพิจารณาค่าความสูญเสียในระบบสายส่งที่อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าจริงเพียงอย่างเดียวจากสมการข้างต้นส่วนประกอบที่เป็นจำนวนจริง คือ

$$P_L = P_{G1}^T \Re[H] P_{G1}^* \quad (3.106)$$

โดยที่

$$H = \Psi^T C^T R_{bus} C^* \Psi^* \quad (3.107)$$

เนื่องจากส่วนประกอบเมตริกซ์ H เป็นค่าจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นจะใช้เพียงส่วนประกอบค่าจำนวนจริงในการคำนวณหาค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงในระบบสายส่ง โดยเมตริกซ์ H จะเรียกว่าเฮอร์มิตเตียนที่เมตริกซ์ ซึ่งหมายความว่าเมตริกซ์ H มีลักษณะสมมาตร และ $H = H^*$ ดังนั้นค่าจำนวนจริงของเมตริกซ์ H จะสามารถคำนวณได้จาก

$$\Re[H] = \frac{H + H^*}{2} \quad (3.108)$$

ถ้าเขียน $\Re[H]$ ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์

$$\Re[H] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n_g} & \frac{B_{01}}{2} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n_g} & \frac{B_{02}}{2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ B_{n_g 1} & B_{n_g 2} & \cdots & B_{n_g n_g} & \frac{B_{0n_g}}{2} \\ \frac{B_{01}}{2} & \frac{B_{02}}{2} & \cdots & \frac{B_{0n_g}}{2} & B_{00} \end{bmatrix} \quad (3.109)$$

แทนค่าลงในสมการ 3.104 จะได้

$$P_L = \begin{bmatrix} P_{g1} & P_{g2} & \cdots & P_{gn_g} & 1 \\ B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n_g} & \frac{B_{01}}{2} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n_g} & \frac{B_{02}}{2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ B_{n_g 1} & B_{n_g 2} & \cdots & B_{n_g n_g} & \frac{B_{0n_g}}{2} \\ \frac{B_{01}}{2} & \frac{B_{02}}{2} & \cdots & \frac{B_{0n_g}}{2} & B_{00} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \cdots \\ P_{gn_g} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.110)$$

หรือ

$$P_L = \begin{bmatrix} P_{g1} & P_{g2} & \cdots & P_{gn_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n_g} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n_g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n_g 1} & B_{n_g 2} & \cdots & B_{n_g n_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \cdots \\ P_{gn_g} \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} P_{g1} & P_{g2} & \cdots & P_{gn_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{B_{01}}{2} \\ \frac{B_{02}}{2} \\ \cdots \\ \frac{B_{0n_g}}{2} \end{bmatrix} + B_{00} \quad (3.111)$$

โดยที่สมการความสูญเสียกำลังสายส่งไฟฟ้า สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_{i0} P_i + B_{00} \quad (3.112)$$

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = \frac{1}{1 - 2 \sum_{j=1}^n B_{ij} P_j - B_{i0}} \quad (3.113)$$

โดยที่ B_{ij}, B_{i0}, B_{00} คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียในระบบส่งไฟฟ้า

บทที่ 4

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

ในอดีตการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังมีจุดประสงค์เพื่อเป็นศูนย์กลางในการสั่งงาน หรือควบคุมระบบการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าต่างๆ เพื่อร่วมกันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดของระบบ ในปัจจุบันในระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการสร้างโรงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประกอบด้วยโรงไฟฟ้านิตต่างๆมากมาย เช่น โรงไฟฟ้าพลังความร้อนแก๊สและน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง โรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้ากำลังน้ำแบบสูบกลับ เป็นต้น เชื้อเพลิงแต่ละชนิดของแต่ละโรงไฟฟ้ามีเงื่อนไขและวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกัน แต่มีจุดมุ่งหมายเดียวกันคือ การผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้ตามความต้องการของโหลดโดยมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด การดำเนินการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าต่างๆ จะถูกกำหนดกำลังการผลิตโดยส่วนกลาง

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่แปรตามค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถึงแม้ว่าต้นทุนการผลิตจริงอาจจะต้องรวมเอาราคาในการลงทุนค่าบำรุงรักษา ค่าเสื่อมราคา หรืออื่นๆ ก็ตาม เนื่องจากการกำหนดฟังก์ชันต้นทุนการผลิตแบบนี้จะทำให้เราได้สมการที่สอดคล้องและง่ายต่อการคำนวณออกมาเป็นตัวเลข แม้ว่าเครื่องกำเนิดจะอยู่ในสถานะใดก็ตาม ตัวเลขที่คำนวณได้จากการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดจะมีหน่วยเป็นหน่วยราคาค่าเชื้อเพลิงต่อกำลังไฟฟ้า-ชั่วโมง หรือ ($\$/MWh$)

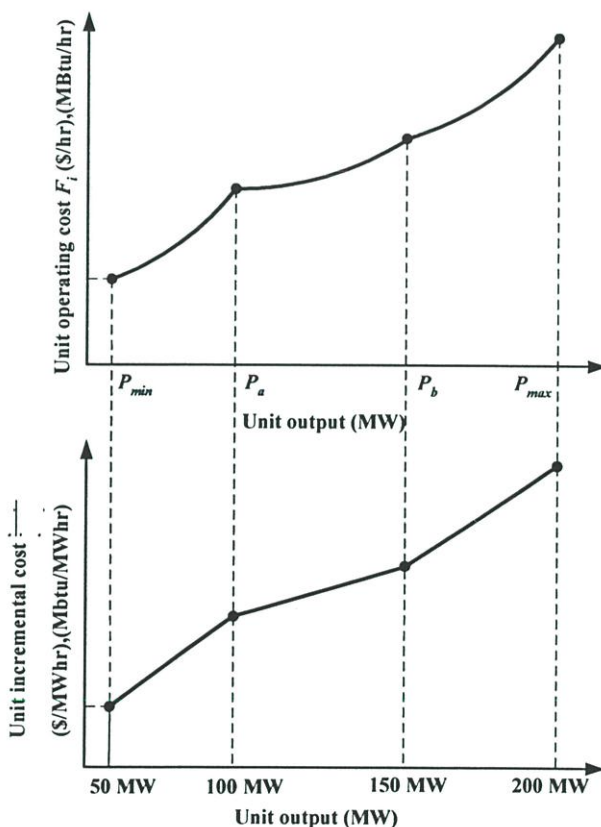
การจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นพื้นฐานอันดับต้นๆ ในการพิจารณาเกี่ยวกับการทำงานของระบบไฟฟ้า[1-2] บางครั้งในทางปฏิบัติอาจจะมีการพิจารณาสถานะการจ่ายโหลดอย่างประหยัดมากกว่าสถานการณ์ทำงานอื่นๆ สมมติว่ามีเครื่องกำเนิด n เครื่องทำการจ่ายโหลดร่วมกันและเครื่องกำเนิดทุกเครื่องทำงานอยู่ในขีดจำกัดกำลังผลิต ต้นทุนการเริ่มเดินหรือต้นทุนการหยุดเครื่องกำเนิดและการปรับเปลี่ยนหรือการเลือกการเดินและหยุดเครื่องกำเนิดเครื่องใดเพื่อให้สามารถรองรับโหลดได้นั้นเป็นปัญหาชนิดคอมมิทเมนต์ สมมติว่าเราทราบราคาการผลิตของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องที่อยู่ในรูปของค่าเงินบาทต่อชั่วโมง จากนั้นทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิง (F_i) เทียบกับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดเครื่องที่ i

ในการทำงานจริงในระบบไฟฟ้ากำลัง ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตที่สร้างขึ้นจะอยู่ในรูปแบบของสมการ quadratics function ซึ่งจะเป็นจริงตลอดช่วงขีดจำกัดกำลังการผลิต และค่าอนุพันธ์ (เรียกค่านี้อีกว่า ต้นทุนส่วนเพิ่ม (incremental cost) หรือ อัตราความร้อน (heat rate)) ลักษณะกราฟของต้นทุนการผลิตและกราฟต้นทุนส่วนเพิ่มแสดงไว้ในรูปที่ 4.1

ในกรณีที่กราฟต้นทุนการผลิตอยู่ในรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่องนั้น เป็นผลมาจากการเพิ่มหม้อไอน้ำเข้าไปในเครื่องกำเนิด ตัวควบแน่นไอน้ำ หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่มีลักษณะการทำงานไม่ต่อเนื่อง

(discrete equipment) เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ทำงานได้จากช่วงพิกัดต่ำสุดจนถึงพิกัดสูงสุด กราฟต้นทุนการผลิตที่ไม่ต่อเนื่องนี้จะเกิดขึ้นอีกถ้ากราฟนี้เป็นต้นทุนการผลิตของโรงไฟฟ้าทั้งหมด และมีการขนานเครื่องกำเนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงต้นทุนการผลิต

$$F_i(P_i) = \begin{bmatrix} \text{operating cost} \\ (\$/hr) \\ (Mbtu/hr) \end{bmatrix} \quad \text{โดยที่ } P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max} \quad (4.1)$$



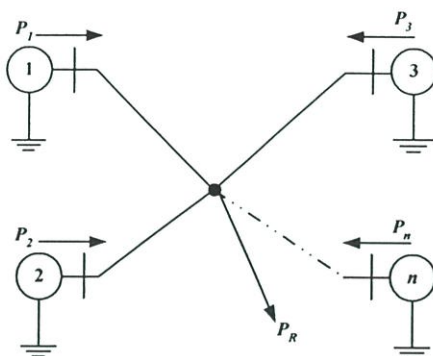
รูปที่ 4.1 กราฟต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดชนิดต่างๆ

สมมติว่าเราทราบฟังก์ชันต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดอยู่ในรูปของค่าเงินบาทต่อชั่วโมง ถ้าทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิง (F_i) เทียบกับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดเครื่องที่ i จะทำให้ได้ค่าต้นทุนส่วนเพิ่ม

บ่อยครั้งที่มีการแทนสมการต้นทุนการผลิตให้อยู่ในรูปของ Btu มากกว่ารูปแบบของค่าเงิน เนื่องจากว่าราคาเชื้อเพลิงที่นำมาผลิตความร้อนนั้นเปลี่ยนแปลงเป็นเดือนหรือเป็นวัน เมื่อเทียบกับ

ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับอายุการใช้งานของเครื่องกำเนิด กราฟต้นทุนการผลิตและต้นทุนส่วนเพิ่มมีความสำคัญในปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดเมื่อไม่คิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย



รูปที่ 4.2 การจ่ายโหลดร่วมกันของเครื่องกำเนิดเมื่อไม่คิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

พิจารณาเครื่องกำเนิด n เครื่อง ทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด (P_R) ร่วมกัน โดยไม่พิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง นั่นคือ มีเครื่องกำเนิดทั้งหมด n เครื่องอยู่ในสถานีไฟฟ้าเดียวกันและส่งกำลังไฟฟ้าแบบขนานกันไปยังโหลด รูปแบบของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และถ้าฟังก์ชันต้นทุนการผลิต F_i ทราบค่าแล้ว จากนั้นทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนี้จะได้ว่า

$$J = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) = \text{performance index} \quad (4.2)$$

โดยต้องสอดคล้องกับเงื่อนไข

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_R = \text{demand} \quad (4.3)$$

สมมติว่าฟังก์ชันต้นทุนการผลิต F_i มีค่าต่อเนื่อง ค่าต่ำสุดและสูงสุดของสมการที่ 4.2 จะเกิดขึ้นเมื่อ [3]

$$\frac{dJ}{dP_i} = 0 = \frac{dF_i}{dP_i} + \sum_{j \neq i}^n \frac{dF_j}{dP_j} \left(\frac{dP_j}{dP_i} \right) = 0 \quad \text{โดยที่ } i = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

คล้ายๆ กับเงื่อนไขของการไหลของกำลังไฟฟ้า เนื่องจากว่าความต้องการของโหลด (P_R) มีค่าคงที่ ดังนั้นถ้ามีการเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิด i ดังนั้นจะต้องมีเครื่องกำเนิดอื่นทำการลดกำลังการผลิต จากสมการ 4.3 ถ้าหาค่าอนุพันธ์จะได้

$$\frac{dP_R}{dP_i} = 0 = 1 + \sum_{j \neq i} \frac{dP_j}{dP_i} \quad \text{โดยที่ } i = 1, 2, \dots, n \quad (4.5)$$

สมการที่ 4.4 และ 4.5 จะมีคำตอบเดียวเท่านั้นถ้าต้นทุนส่วนเพิ่มของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องมีค่าเท่ากัน นั่นคือ ค่าต้นทุนการผลิตจะมีค่าต่ำสุดเมื่อ

$$\lambda = \frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dF_2}{dP_2} = \dots = \frac{dF_n}{dP_n} \quad (4.6)$$

ค่า λ มีหน่วยเป็น $MBtu/MWh$ หรือ $\$/MWh$ และค่า λ ใช้แทนต้นทุนในการผลิตกำลังไฟฟ้า จากสมการ 4.6 จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้ค่า λ ค่าเดียวกันทั้งระบบ

4.2 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดเมื่อคิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

ในสภาวะปกติในระบบไฟฟ้าจะมีโรงไฟฟ้าหลายชนิดด้วยกันที่ช่วยกันผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด ตัวอย่างเช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โรงไฟฟ้าพลังความร้อน โรงไฟฟ้าพลังน้ำ ซึ่งบางแห่งอาจจะกำหนดกำลังการผลิตคงที่ หรือ บางแห่งกำหนดก่อนในการปรับกำลังการผลิตแบบอัตโนมัติ ในขณะที่โรงไฟฟ้าที่อยู่ใกล้พื้นที่ก็อาจจะถูกนำมาพิจารณา กำหนดให้ n เป็นจำนวนเครื่องกำเนิดที่ทำการผลิตไฟฟ้า และ k แทนเครื่องกำเนิดที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียง โดยที่ n และ k จะพิจารณาให้มีค่าคงที่ N แทนโหลดของระบบไฟฟ้า (ดังรูปที่ 4.3) โดยที่เครื่องกำเนิดที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงอาจจะเป็นตัวรับกำลังไฟฟ้าหรือเป็นระบบกลาง สำหรับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังระบบอื่นอีก

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด คือ การหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดทั้งหมด n เครื่อง

$$J = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (4.7)$$

โดยสอดคล้องกับเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าสมดุล

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_R + P_L \quad (4.8)$$

ซึ่ง P_R คือ กำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่โหลด $N - K$ บวกด้วยโหลดที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงอีก K โหลด และ P_L คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งทั้งหมด ถ้า P_R มีค่าคงที่ และ P_L เป็น ฟังก์ชันที่ขึ้นกับกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิด ดังนั้นเงื่อนไขที่อยู่ในรูปแบบของสมการที่มีค่าเท่ากับศูนย์และฟังก์ชันต้นทุนการผลิต สามารถเชื่อมสมการเข้าเป็นสมการเดียวกัน โดยตัวคูณที่เรียกว่า ตัวคูณลากรางจ์ (lagrange multiplier, λ) [3] ดังสมการที่ 4.9

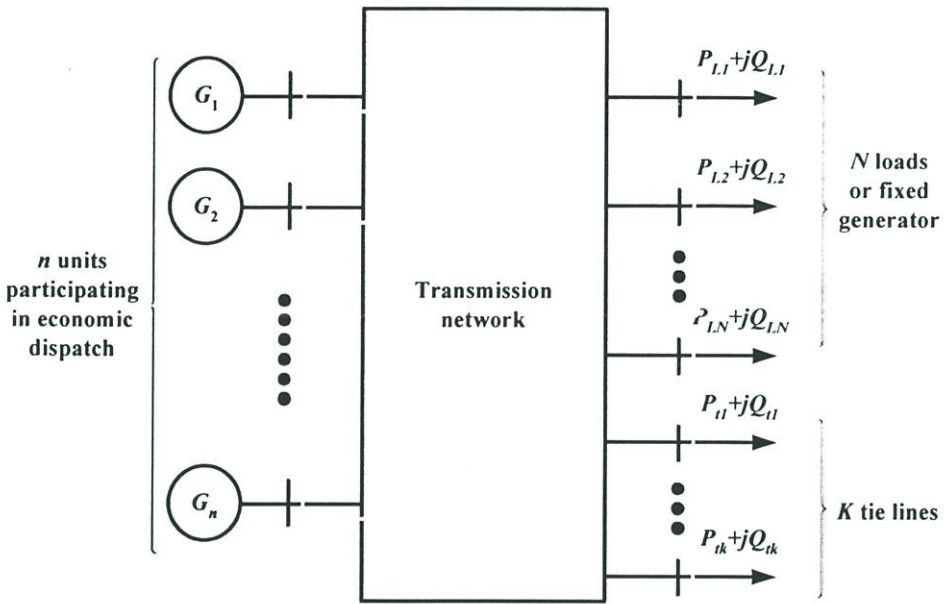
$$J' = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) - \lambda \left\{ \sum_{i=1}^n (P_i) - P_R - P_L \right\} \quad (4.9)$$

และทำการหาค่าต่ำสุดของสมการ 4.9 เทียบกับกำลังไฟฟ้าจริง $n+1, P_1, P_2, \dots, P_n$ และ ค่า λ ค่าสุดท้ายที่สอดคล้องกับสมการพีชคณิต $n+1$ สมการ นั่นคือ

$$\begin{aligned} \frac{dJ'}{dP_1} = 0 &= \frac{dF_1}{dP_1} - \lambda \left\{ 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1} \right\} \\ \frac{dJ'}{dP_2} = 0 &= \frac{dF_2}{dP_2} - \lambda \left\{ 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_2} \right\} \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \frac{dJ'}{dP_n} = 0 &= \frac{dF_n}{dP_n} - \lambda \left\{ 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_n} \right\} \\ &= 0 = \sum_{i=1}^n (P_i) - P_R - P_L \end{aligned} \quad (4.10)$$

คำตอบของสมการเหล่านี้เรียกว่า สมการโคออร์ดิเนชัน (coordination equation) ซึ่งเป็นวิธีการจ่ายโหลดอย่างประหยัดแบบดั้งเดิมที่อธิบายโดย Steinberg [1] และ Kirchmayer [2] และยังคงเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้จนถึงปัจจุบัน ถ้าค่าอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง $\frac{\partial P_L}{\partial P_i}$ สามารถหาได้แล้ว การปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดก็จะทำให้เราได้คำตอบของสมการโคออร์ดิเนชัน นั่นคือ ต้นทุนการผลิตจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อ

$$\frac{dF_i}{dP_i} \left\{ \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} \right\} = \lambda = \text{system } \lambda \text{ (Mbtu / MWhr)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.11)$$



รูปที่ 4.3 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

คำว่า “แลมบ์ดาของระบบ (system lambda)” เป็นค่าที่ใช้แทนคำตอบของการจัดสรรกำลังการผลิตตั้งแต่ยุคแรกๆ โดยคำตอบของสมการ 4.6 เป็นกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง และค่าแลมบ์ดาของระบบจะเป็นตัวบ่งชี้กำลังการผลิต และจะส่งค่ากลับไปยังสถานีควบคุม ในปัจจุบันค่าแลมบ์ดาของระบบเป็นค่าหนึ่งของสมการพีชคณิต $n + 1$ สมการและเทอมที่อยู่ในวงเล็บปีกกา คือ ค่าปรับโทษ

$$\left\{ \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} \right\} = \text{penalty factor} = PF_i \quad \text{unit } i \quad (4.12)$$

ซึ่งมีค่าคงที่ไปตลอด แม้ในระหว่างการทำคำตอบที่ใช้กระบวนการทำซ้ำเรื่อยๆ เพื่อหาค่า λ ในการควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าสมัยใหม่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะถูกควบคุมอย่างอิสระโดยศูนย์กลางการจัดสรรกำลังการผลิต โดยการปรับกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นหรือลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.4 และกำลังการผลิตที่ได้จากเครื่องกำเนิดทุกเครื่องจะถูกตรวจสอบอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้แน่ใจว่าเพียงพอต่อความต้องการของโหลด

เพื่อให้เข้าใจต่อความหมายของคำว่า “ค่าปรับโทษ” สมมติว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย ΔP_R ถูกส่งไปยังโหลดเนื่องมาจากการเพิ่มกำลังการผลิต ΔP_i ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับจะมีค่าประมาณ

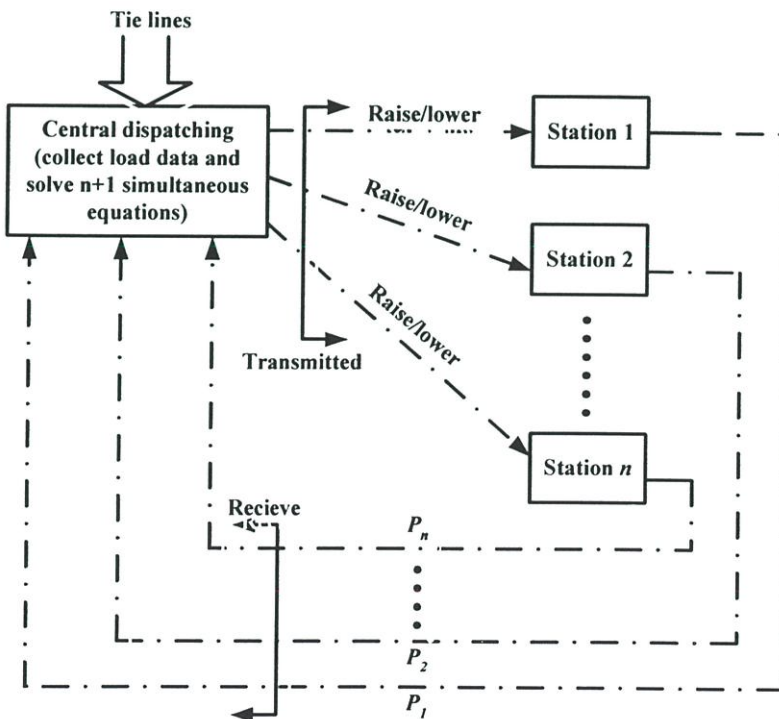
$$\Delta P_R = \Delta P_i - \Delta P_L \quad (4.13)$$

ดังนั้นค่าประมาณของค่าปรับโทษจะมีค่าเป็น

$$PF_i \cong \frac{1}{1 - \frac{\Delta P_L}{\Delta P_i}} = \frac{\Delta P_i}{\Delta P_R} \quad (4.14)$$

ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของ ΔP_i เพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นอย่างมาก $\frac{\Delta P_L}{\Delta P_i}$ มีค่าเข้าใกล้หนึ่งและการเพิ่มขึ้นของค่าปรับโทษจะไม่มีข้อจำกัด นั่นหมายความว่า เมื่อค่าปรับโทษมีค่าสูง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า i ควรจะทำงานในสถานะที่ค่าต้นทุนส่วนเพิ่มมีค่าต่ำ นั่นคือ $\frac{dF_i}{dP_i}$ จะทำให้กำลังการผลิตมีค่าต่ำ หรือ

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{กำลังไฟฟ้าขนาดเล็ก} \\ \text{ต้นทุนส่วนเพิ่มน้อย} \end{array} \right\} \times \{ \text{ค่าปรับโทษที่มีค่าสูง} \} = \{ \text{แลมบ์ดาของระบบ} \} \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.4 แบบจำลองการควบคุมการจ่ายโหลดอย่างประหยัดจากศูนย์กลางการควบคุม

โดยทั่วไปแล้วกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิต และค่า $\frac{\partial P_L}{\partial P_i} \ll 1$ ดังนั้น เราสามารถประมาณได้ว่า

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + K \approx 1 + x$$

ดังนั้นสมการ 4.11 สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{dF_i}{dP_i} \left\{ \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} \right\} \cong \frac{dF_i}{dP_i} \left\{ 1 + \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \right\} = \lambda \quad (4.16)$$

ค่าประมาณนี้ปราศจากตัวหาร ดังนั้นจะสะดวกในการหาคำตอบของสมการ โคออร์ดิเนชัน ถ้า P_L อยู่ในรูปของควอดราติกฟังก์ชันที่มีค่ากำลังผลิตของเครื่องกำเนิดทุกเครื่องเป็นตัวแปร

บทที่ 5

วิธีการค้นหาแบบตาบอด

5.1 บทนำ

วิธีการค้นหาแบบตาบอดถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Fred Glover [27-33] วิธีการค้นหาแบบตาบอดเป็นกรรมวิธีการทำซ้ำแบบสุ่ม (iterative heuristic) วิธีการค้นหาแบบตาบอดได้ถูกนำเสนอขึ้นมาครั้งแรกเพื่อแก้ปัญหา combinatorial optimization วิธีการค้นหาแบบตาบอดมีแนวคิดที่ง่ายและสะดวกและมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันกับวิธีการค้นหาแบบโลคอล (local search) โดยคำตอบแต่ละคำตอบ $s \in \Omega$ จะต้องเป็นสมาชิกในเซตของคำตอบบริเวณใกล้เคียง $N(s) \subseteq \Omega$ ดังนั้น คำตอบ $s' \in N(s)$ กล่าวได้ว่าเป็นคำตอบที่ได้จากการเคลื่อนย้ายคำตอบ s ไปยังคำตอบ s' โดยปกติแล้ว บริเวณใกล้เคียง $N(s)$ (neighborhood) จะถูกสมมติว่ามีความสมมาตร นั่นคือ บริเวณใกล้เคียงของ s ก็จะเป็นบริเวณใกล้เคียงของ s' ด้วย วิธีการค้นหาแบบตาบอดมีความคล้ายคลึงกันกับวิธีการค้นหาแบบโลคอล เนื่องจากในแต่ละรอบของการค้นหา คำตอบบริเวณใกล้เคียงเฉพาะถิ่น (local neighborhood) ของคำตอบปัจจุบัน (current solution) ที่มีค่าดีที่สุด จะถูกเลือกให้เป็นคำตอบปัจจุบันแทนที่คำตอบปัจจุบันเดิม วิธีการค้นหาแบบแบบโลคอลจะหยุดดำเนินการเมื่อคำตอบปัจจุบันที่ได้จากคำตอบบริเวณใกล้เคียงไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่วิธีการค้นหาแบบตาบอดจะยังคงดำเนินการค้นหาอีกต่อไป โดยใช้คำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากบริเวณคำตอบที่ใกล้เคียงนี้ ถึงแม้ว่าคำตอบที่ได้จะมีค่าด้อยกว่าคำตอบปัจจุบันก็ตาม และเพื่อป้องกันการวนซ้ำของคำตอบลักษณะนี้ การใช้ประโยชน์จากคำตอบที่เคยได้ค้นหาแล้ว ที่ถูกบันทึกไว้ในบัญชีที่เรียกว่า ตาบูลิสต์ (tabu list) หรือบัญชีสถานะตาบูลจะถูกเรียกใช้เพื่อทำการเปรียบเทียบและทดสอบ เนื่องจากการเคลื่อนย้ายไปยังคำตอบที่มีสถานะเป็นตาบูลจะถูกห้ามไว้ แต่คำตอบที่เป็นสถานะตาบูลนี้จะถูกยอมรับให้เป็นคำตอบ เมื่อการทดสอบคำตอบนี้กับเกณฑ์ที่ตั้งไว้ที่เรียกว่าเกณฑ์แอสไพเรชัน (aspiration criteria) ได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ ตัวอย่างของการใช้เกณฑ์แอสไพเรชันคือ กรณีที่คำตอบที่คัดเลือกมามีค่าดีกว่าคำตอบทั้งหมดที่ได้ค้นหา ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการค้นหาไม่ได้มีการวนซ้ำแต่กลับเป็นการเคลื่อนย้ายไปยังคำตอบใหม่ที่ยังไม่เคยค้นหา

วิธีการค้นหาแบบตาบอด ไม่เพียงแต่ถูกใช้ในการค้นหาคำตอบบริเวณการค้นหาที่ซับซ้อนเท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมวิธีอื่นได้ วิธีการค้นหาแบบตาบูลสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีอื่น ที่มีลักษณะการค้นหาคำตอบที่อาศัยการเคลื่อนย้ายเป็นลำดับนั้นคือกระบวนการค้นหาคำตอบเริ่มต้นจากคำตอบที่สุ่มขึ้นมาหนึ่งคำตอบ (one trial solution)

และมีการเคลื่อนย้ายไปยังคำตอบอื่นๆ เพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด คุณลักษณะที่น่าสนใจที่สุดของวิธีการค้นหาแบบตาม คือความสามารถในการหลุดออกจากคำตอบที่เป็นคำตอบเฉพาะถิ่นได้

วิธีการค้นหาแบบตามแตกต่างจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบชีวมูลเตตเคนอนีลิ่ง และวิธีจินตออลกอริทึม เนื่องจากทั้งสองวิธีนี้ไม่มีการจดจำคำตอบที่เคยได้ค้นหา คุณลักษณะในการจดจำของวิธีการค้นหาแบบตามสามารถพัฒนาต่อไปได้เพราะมีความยืดหยุ่นสูง และเป็นหลักการที่ง่ายโดยทำการรวบรวมเอาองค์ประกอบต่างๆที่เข้าไว้ด้วยกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประยุกต์ใช้วิธีการจดจำระยะสั้น (short-term memory) ซึ่งเป็นหลักการที่สำคัญที่สุดของวิธีการค้นหาแบบตาม

หลักสำคัญของวิธีการจดจำระยะสั้นคือ ทำการจดจำกระบวนการค้นหาในอดีตที่ถูกเลือกแล้ว (selective history, H) นำมารวบรวมเพื่อประโยชน์ในการทำให้กระบวนการค้นหาดำเนินการต่อไปได้ บริเวณใกล้เคียง $N(s)$ จะถูกแทนที่ด้วยบริเวณใกล้เคียงค่าใหม่ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอดีตในการค้นหา H และแทนด้วย $N(H, S)$ อดีตของการค้นหาจะถูกกำหนดโดยคำตอบที่ค้นหาได้จากการเคลื่อนย้ายจากคำตอบเริ่มต้น S ดังนั้นสถานะของ S ในรอบต่อไปจะถูกเลือกจาก $N(N, S)$ องค์ประกอบของการจดจำระยะสั้นจะถูกประยุกต์ใช้ผ่านทางเซตของสถานะที่เป็นตาม และต้องสอดคล้องกับค่าเกณฑ์เอสไพเรชั่นด้วย

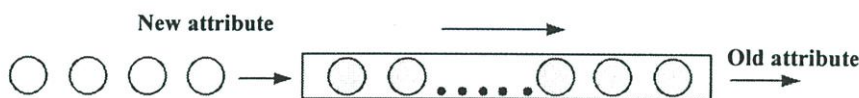
หลักการของวิธีการจดจำระยะสั้นประกอบด้วย การแยกแยะทิศทางของการค้นหาให้มีความชัดเจน โดยแยกแยะว่าทิศทางใดที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ และทิศทางใดที่มีสถานะต้องห้ามหรือเป็นตาม (forbidden or tabu) ด้วยหลักการนี้ วิธีการค้นหาแบบตามสามารถป้องกันการย้อนกลับไปค้นหาคำตอบที่เคยค้นหาแล้ว กระบวนการค้นหาคำตอบจะถูกบังคับไม่ให้ย้อนกลับไปค้นหาคำตอบเดิมที่เคยค้นหาแล้วในอดีต โดยใช้หลักการจดจำคำตอบที่เคยค้นหาแล้วในอดีต และเก็บไว้ในองค์ประกอบที่เราเรียกว่าตามูลิสต์ (tabu list, T) โดยที่ตามูลิสต์จะประกอบไปด้วยตัวแปรที่เคยถูกนำมาใช้เป็นคำตอบในรอบที่ผ่านมาทั้งหมด k ตัว ดังนั้นขนาดของตามูลิสต์นี้จึงแทนด้วยค่า k ซึ่งเป็นจำนวนรอบของการเคลื่อนย้ายที่มีสถานะเป็นตามหลังจากที่ทำการเคลื่อนย้ายแล้ว ลักษณะวิธีการบันทึกสถานะที่เป็นตามไว้ในตามูลิสต์แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 การเคลื่อนย้ายที่เคยค้นหาแล้ว ก่อนหน้านี้จะถูกเก็บบันทึกไว้ในตามูลิสต์ และถูกห้ามไม่ให้ทำการเคลื่อนย้ายเพื่อหาคำตอบจากการเคลื่อนย้ายเหล่านี้

การย้อนกลับไปค้นหาคำตอบที่เคยค้นหาในอดีตจะถูกป้องกันโดยตามูลิสต์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีเพียงตัวแปรที่เกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายเท่านั้นที่ถูกเก็บไว้ในตามูลิสต์ (ซึ่งไม่ใช่คำตอบที่ถูกต้องมากนัก) ดังนั้น การเคลื่อนย้ายที่มีสถานะตามเหล่านี้จะถูกป้องกันไม่ให้นำมาพิจารณาเป็นคำตอบที่ยังไม่เคยค้นหาในอดีต การยกเลิกสถานะตามของการเคลื่อนย้ายเหล่านี้สามารถกระทำได้โดยใช้เกณฑ์เอสไพเรชั่นมาทดสอบ นั่นคือ คำตอบที่ได้จากการเคลื่อนย้ายที่มีสถานะเป็นตามและมีค่าอยู่ในตามูลิสต์แล้ว จะถูกนำมาพิจารณาว่าเป็นคำตอบที่ยังไม่เคยถูกค้นหา

มาก่อนหน้านี้ ถ้าการทดสอบคำตอบนี้กับเกณฑ์แอสไพเรชันมีค่าเป็นที่น่าพอใจ การดำเนินงานของวิธีการค้นหาแบบตามที่มีหลักการจดจำระยะสั้นอธิบายได้ดังรูปที่ 5.2

5.2 หลักการพื้นฐานของวิธีการค้นหาแบบตาม

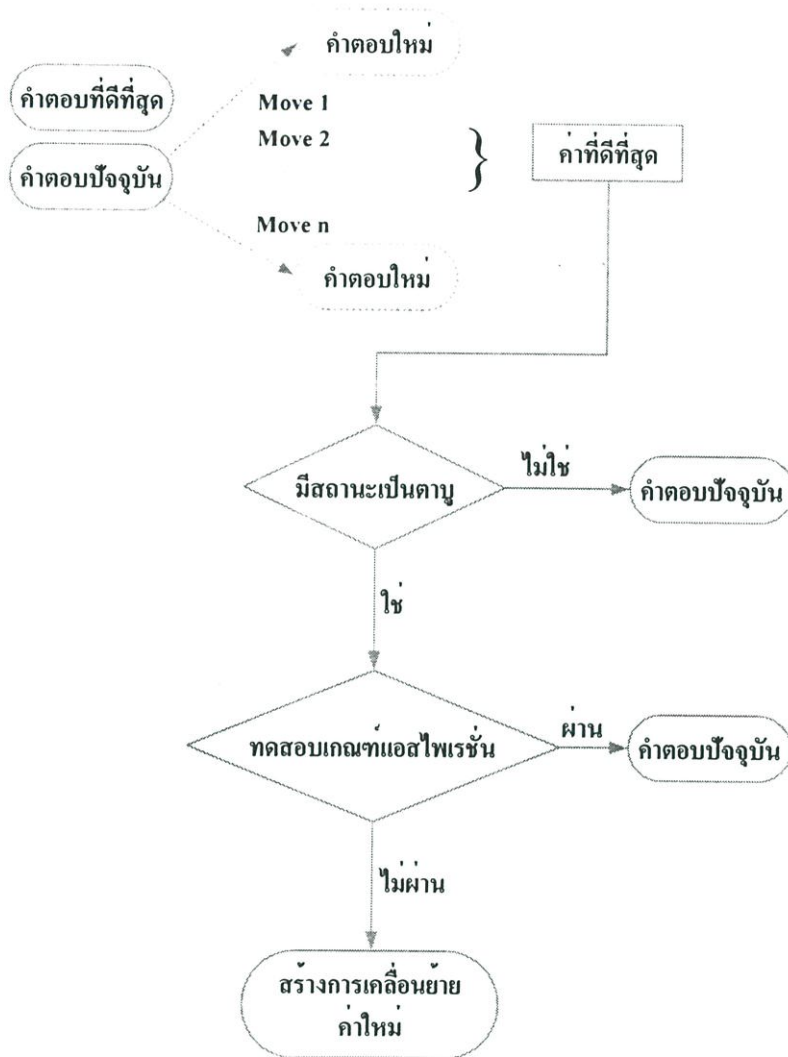
รูปแบบอัลกอริทึมอย่างง่ายของวิธีการค้นหาแบบตาม แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 กระบวนการทำงานเริ่มต้นด้วยคำตอบที่เป็นไปได้ S (คำตอบปัจจุบัน) ในบริเวณการค้นหา Ω (search space) บริเวณใกล้เคียง $N(S)$ สำหรับค่า S แต่ละค่าจะถูกกำหนดขึ้นมา จากนั้นค่าคำตอบบริเวณใกล้เคียง $V^* \subset N(S)$ จะถูกสุ่มขึ้นมา ในกรณีพิเศษจะทำการสร้างบริเวณใกล้เคียงที่อยู่ภายใน นั่นคือกำหนดให้ $V^* = N(S)$ และในทางปฏิบัติการกำหนดลักษณะนี้ ต้องใช้เวลาในการคำนวณที่ยาวนานมาก ดังนั้นการสุ่มสร้างบริเวณใกล้เคียงที่มีขนาดเล็กๆ ($V^* \subset N(S)$) จึงมีความจำเป็น และเรียกค่าเหล่านี้ว่า คำตอบที่สุ่มขึ้นมา (trial solution) ($|V^*| = n \ll |N(S)|$) จากค่าคำตอบที่สุ่มขึ้นมาเหล่านี้คำตอบที่ดีที่สุดซึ่งเขียนด้วย $S^* \in V^*$ จะถูกเลือกเพื่อใช้เป็นคำตอบปัจจุบันในรอบต่อไป การเคลื่อนย้ายมายัง S^* สามารถทำได้ถึงแม้ว่า S^* จะมีค่าด้อยกว่า S นั่นคือ $Cost(S^*) > Cost(S)$ การเคลื่อนย้ายจากค่า S ไปยังค่า S^* จะถูกแยกแยะให้มีสถานะที่ชัดเจนว่าเป็นการเคลื่อนย้ายที่มีค่าเป็นที่น่าพอใจหรือไม่



รูปที่ 5.1 ลักษณะการบันทึกค่าของคาบูลิสต์

การเลือกสถานะของการเคลื่อนย้ายที่ดีที่สุด ใน V^* จะมีหลักการพื้นฐาน โดยการสมมติว่าการเคลื่อนย้ายที่ดีนั้นจะให้คำตอบที่เป็นคำตอบทั่วไป (global solution) หรือคำตอบใกล้เคียงคำตอบทั่วไป จากการอธิบายที่ผ่านมาสมาชิกคำตอบที่ดีที่สุด $S^* \in V^*$ อาจจะเป็นการเคลื่อนย้ายที่สามารถทำให้คำตอบปัจจุบันดีขึ้นหรืออาจจะไม่ดีขึ้นก็ได้แต่ยังถูกนำมาพิจารณาอยู่ ลักษณะการดำเนินงานเช่นนี้จะสามารถทำให้วิธีการค้นหาแบบตาม สามารถหลุดออกจากคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะถิ่นได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้จะมีกลวิธีนี้แต่คำตอบที่ได้ก็อาจจะเป็นคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะถิ่นได้ (ในกรณีที่เป็นปัญหาค่าที่ต่ำที่สุด) เนื่องจากว่าหลังจากทำการเคลื่อนย้ายแล้วคำตอบที่ได้มีค่า $Cost(S^*) > Cost(S)$ และจะมีการยอมรับคำตอบนี้เพื่อให้กระบวนการค้นหาคำเนินการต่อไป จากนั้นในรอบการค้นหาที่ใกล้ถึงจุดสุดท้าย การวนซ้ำกลับมายังคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะถิ่นเดิมนี้อาจจะเกิดขึ้น นั่นคือ มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการวนซ้ำกลับมาค้นหาคำตอบจากคำตอบที่ได้เคยค้นหา

มาแล้ว ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้กระบวนการมีการค้นหาคำตอบในเซตย่อยของคำตอบเดิมอยู่ตลอด



รูปที่ 5.2 ผังการดำเนินงานของวิธีการค้นหาแบบตาบ

จากการอธิบายมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่าตาบูลิสต์เป็นส่วนสำคัญในการป้องกันการวนซ้ำกลับมาค้นหาคำตอบในเส้นทางที่ได้เคยค้นหาแล้ว ตาบูลิสต์ประกอบไปด้วยส่วนการติดต่อเพื่อใช้ในการห้ามกลับไปดำเนินการค้นหาในคำตอบเดิมที่ได้ค้นหามาก่อนหน้านี้ ตาบูลิสต์ไม่ใช่รายการบัญชีคำตอบของปัญหาที่แท้จริง เพราะตาบูลิสต์เป็นเพียงส่วนที่ใช้เก็บคำตอบที่เคยค้นหามาก่อนหน้านี้เท่านั้น ถึงแม้ว่าขนาดของตาบูลิสต์ที่ใช้ในการเก็บคำตอบที่มีสถานะเป็นตาบูลจะมีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับคำตอบที่สุ่มสร้างขึ้นใหม่เพื่อทำการค้นหา แต่กระบวนการดำเนินงานในการประมวลผลและลักษณะการใช้หน่วยความจำก็ยังมีค่ามากอยู่ ดังนั้นอาจจะทำการเก็บค่าตัวแปรการเคลื่อนย้ายไว้ในตาบูลิสต์แทนการเก็บคำตอบที่เคยได้ค้นหามาก่อนแล้วในอดีต นั่นคือ

ข้อจำกัดตามนี้จะกำหนดให้ การเคลื่อนย้ายที่มีสถานะเป็นคาบูกลับกลายเป็นสถานะการเคลื่อนย้ายที่ยังไม่เคยทำการค้นหาคำตอบมาก่อน ยกตัวอย่างเช่น ถ้าการเคลื่อนย้ายถูกพบว่ามีสถานะเป็นคาบูกใน รอบการค้นหาที่ i และการเคลื่อนย้ายนี้กลับเป็นคาบูกอีกครั้งในรอบการค้นหาที่ j โดยที่ $j = i + l$ และ $1 < l < |T|$ ดังนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะกำหนดให้การเคลื่อนย้ายในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนย้ายที่การค้นหากำลังดำเนินการค้นหาอยู่มีสถานะเป็นคาบูกเพิ่มขึ้นไปอีก ซึ่งอาจจะทำให้การค้นหาดำเนินการค้นหาในทิศทางอื่นๆ แทน ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนย้ายชั่วคราวในทิศทาง $l-1$ นั่นเอง ดังนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องทำการยกเลิกสถานะคาบูกของตัวแปรที่อยู่ในคาบูกลิสต์ และทำการบังคับการเคลื่อนย้ายที่มีสถานะเป็นคาบูกให้มีสถานะที่เหมาะสมและชัดเจน ซึ่งการดำเนินการนี้ ต้องอาศัยเกณฑ์แอสไพ เรชั่นเข้ามาช่วย

Begin

1. เริ่มต้นกระบวนการค้นหาด้วยคำตอบที่เป็นไปได้ $S \in \Omega$
2. เซตค่าคาบูกลิสต์ให้ว่างและกำหนดเกณฑ์แอสไพเรชั่น
3. **For** กำหนดจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา **Do**
4. สร้างคำตอบบริเวณใกล้เคียง $V^* \subset N(S)$
5. เลือกคำตอบที่ดีที่สุด $S^* \in V^*$
6. **If** สถานะการเคลื่อนย้ายจาก S ไปยัง S^* ไม่ได้ถูกบันทึกไว้ในคาบูกลิสต์ (T)
7. กำหนดให้คำตอบนี้เป็นคำตอบที่ดีที่สุด
8. ปรับปรุงสถานะในคาบูกลิสต์และปรับปรุงเกณฑ์แอสไพเรชั่น (AL)
9. เพิ่มจำนวนรอบของการค้นหา
10. **Else**
11. **If** $Cost(S^*) < AL$ **Then**
12. กำหนดให้คำตอบนี้เป็นคำตอบที่ดีที่สุด
13. ปรับปรุงสถานะในคาบูกลิสต์และปรับปรุงเกณฑ์แอสไพเรชั่น
14. เพิ่มจำนวนรอบของการค้นหา
15. **End If**
16. **End If**
17. **End For**
18. **End**

รูปที่ 5.3 รูปแบบอัลกอริทึมของวิธีการค้นหาแบบคาบูก

เกณฑ์แอสไพเรชัน เป็นตัวดำเนินการสำหรับการยกเลิกสถานะของการเคลื่อนย้าย ที่มีสถานะเป็นตาบ การยกเลิกนี้จะดำเนินการเมื่อใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสม การยกเลิกสถานะที่เป็นตาบของการเคลื่อนย้ายใดๆ สามารถกระทำได้ชั่วคราว ถ้าการเคลื่อนย้ายนั้นทำให้คำตอบของกระบวนการค้นหาไม่มีค่าดีเพียงพอ เกณฑ์แอสไพเรชันจะถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อให้แน่ใจว่า การย้อนกลับไปค้นหาคำตอบในทิศทางเดิมที่ได้เคยค้นหามาแล้ว (นั่นคือเส้นทางการเคลื่อนย้ายนี้อยู่ในตาบลิสต์แล้ว) จะสามารถนำกระบวนการค้นหาไปสู่เส้นทางการเคลื่อนย้ายหรือคำตอบที่ยังไม่เคยได้ทำการค้นหามาก่อน ซึ่งจะทำให้กระบวนการค้นหาได้คำตอบที่ดีขึ้น

จากบรรณานุกรมหลายๆ ฉบับได้แนะนำเกณฑ์แอสไพเรชันสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานแตกต่างกันไป แต่เกณฑ์แอสไพเรชันแบบหนึ่งที่น่าสนใจและถูกนำมาประยุกต์ใช้บ่อยที่สุด คือ จะทำการยกเลิกสถานะที่เป็นตาบของการเคลื่อนย้ายใดๆ ถ้าการเคลื่อนย้ายนั้นให้คำตอบที่ดีกว่า (better solution) คำตอบที่ดีที่สุด (best solution) ของกระบวนการค้นหาที่ได้ค้นหามาแล้วทั้งหมด เกณฑ์แอสไพเรชันลักษณะนี้เราเรียกว่า เกณฑ์แอสไพเรชันของคำตอบที่ดีที่สุด (aspiration of best solution) เกณฑ์แอสไพเรชันลักษณะอื่นๆ จะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.3.4

จากรูปที่ 5.3 เริ่มแรกกำหนดให้คำตอบปัจจุบันเป็นคำตอบที่ดีที่สุด ทำการคัดลอกคำตอบปัจจุบันที่ทำการเคลื่อนย้ายแล้วเพื่อสร้างชุดคำตอบใหม่ขึ้นมา คำตอบที่ดีที่สุดจากชุดคำตอบนี้จะถูกคัดเลือก ถ้าคำตอบที่ถูกเลือกนี้ไม่ได้มีค่าอยู่ในตาบลิสต์ คำตอบนี้จะถูกกำหนดให้เป็นคำตอบปัจจุบัน ถ้าคำตอบนี้มีสถานะเป็นตาบอยู่แล้ว การตรวจสอบคำตอบนี้ด้วยเกณฑ์แอสไพเรชันก็เป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าผลการทดสอบปรากฏว่าคำตอบนี้ผ่านเกณฑ์แอสไพเรชันคำตอบนี้ก็จะถูกกำหนดให้เป็นคำตอบปัจจุบันแต่ยังคงมีสถานะเป็นตาบอยู่ ดังนั้น การเคลื่อนย้ายในรอบการคำนวณรอบต่อจากนี้ไปสามารถยอมรับได้ นั่นคือ การเคลื่อนย้ายนี้หรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องจะถูกจัดเก็บไว้ในตาบลิสต์ ซึ่งถ้าเป็นอย่างอื่นนอกเหนือจากนี้การเคลื่อนย้ายจะถูกสร้างขึ้นมาอีกครั้ง เพื่อสร้างชุดของคำตอบใหม่ ถ้าคำตอบปัจจุบันดีกว่าคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ค้นหามา คำคำตอบที่ดีที่สุดจะถูกปรับปรุงและเมื่อใดก็ตามที่การเคลื่อนย้ายถูกยอมรับ จำนวนรอบของการคำนวณก็จะเพิ่มขึ้น และกระบวนการค้นหาจะดำเนินต่อไปตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น และจะหยุดเมื่อเงื่อนไขของการหยุดมีค่าเป็นจริง

ข้อจำกัดตาบและเกณฑ์แอสไพเรชันเป็นกฎเกณฑ์ที่มีความสมมาตรกัน คำสั่งที่ใช้ในการกำหนดให้มีการตรวจสอบสถานะที่เป็นตาบและเกณฑ์แอสไพเรชัน สามารถทำให้มีลักษณะที่ตรงกันข้ามกันได้ ถึงแม้ว่าการประยุกต์ใช้งานโดยส่วนใหญ่แล้ว คำสั่งในการตรวจสอบสถานะตาบจะมีขึ้นถ้าการเคลื่อนย้ายนั้นมีลักษณะเป็นตาบก่อนหน้าที่จะมีการตรวจสอบเกณฑ์แอสไพเรชัน

หัวข้อต่อไปจะอธิบายถึงนิยามและศัพท์เฉพาะที่นำมาใช้บ่อยๆ ในบทนี้ และจะอธิบายการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบโดยอาศัยตัวอย่างเพื่อให้เข้าใจง่าย

5.2.1 นิยาม

คำตอบที่สุ่มขึ้นมา (trial solution) : คำตอบที่สร้างขึ้นจากคำตอบปัจจุบัน S ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการเคลื่อนย้าย (แทนด้วย S^{trial})

ข้อจำกัดตาม (tabu restriction) : เป็นข้อบ่งชี้ในการป้องกันการวนซ้ำกลับไปค้นหาคำตอบในเส้นทางที่ได้ค้นหามาแล้ว โดยการเลือกตัวแปรของการเคลื่อนย้ายที่มีสถานะเป็นตามการเคลื่อนย้ายเหล่านี้ จะทำให้กระบวนการยอมรับคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะถิ่นเป็นคำตอบที่เหมาะสมแบบทั่วไป

เกณฑ์แอสไพเรชัน (aspiration criterion) : เป็นเครื่องมือในการยกเลิกสถานะตามของการเคลื่อนย้ายใดๆ ที่สามารถเป็นไปได้

บัญชีสมาชิก (candidate list) : ในบัญชีจะประกอบด้วยเซตย่อยของการเคลื่อนย้ายในบริเวณใกล้เคียงที่ถูกรวบรวมแล้ว

คำตอบบริเวณใกล้เคียงที่ยอมรับได้ (admissible neighborhood solution) : คือ คำตอบบริเวณใกล้เคียงใดๆ ที่มีสถานะไม่เป็นตามและผ่านเกณฑ์แอสไพเรชัน

ตัวแปรของการเคลื่อนย้าย (attribute of a move) : องค์กรประกอบใดๆ (คุณลักษณะหรือองค์กรประกอบของคำตอบ)ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ เมื่อมีการเคลื่อนย้ายจาก S ไปยัง S^{trial} การเคลื่อนย้ายหนึ่งเส้นทางอาจมีตัวแปรของการเคลื่อนย้ายหลายตัวแปร

ความคงอยู่ที่ถูกจดจำไว้ (recency base memory) : รูปแบบการจดจำที่ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงให้เห็นว่าคำตอบที่ค้นหามาแล้วนั้นมีการเรียกใช้บ่อยครั้งเท่าไร หรือ ตัวแปรของการเคลื่อนย้ายมีการเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้งเท่าไรโดยทั่วไปแล้ว การจัดลำดับหรือการใช้อาร์เรย์จะถูกนำมาประยุกต์ใช้

ระยะเวลาที่มีสถานะเป็นตาม (tabu tenure) : ระยะเวลาที่การเคลื่อนย้ายใดๆ มีสถานะเป็นตาม

ตัวประเมินค่าการเคลื่อนย้าย (move evaluator) : ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยราคาค่าใช้จ่ายและอดีตของกระบวนการค้นหาที่ถูกใช้เพื่อกำหนดว่า การเคลื่อนย้ายแบบใดให้คำตอบที่ดีที่สุด

ค่าการเคลื่อนย้าย (move value) : “ค่าการเคลื่อนย้าย” คือ ค่าที่ลดลงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือค่าที่ลดลงของตัวประเมินค่าการเคลื่อนย้าย

ตัวอย่างที่ 5.1

พิจารณารูปกราฟที่มีเส้นกราฟเชื่อมต่อกันระหว่างโหนดสองโหนด และมีเส้นกราฟเชื่อมต่อกันระหว่างโหนดต่างๆ จำนวน 8 เส้น (เส้นกราฟ e_1 ถึง e_8) ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ปัญหาที่ต้องการแก้ไข คือ ให้หาเส้นทางที่สั้นที่สุดที่เชื่อมต่อกันทั้งหมด โดยมีเงื่อนไขดังนี้ เงื่อนไขข้อที่ 1

ในจำนวนเส้นกราฟทั้งสามเส้นกราฟดังต่อไปนี้คือ e_3, e_7 และ e_8 จะมีเพียงเส้นกราฟเดียวเท่านั้นที่สามารถเขียนลงในรูปกราฟได้ เงื่อนไขข้อที่ 2 คือเส้นกราฟ e_8 จะสามารถเขียนลงในรูปกราฟได้ต่อเมื่อมีเส้นกราฟ e_6 อยู่ในรูปกราฟแล้วเท่านั้น ปัญหานี้มีโหนดทั้งหมดอยู่ 5 โหนด ดังนั้นคำตอบที่มีค่าน้อยที่สุดจะมีเส้นกราฟเพียง 4 เส้นเท่านั้นที่ต่ออยู่ในรูปกราฟ สถานะของเส้นกราฟ e_j ใดๆ จะแทนด้วยตัวเลขจำนวนเต็มที่มีสถานะ 0 และ 1 โดยหลักการดังนี้

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{ถ้าเส้นกราฟ } e_j \text{ ปรากฏอยู่ในรูปกราฟแล้ว} \\ 0 & \text{ถ้าเส้นกราฟ } e_j \text{ ไม่ปรากฏอยู่ในรูปกราฟ} \end{cases}$$

เงื่อนไขข้อบังคับทั้งสองเงื่อนไขสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

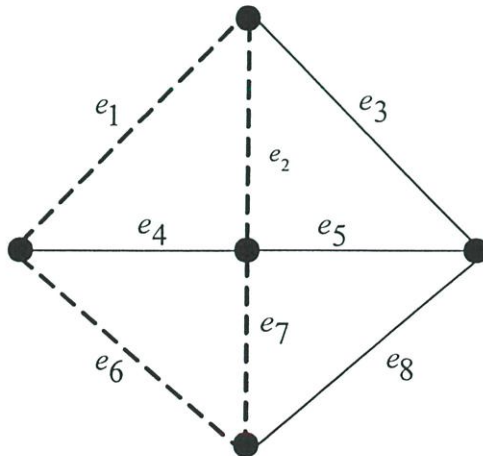
$$x_3 + x_7 + x_8 \leq 1$$

และ

$$x_8 \leq x_6$$

ราคาค่าใช้จ่าย (cost) สำหรับเส้นกราฟแต่ละเส้นกราฟกำหนดได้ดังนี้

เส้นกราฟ	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8
ค่าใช้จ่าย	13	7	9	1	3	19	10	7



รูปที่ 5.4 รูปกราฟของตัวอย่างปัญหาที่นำเสนอ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าเท่ากับ = 220

ในการคำนวณค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เงื่อนไขบังคับไม่เป็นจริง จะทำการปรับโทษโดยใช้ตัวเลขจำนวนเต็ม 100 คูณเข้าไปเพื่อให้เกิดความแตกต่าง ทำการเคลื่อนย้ายจากเส้น

กราฟปัจจุบันไปยังเส้นกราฟอื่นๆ โดยใช้หลักการเคลื่อนย้ายแบบมาตรฐานคือ “การสับเปลี่ยนเส้นกราฟ (edge swap)” การกำหนดข้อจำกัดตามนี้จะกำหนดให้ “ป้องกันการลบเส้นกราฟที่ได้เพิ่มเข้าไปครั้งล่าสุด” ในการยกเลิกข้อจำกัดตามนี้ เกณฑ์แอสไพเรชันจะถูกกำหนดว่า “การเคลื่อนย้ายใดๆ สามารถทำได้ถ้าการเคลื่อนย้ายนั้นๆ ให้คำตอบที่ดีกว่าคำตอบที่เคยได้ค้นหา” กำหนดให้ขนาดของบริเวณใกล้เคียงเท่ากับ 4 ($|V^*| = 4$) และช่วงเวลาของการมีสถานะเป็นตาม $k = |T| = 3$

วิธีทำ

เซตให้ค่าตามลิสต์ว่าง กำหนดให้คำตอบปัจจุบันประกอบด้วยเส้นกราฟ e_3, e_4, e_5 , และ e_8 (เส้นที่บดแสดงในรูปที่ 5.4) เส้นกราฟและค่าใช้จ่ายของและเส้นกราฟแสดงได้ดังรูปข้างล่าง ช่องว่างในตารางแสดงถึงเส้นกราฟนั้นๆ ไม่ได้ถูกเขียนลงในรูปกราฟ ส่วนตารางที่มีค่าอยู่แสดงว่าเส้นกราฟนั้นๆ มีอยู่ในกราฟแล้วและตัวเลขแสดงถึงค่าใช้จ่ายของเส้นกราฟนั้นๆ

	คำตอบปัจจุบัน							
เส้นกราฟที่	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8
ค่าใช้จ่าย	-	-	9	1	3	-	-	7

$$\text{ค่าใช้จ่ายรวม} = 9+1+3+7+2*100 = 220$$

$$\text{ดังนั้น ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด (best cost) = 220}$$

จากคำตอบข้างบน มีเส้นกราฟที่อยู่นอกเหนือจากเงื่อนไขบังคับอยู่สองเส้น นั่นคือ เส้นกราฟที่ e_3 และ e_8 ถูกเขียนลงในรูปกราฟพร้อมกัน ดังนั้นจะทำให้เงื่อนไขข้อบังคับที่ 1 ไม่เป็นจริง และเส้นกราฟที่ e_8 ถูกเขียนลงในรูปกราฟโดยที่ไม่มีเส้นกราฟ e_6 อยู่ด้วย ซึ่งผิดเงื่อนไขข้อบังคับข้อที่ 2 ดังนั้นค่าใช้จ่ายรวมของคำตอบปัจจุบันนี้จะเป็นผลรวมของค่าใช้จ่ายของเส้นกราฟแต่ละเส้นกราฟบวกด้วยค่าใช้จ่ายปรับโทษทั้งสองเงื่อนไข

รอบที่ 1 : ในการคำนวณแต่ละรอบจะต้องสร้างคำตอบบริเวณใกล้เคียง V^* ขึ้นมาใหม่ทุกครั้ง ดังนั้น จากการกำหนดที่ผ่านมาคำตอบบริเวณใกล้เคียงที่สุ่มสร้างขึ้นมาจะมีจำนวน 4 ค่า จะประกอบไปด้วยการเคลื่อนย้ายจากคำตอบปัจจุบันไปยังคำตอบอื่นในบริเวณใกล้เคียง จำนวน 4 ค่า คือ $(e_6, e_5), (e_6, e_8), (e_7, e_8)$ และ (e_1, e_4) การเคลื่อนย้ายแบบนี้มีความหมายเป็นการบวกเพิ่มเส้นกราฟที่ยังไม่มีอยู่ในรูปกราฟเข้าไปและลบเส้นกราฟที่มีอยู่แล้วออกจากรูปกราฟ เพื่อสร้างเส้นกราฟใหม่ๆ ให้เกิดขึ้น จากค่าการเคลื่อนย้ายที่สุ่มขึ้นมาจะเห็นได้ว่าไม่มีการวนซ้ำกลับไปยังค่า

คำตอบเดิม จากตารางข้างล่างค่าคำตอบบริเวณใกล้เคียง (e_7, e_8) จะถูกทำเครื่องหมาย " << " เพื่อแสดงให้เห็นว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด และคำตอบนี้จะเป็นคำตอบใหม่ที่ถูกเลือกเพื่อสร้างรูปกราฟใหม่

คำตอบใหม่ที่ได้จากการเคลื่อนย้ายที่ถูกยอมรับจะแสดงไว้ในตารางข้างล่าง และจากข้อจำกัดตามที่กำหนดว่า ห้ามลบเส้นกราฟที่เพิ่งเพิ่มเข้าไปใหม่ ดังนั้น e_6 จะถูกเก็บไว้ในตามูลิสต์ในตัวอย่างนี้ จะใช้ลักษณะของการจดจำลำดับของข้อมูลเป็นตัวจัดเก็บค่าการเคลื่อนย้ายที่มีสถานะเป็นตามูลและในกรณีนี้ ค่าที่มีสถานะตามูล คือ เส้นกราฟที่ถูกเพิ่มเข้าไปในรูปกราฟ ค่าคำตอบปัจจุบันของรอบนี้มีค่าเท่ากับ 32

ค่าคำตอบบริเวณใกล้เคียงของคำตอบปัจจุบัน		
เพิ่มเส้นกราฟ	ลบเส้นกราฟ	ค่าใช้จ่าย
e_6	e_5	136
e_6	e_8	32 <<
e_7	e_8	123
e_1	e_4	233

ตามูลิสต์		
e_6	ϕ	ϕ

ดังนั้น

คำตอบปัจจุบัน								
เส้นกราฟที่	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8
ค่าใช้จ่าย	-	-	9	1	3	19	-	-

$$\text{ค่าใช้จ่ายรวม} = 32$$

$$\text{ค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์} = 32$$

รอบที่ 2 : เหมือนกับในรอบที่ 1 คือ เริ่มต้นด้วยการสร้างชุดคำตอบบริเวณใกล้เคียงคำตอบปัจจุบัน โดยการใช้หลักการการแลกเปลี่ยนเส้นกราฟ จะได้คำตอบบริเวณใกล้เคียง 4 คำตอบ คือ (e_1, e_5) , (e_7, e_4) , (e_8, e_4) และ (e_8, e_5) จากผลการเคลื่อนย้าย คำตอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าไม่มีเส้นกราฟใดที่มีสถานะเป็นตามูล ดังนั้น เส้นกราฟทุกเส้นกราฟจะสามารถบวกเพิ่มเข้าไปในรูปกราฟได้ จาก

ข้อจำกัดตามกำหนดว่า เส้นกราฟที่ถูกเพิ่มเข้าไปในรูปกราฟจะมีสถานะเป็นตาบุดังนั้นในรอบที่ 1 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟ e_6 มีสถานะเป็นตาบุดูอยู่และถูกบันทึกไว้ในตาบูลิสต์ จากผลของการสุ่มคำตอบจะพบว่า เส้นกราฟที่ต้องลบออกจากรูปกราฟไม่ได้มีสถานะเป็นตาบุดังนั้นคำตอบบริเวณใกล้เคียงถือว่าถูกต้องแล้ว ไม่ต้องสุ่มคำตอบบริเวณใกล้เคียงใหม่

คำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการเคลื่อนย้ายคือ (e_1, e_5) ประกอบไปด้วยการเพิ่มเส้นกราฟ e_1 เข้าไปในรูปกราฟและลบเส้นกราฟ e_5 ออกจากรูปกราฟ จากผลการดำเนินการเช่นนี้ทำให้คำตอบใหม่ที่ได้อีกเพิ่มขึ้นเป็น 42 และเส้นกราฟ e_1 จะถูกเพิ่มเข้าไปในตาบูลิสต์โดยเลื่อนเส้นกราฟ e_6 ไปข้างหน้าหนึ่งตำแหน่ง

ค่าคำตอบบริเวณใกล้เคียงของคำตอบปัจจุบัน		
เพิ่มเส้นกราฟ	ลบเส้นกราฟ	ค่าใช้จ่าย
e_1	e_5	42 <<
e_7	e_4	141
e_8	e_4	136
e_8	e_5	136

ตาบูลิสต์		
e_1	e_6	ϕ

ดังนั้น

คำตอบปัจจุบัน								
เส้นกราฟที่	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8
ค่าใช้จ่าย	13	-	9	1	-	19	-	-

$$\text{ค่าใช้จ่ายรวม} = 42$$

$$\text{ค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์} = 32$$

รอบที่ 3 : ดำเนินการเหมือนกับรอบที่ผ่านมา และคำตอบที่ได้จากการเคลื่อนย้ายแสดงไว้ในตารางข้างล่างและคำตอบใหม่ที่ได้อีกไม่ได้มีสถานะที่เป็นตาบุดังนั้นในรอบนี้จะเหมือนกับรอบที่ 2

ตาบูลิสต์		
e_5	e_1	e_6

ค่าคำตอบบริเวณใกล้เคียงของคำตอบปัจจุบัน		
เพิ่มเส้นกราฟ	ลบเส้นกราฟ	ค่าใช้จ่าย
e_8	e_3	40
e_2	e_4	48
e_5	e_3	36 <<
e_5	e_4	44

ดังนั้น

คำตอบปัจจุบัน								
เส้นกราฟที่	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8
ค่าใช้จ่าย	13	-	-	1	3	19	-	-

$$\text{ค่าใช้จ่ายรวม} = 36$$

$$\text{ค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์} = 32$$

ก่อนที่การเคลื่อนย้ายที่ดีที่สุดจะถูกยอมรับ เส้นกราฟ e_5 จะถูกเพิ่มเข้าไปเก็บไว้ในตาบูลิสต์ และค่าใช้จ่ายรวมจะถูกปรับปรุงให้มีค่าเท่ากับ 36

รอบที่ 4 : การดำเนินการในขั้นตอนแรกๆ จะเหมือนกับรอบที่ผ่านมา ในรอบนี้จะเกิดสถานการณ์ใหม่ขึ้นมา จากผลการเคลื่อนย้ายคำตอบที่ได้แสดงไว้ในตารางข้างล่างและการเคลื่อนย้ายที่ดีที่สุดคือ (e_7, e_6) นั่นคือการเพิ่มเส้นกราฟ e_7 เพิ่มเข้าไปในรูปกราฟและลบเส้นกราฟ e_6 ออกจากรูปกราฟ แต่เนื่องจากการลบเส้นกราฟ e_6 ออกจากรูปกราฟนั้นถูกห้ามไว้ (มีสถานะเป็นตาบูล) นั่นคือขณะนี้เส้นกราฟ e_6 ปรากฏอยู่ในตาบูลิสต์ แต่อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายรวมของการดำเนินการนี้มีค่าเพียง 27 เท่านั้นซึ่งมีค่าต่ำกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่มีอยู่ในขณะนี้ ดังนั้นการเคลื่อนย้ายนี้จะผ่านเกณฑ์แอสไพเรชัน ดังนั้นจึงทำการยกเลิกสถานะตาบูลของการเคลื่อนย้ายนี้ชั่วคราว และสามารถทำการเคลื่อนย้ายได้ จากตารางจะสังเกตเห็นว่าการเคลื่อนย้าย (e_7, e_6) ให้คำตอบค่าใช้จ่ายรวมมีค่าน้อยกว่าการเคลื่อนย้าย (e_2, e_1) ซึ่งการเคลื่อนย้าย (e_2, e_1) นี้มีค่าคำตอบที่ผ่านเกณฑ์แอสไพเรชันได้เหมือนกับเส้นกราฟ (e_7, e_6) คำตอบปัจจุบันจะถูกปรับปรุงและได้คำตอบปัจจุบันใหม่ ดังแสดงในตารางและมีค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับ 21 และตาบูลิสต์จะถูกปรับปรุง นั่นคือ เพิ่มค่าเส้นกราฟ e_7 เข้าไปเก็บไว้ในตาบูลิสต์ และเนื่องจากขนาดของตาบูลิสต์ที่ใช้เก็บสถานะที่เป็นตาบูล

มีขนาดเท่ากับ 3 เท่านั้น ดังนั้น คังนั้นเส้นกราฟ e_6 จะถูกลบออกจากตาบูลิสต์และทำให้เส้นกราฟ e_6 มีสถานะที่ไม่เป็นตาบูลิสต์

ค่าคำตอบบริเวณใกล้เคียงของคำตอบปัจจุบัน		
เพิ่มเส้นกราฟ	ลบเส้นกราฟ	ค่าใช้จ่าย
e_3	e_4	44
e_7	e_6	27 $T \ll$
e_2	e_1	30 T
e_8	e_4	42

ตาบูลิสต์		
e_7	e_5	e_1

คำตอบปัจจุบัน								
เส้นกราฟที่	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8
ค่าใช้จ่าย	13	-	-	1	3	-	10	-

$$\text{ค่าใช้จ่ายรวม} = 27$$

$$\text{คังนั้น ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด} = 27$$

รอบที่ 5 : ในรอบที่ 5 นี้จะมีสถานการณ์การเคลื่อนย้ายเหมือนกันกับในรอบที่ 4 การเคลื่อนย้ายที่มีสถานะเป็นตาบูลิสต์ให้คำตอบที่ดีที่สุดและมีค่าเท่ากับ 21

ค่าคำตอบบริเวณใกล้เคียงของคำตอบปัจจุบัน		
เพิ่มเส้นกราฟ	ลบเส้นกราฟ	ค่าใช้จ่าย
e_6	e_4	45
e_2	e_1	21 $T \ll$
e_3	e_4	135
e_3	e_5	133 T

ตาบูลิสต์		
e_2	e_7	e_5

ดังนั้น

คำตอบปัจจุบัน								
เส้นกราฟที่	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8
ค่าใช้จ่าย	-	7	-	1	3	-	10	-

$$\text{ค่าใช้จ่ายรวม} = 21$$

$$\text{ดังนั้น ค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์} = 21$$

ลักษณะการเคลื่อนย้ายแสดงไว้ในตารางข้างบน จากตารางสังเกตเห็นว่าคำตอบที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 21 ซึ่งเป็นค่าที่มาจากการเคลื่อนย้าย (e_2, e_1) ถึงแม้ว่าการเคลื่อนย้ายนี้จะมีสถานะเป็นตาบู่ แต่เมื่อทำการตรวจสอบกับเกณฑ์แอสไพเรชันแล้วคำตอบสามารถยอมรับได้ ดังนั้นการเคลื่อนย้ายนี้สามารถกระทำได้

กระบวนการค้นหาจะดำเนินการค้นหาคำตอบไปเรื่อยๆ จนกระทั่งครบจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้หรือจนกระทั่งเกณฑ์การหยุดที่กำหนดไว้มีค่าเป็นจริง

5.3 การประยุกต์ใช้ตัวดำเนินการของวิธีการค้นหาแบบตาบู่

จากตัวอย่างที่ผ่านมาได้อธิบายวิธีการค้นหาแบบตาบู่ไปแล้วบางส่วน มีองค์ประกอบอีกบางอย่างของวิธีการค้นหาแบบตาบู่ที่ต้องอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติม หัวข้อต่อจากนี้จะเป็นการอธิบายถึงตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิธีการค้นหาแบบตาบู่ ยกตัวอย่างเช่น การเคลื่อนย้ายและองค์ประกอบของการเคลื่อนย้าย ตาบูลิสต์และขนาดของตาบูลิสต์ โครงสร้างของข้อมูลที่เป็นไปได้ เกณฑ์แอสไพเรชันและอื่นๆ

5.3.1 ตัวแปรของการเคลื่อนย้าย

ในการป้องกันการวนซ้ำของการเคลื่อนย้าย จำเป็นที่จะต้องเก็บลักษณะการเคลื่อนย้ายลักษณะการเคลื่อนย้ายที่ตรงกันข้ามหรือตัวแปรบางตัวที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้าย การกระทำใดๆ ที่ทำให้ผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้จากการเคลื่อนย้ายจาก S ไปยัง S^{trial} เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระทำนั้นถือได้ว่าเป็นตัวแปรของการเคลื่อนย้ายได้ ถ้ามีการเก็บลักษณะการเคลื่อนย้ายที่ตรงกันข้ามกับลักษณะการเคลื่อนย้ายโดยทั่วๆ ไป ลักษณะการเคลื่อนย้ายนี้จะถูกป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนย้าย (prevented) แต่ถ้าทำการเก็บบันทึกเฉพาะตัวแปรของการเคลื่อนย้าย การเคลื่อนย้ายทั้งหมดที่มีตัวแปรเหล่านี้เกี่ยวข้องจะถูกป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนย้าย (ถ้าการเคลื่อนย้ายเกิดขึ้นในรอบที่ k ถัดจากรอบนี้) ข้อจำกัดที่แตกต่างกันของตัวแปร ทำให้กระบวนการค้นหามีบริเวณการค้นหาที่แตกต่างกัน การเคลื่อนย้ายสามารถพิจารณาถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้มากมาย

ยกตัวอย่างเช่น ในตัวอย่างที่นำเสนอเราจะใช้การเคลื่อนย้ายโดยการสับเปลี่ยนระหว่างเส้นกราฟจากเส้นกราฟปัจจุบันไปยังเส้นกราฟอื่น ดังนั้น การเคลื่อนย้ายลักษณะนี้ประกอบด้วยตัวแปรสองส่วน คือ ตัวแปรแรกจะแทนการเพิ่มเส้นกราฟเข้าไปในรูปกราฟ และตัวแปรที่สองจะแทนการลบเส้นกราฟใดๆ ออกจากรูปกราฟ ดังนั้น ตัวแปรสำหรับการเคลื่อนย้ายสามารถมีได้หลากหลายถ้าตัวแปรของการเคลื่อนย้ายเหล่านั้นทำให้ค่าใช้จ่ายเกิดการเปลี่ยนแปลง ฟังก์ชันเกิดการเปลี่ยนแปลง (ซึ่งไม่ใช่ฟังก์ชันของค่าใช้จ่าย) ซึ่งขึ้นอยู่กับกลวิธีในการค้นหา หรืออื่นๆ

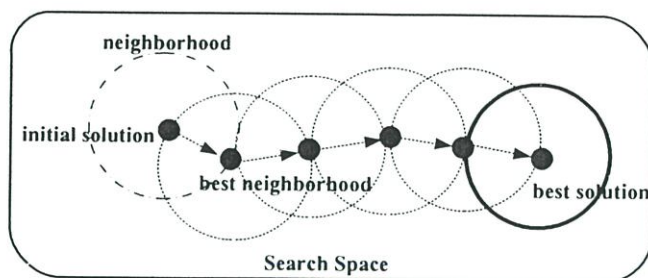
สำหรับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมแบบ combinatorial optimizations โดยส่วนใหญ่จะเข้ารหัสของคำตอบ S ให้อยู่ในรูปของเลขฐานสอง ยกตัวอย่างเช่นในปัญหาการหาค่าที่ต่ำที่สุดในการสร้างรูปกราฟ ในตัวอย่างที่นำเสนอ คำตอบเริ่มต้นสามารถแทนได้ด้วยเวกเตอร์เลขฐานสองขนาด 8 บิต นั่นคือ $[0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1]$ โดยที่ตัวเลข 0 และ 1 แสดงสถานะของการที่เส้นกราฟนั้น ไม่ได้ถูกต่ออยู่ในรูปกราฟหรือถูกต่ออยู่ในรูปกราฟอยู่แล้วตามลำดับ บิตขวาสุดที่แทนด้วยเลข 1 จะหมายถึงมีเส้นกราฟ e_8 อยู่ในรูปกราฟและบิตซ้ายสุดที่มีค่าเท่ากับ 0 จะหมายถึงเส้นกราฟ e_1 ไม่ได้ถูกต่ออยู่ในรูปกราฟ

ดังนั้น ถ้าเข้ารหัสคำตอบให้อยู่ในรูปเลขฐานสองแล้วจะมีตัวแปรต่างๆ ที่เราต้องทำการบันทึกไว้ในตามูลิสต์ประกอบด้วย

1. การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร x_j จาก 0 ไป 1 (เป็นการบ่งบอกการเพิ่มเส้นกราฟ e_j เข้าไปใน รูปกราฟ)
2. การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร x_k จาก 1 ไป 0 (เป็นการบ่งบอกถึงการลบเส้นกราฟ e_k ออกจากรูปกราฟ)
3. ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองตัวแปร คือ บันทึกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร x_j จาก 0 ไป 1 และตัวแปร x_k จาก 1 ไป 0 ให้เป็นตัวแปรอีกตัวแปรหนึ่ง
4. การกระทำใดๆ ที่ทำให้ค่าคำตอบที่ได้จากการเคลื่อนย้ายมีการเปลี่ยนแปลงของคำตอบการกระทำนั้นๆ สามารถนำมาใช้เป็นตัวแปรการเคลื่อนย้ายที่มีผลทำให้ค่าใช้จ่ายหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก $Cost(S)$ ไปยัง $Cost(S^{trial})$ ได้
5. การรวมกันของตัวแปรต่างๆ ที่อธิบายมา อาจจะถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวแปรของการเคลื่อนย้ายได้

ในวิทยานิพนธ์นี้ ลักษณะการเคลื่อนย้ายจะกำหนดโดยใช้การสุ่มเลขจำนวนจริง ระหว่างค่า 0 ถึง 1 คูณด้วยตัวเลขจำนวนหนึ่งบวกกับคำตอบปัจจุบัน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังสมการที่ 5.1 รูปภาพการเคลื่อนย้ายที่ประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์แสดงไว้ดังรูปที่ 5.4 การเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณใกล้เคียงจะเป็นการสุ่มเพื่อทำการเพิ่มค่าคำตอบปัจจุบันและลดค่าคำตอบปัจจุบัน

$$move = current_solution * rand(1) \pm step_size \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.4 ลักษณะการเคลื่อนย้ายเพื่อหาคำคำตอบที่เหมาะสม

5.3.2 ตาบูลิสต์และข้อจำกัดตาบูลิ

ตัวแปรของการเคลื่อนย้ายจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อบังคับให้ข้อจำกัดตาบูลิสามารถป้องกันการย้อนกลับมาของการเปลี่ยนแปลงจากการถูกแทนที่ด้วยตัวแปรเหล่านี้ ข้อจำกัดตาบูลิจะถูกบังคับในกรณีในตัวแปรเหล่านี้ผ่านเกณฑ์ของความคงอยู่ (recency) หรือบางครั้งอาจจะเป็นเกณฑ์ของความถี่ (frequency) เท่านั้น โดยทั่วไปแล้ว ถ้าการเคลื่อนย้ายประกอบด้วยตัวแปร m การเคลื่อนย้ายตรงกันข้ามกันกับทิศทางนี้คือ \bar{m} จะถูกเก็บไว้ในตาบูลิสต์แต่บางครั้งการเคลื่อนย้ายทั้งหมดรวมทั้งการเคลื่อนย้ายที่ตรงกันข้ามจะถูกบันทึกด้วย ยกตัวอย่างเช่น การเคลื่อนย้ายแบบสลับเปลี่ยนเส้นกราฟ คู่อันดับของการเคลื่อนย้ายนั้นๆ จะเป็นตัวแปรที่ถูกบันทึก การใช้เพียงคู่อันดับที่รวมกันอยู่ในข้อจำกัดตาบูลินั้นไม่เพียงพอสำหรับการป้องกันการวนซ้ำ ยกตัวอย่างเช่น ลำดับของการเคลื่อนย้ายที่ซ้ำกันมากกว่า 2 ครั้งจะมีผลทำให้เกิดการวนซ้ำของการค้นหาตลอด เพื่อหลีกเลี่ยงกรณีเช่นนี้ คู่อันดับของการเคลื่อนย้ายจะถูกแบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือ ตัวแปรที่บ่งบอกว่าเริ่มต้นจาก (*from attributes*) และตัวแปรที่บ่งบอกว่าสิ้นสุด (*to attribute*) ยกตัวอย่างเช่น การสลับเปลี่ยนเส้นกราฟ (e_2, e_3) (ความหมายของการเคลื่อนย้ายแบบนี้คือ e_2 จะถูกเพิ่มเข้าไปในรูปกราฟ ในขณะที่ e_3 จะถูกลบออกจากรูปกราฟ) การเคลื่อนย้ายลักษณะนี้สามารถแทนได้ด้วย การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร x_2 จาก 0 ไป 1 และตัวแปร x_3 เปลี่ยนแปลงจาก 1 ไป 0 จากนั้นตัวแปรเหล่านี้จะทำการป้องกันการลบเส้นกราฟใดๆ ที่เพิ่งถูกเพิ่มเข้าไปในรูปกราฟครั้งล่าสุด ซึ่งแทนด้วยการป้องกันการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร x_2 จาก 1 ไปเป็น 0 หรือเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายคือ $from[x_2]=0$ นั่นคือ เมื่อตัวแปรของการเคลื่อนย้ายใดๆ อยู่ในรูป $from[x_2]=0$ ตัวแปรที่สอดคล้องกันที่มีสถานะเป็นตาบูลิจะอยู่ในรูป $to[x_2]=0$ ดังนั้น ณ สถานะปัจจุบันนี้ ถ้ากำหนดให้ตัวแปรแบบ *to attribute* ของการเคลื่อนย้ายปัจจุบันไม่ใช่ตัวแปรแบบ *from attribute* ของการเคลื่อนย้ายก่อนหน้านี้ ดังนั้นการวนซ้ำจะถูกหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดขึ้นได้

นอกเหนือจากความสามารถในการป้องกันการวนซ้ำแล้ว การทำงานของข้อจำกัดตาบูลิที่เด่นชัด คือ เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดความเข้มแข็งในขบวนการค้นหา การป้องกันการวนซ้ำไม่ใช่

จุดมุ่งหมายสุดท้ายในกระบวนการค้นหา เนื่องจากว่า บางครั้งอาจจะคิดว่าถ้าจะมีการย้อนกลับไปหาค้นคำตอบในทิศทางการเคลื่อนย้ายที่เคยได้ค้นหามาแล้วก่อนหน้านี้ และเริ่มกระบวนการค้นหาใหม่โดยมีทิศทางการเคลื่อนย้ายทิศทางอื่นๆ ต่อไปเป็นการทำความเข้าใจและตัวอย่างเพื่ออธิบายลักษณะของข้อจำกัดตาม การเคลื่อนย้ายจะมีสถานะเป็นตาม ถ้า

1. ตัวแปร x_j มีการเปลี่ยนแปลงจากค่า 0 เป็น 1 (สมมติว่าก่อนหน้านี้ ตัวแปรนี้มีการเปลี่ยนแปลงจาก 1 ไปเป็น 0)
2. ตัวแปร x_k มีการเปลี่ยนแปลงจากค่า 1 เป็น 0 (สมมติว่าก่อนหน้านี้ ตัวแปรนี้มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ไปเป็น 1)
3. ข้อจำกัดข้อใดข้อหนึ่งใน 2 ข้อนี้เกิดขึ้น (กรณีเช่นนี้จะทำให้สถานะของการเคลื่อนย้ายมีสถานะเป็นตามมากขึ้น)
4. ข้อจำกัดในข้อ 1 และข้อ 2 เกิดขึ้นพร้อมกัน (กรณีเช่นนี้จะทำให้สถานะของการเคลื่อนย้ายมีสถานะเป็นตามน้อยลง)

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้อจำกัดตามจะกำหนดให้การเคลื่อนย้ายที่มีทิศทางตรงกันข้ามกันกับทิศทางการเคลื่อนย้ายที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรอบการค้นหามีสถานะเป็นตาม และองค์ประกอบของตามลิสต์จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 3 ชนิด คือ ความคงอยู่ ความถี่ และสถานะที่เป็นตาม รูปแบบของการเก็บบันทึกข้อมูลของตามลิสต์แสดงไว้ในรูปที่ 5.5 ความหมายต่างๆ ขององค์ประกอบทั้งสามชนิดอธิบายได้ดังต่อไปนี้ ความหมายของความคงอยู่ คือ การบันทึกค่าระยะเวลาของสถานะที่เป็นตามว่ามีค่าอยู่ในตามลิสต์มีระยะเวลาเท่าใดแล้ว ความหมายของความถี่ คือ การบันทึกทิศทางของการเคลื่อนย้ายที่ถูกเรียกใช้เพื่อเป็นคำตอบที่ดีที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ความถี่ คือ การบันทึกจำนวนครั้งที่ทิศทางใดนั้นๆ ถูกนำมาใช้เป็นคำตอบของกระบวนการสถานะที่เป็นตามมีความหมาย คือ ทิศทางต้องห้ามที่ห้ามไม่ให้ทำการเคลื่อนย้ายในทิศทางนี้ ดังนั้นจากข้อจำกัดตามที่กำหนดไว้ จะทำการบันทึกทิศทางที่ตรงกันข้ามของการเคลื่อนย้ายใดๆ ที่ถูกนำมาใช้เป็นคำตอบของกระบวนการ ห้ามทำการเคลื่อนย้ายในทิศทางนี้ ดังนั้นทิศทางนี้จะถูกบันทึกว่ามีสถานะเป็นตามและจะถูกจัดเก็บไว้ในตามลิสต์

T_1	Re_1	Fr_1
T_2	Re_2	Fr_2
⋮	⋮	⋮
T_{n-1}	Re_{n-1}	Fr_{n-1}
T_n	Re_n	Fr_n

S
 1^{st} Column is Tabu Status
 2^{nd} Column is Recency
 3^{rd} Column is Frequency

รูปที่ 5.5 ลักษณะของตามลิสต์ที่ออกแบบสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

5.3.3 ขนาดของตาบูลิสต์

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งของวิธีการค้นหาแบบตาบูลิสต์คือ ขนาดของตาบูลิสต์ ในตัวอย่างที่ผ่านมามาขนาดของตาบูลิสต์กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3 และเป็นค่าคงที่ โดยทั่วไปแล้วขนาดของตาบูลิสต์จะมีขนาดเล็ก ซึ่งสอดคล้องกับวิธีการค้นหาแบบตาบูลิสต์ที่ใช้หลักการการจดจำระยะสั้น จากบรรณานุกรมก่อนหน้านี้ได้สรุปว่า ขนาดของตาบูลิสต์ที่ดีจะมีค่าอยู่ระหว่างเลข 5 ถึง 12 และตัวเลขมหัศจรรย์สำหรับขนาดของตาบูลิสต์คือ เลข 7 ซึ่งเป็นตัวเลขที่ใช้กำหนดขนาดของตาบูลิสต์ในงานวิจัยหลายๆ เล่ม แต่จากงานวิจัยที่ได้มีการเสนอเมื่อเร็วๆ นี้ ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดของตาบูลิสต์จะเป็นฟังก์ชันของบริเวณที่ต้องการค้นหา หรือบริเวณคำตอบที่ต้องการและชนิดของข้อจำกัดตาบูลิสต์ที่ใช้กับปัญหานั้นๆ โดยทั่วไปแล้วข้อจำกัดตาบูลิสต์ที่กำหนดเงื่อนไขความเป็นตาบูลิสต์เกินไปจะทำให้ขนาดของตาบูลิสต์มีขนาดเล็กและไม่เหมาะสม ขนาดของตาบูลิสต์สามารถกำหนดได้โดยการทดสอบการทำงานของอัลกอริทึมที่เขียนขึ้น สังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับคำตอบที่ได้ ถ้าขนาดของตาบูลิสต์มีขนาดเล็กมากจะก่อให้เกิดการวนซ้ำของกระบวนการค้นหา และถ้าขนาดของตาบูลิสต์มีขนาดใหญ่เกินไปจะส่งผลให้คำตอบที่ได้จากการค้นหาที่มีค่าด้อยลงกว่าเดิมเรื่อยๆ มีกฎเกณฑ์ต่างๆ ที่บรรณานุกรมฉบับต่างๆ ได้พยายามคิดค้นหาวิธีเพื่อหาค่าขนาดของตาบูลิสต์ที่มีความเหมาะสม สำหรับปัญหาที่ต้องการให้ขนาดของตาบูลิสต์มีค่าคงที่ ขนาดที่เหมาะสมของตาบูลิสต์สำหรับปัญหานี้มีอยู่หลายค่า เช่น $7\sqrt{N}$ และ N ตามลำดับ (โดยที่ N คือขนาดของปัญหาที่ต้องการหาคำตอบ ยกตัวอย่างเช่น จำนวนของงาน (modules) ที่ต้องการมอบหมายในปัญหาการมอบหมายงาน (assignment problem, QAP) หรือจำนวนเมืองที่ต้องเดินทางผ่านในปัญหาการเดินทางของนักขาย (traveling salesman problem, TSP) ตามลำดับ)

ในตัวอย่างที่ 5.1 จะสังเกตได้ว่าข้อจำกัดตาบูลิสต์มีเพียงข้อจำกัดเดียวเท่านั้น ดังนั้นขนาดของตาบูลิสต์จึงมีเพียงขนาดเดียว ในขณะที่ขนาดของตาบูลิสต์แบบผลคูณ (multiple tabu list) เป็นขนาดของตาบูลิสต์อีกแบบหนึ่งที่น่าสนใจ และมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ พอสมควร โดยที่ขนาดของตาบูลิสต์แต่ละค่าจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัดตาบูลิสต์ นอกจากนี้แล้วยังมีการประยุกต์ใช้ขนาดของตาบูลิสต์อีกหลายแบบ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเกณฑ์แอสไพเรชันก็ยังมีหลากหลายรูปแบบเหมือนกันเพื่อให้สอดคล้องกับตาบูลิสต์แต่ละแบบ

ในตัวอย่างที่ 5.1 ข้อจำกัดตาบูลิสต์คือ การป้องกันไม่ให้มีการเคลื่อนย้ายเส้นกราฟที่เพิ่งถูกเพิ่มเข้าไปครั้งล่าสุดออกจากกราฟ ในทางตรงกันข้ามเราสามารถกำหนดให้ข้อจำกัดตาบูลิสต์ป้องกันไม่ให้มีการเพิ่มเส้นกราฟใดๆ ที่เพิ่งถูกลบออกจากกราฟ ในกรณีนี้ตัวแปรการเคลื่อนย้ายที่ถูกบันทึกไว้ในตาบูลิสต์คือเส้นกราฟที่ถูกลบออกจากกราฟ โดยการบันทึกตาบูลิสต์จะมีลักษณะการบันทึกแบบการจัดลำดับข้อมูล และมีการลบข้อมูลแบบเข้าก่อน-ออกก่อน (first in-first out) ในการประยุกต์ใช้งานข้อจำกัดตาบูลิสต์ในกรณีที่มีจำนวนของเส้นกราฟที่ถูกลบออกจากกราฟ มีค่าน้อยกว่าจำนวนเส้นกราฟที่เพิ่งถูกเพิ่มเข้าไป ข้อจำกัดตาบูลิสต์ในลักษณะนี้จะป้องกันไม่ให้มีการเพิ่ม

เส้นกราฟใดๆ ที่เพิ่งถูกลบออกจากรูปกราฟก่อนหน้าก็กลับเข้าไปเป็นคำตอบของการค้นหา ซึ่งเป็น การเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับกระบวนการค้นหาเพิ่มขึ้นอย่างมาก คำแนะนำในการเลือกตัวแปรของ การเคลื่อนย้าย คือ ควรเลือกตัวแปรที่ทำให้การเคลื่อนย้ายมีข้อจำกัดที่ขึ้นอยู่กับทิศทางหรือจำนวน ของการเคลื่อน ย้ายที่มีอยู่สำหรับปัญหานั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น ในปัญหาที่ต้องการหาราคาค่าใช้จ่าย ค่าสุดของการสร้างรูปกราฟ การป้องกันการเพิ่มเส้นกราฟที่ถูกลบออกจากรูปกราฟครั้งล่าสุด จะมี ความยืดหยุ่นสูงกว่าการป้องกันการลบเส้นกราฟที่ถูกเพิ่มเข้าไปครั้งล่าสุด เนื่องจากว่าปัญหานี้ รูปกราฟมีจำนวนจุดสำหรับเชื่อมต่อเส้นกราฟจำนวน n จุด ดังนั้นรูปกราฟนี้จะมีจำนวนเส้นกราฟ อยู่ประมาณ $O(n)$ เส้น ($n-1$ เป็นค่าที่ถูกต้องที่สุดสำหรับปัญหานี้) ที่มีความเป็นไปได้ที่จะถูกลบ ออกจากรูปกราฟ ในขณะที่เดียวกันจะมีเส้นกราฟอยู่ประมาณ $O(n^2)$ เส้น ที่มีความเป็นไปได้ที่จะถูก เพิ่มเข้าไปในรูป กราฟ

จากรูปที่ 5.5 ขนาดของดาบูลิสต์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด $n \times 3$ มิติ กำหนดให้ n คือ ตัวแปรที่ต้องการหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดาบูลิสต์ที่ ออกแบบจะประกอบด้วยคอลัมน์ 3 คอลัมน์ คอลัมน์แรกเป็นส่วนที่ใช้เก็บค่าความถี่ของทิศทาง การเคลื่อนย้ายใดๆ ที่ถูกเรียกใช้ เป็นคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรอบการค้นหา คอลัมน์ที่ 2 เป็นส่วนที่ใช้ เก็บค่าความคงอยู่ของทิศทาง การเคลื่อนย้ายใดๆ ที่มีสถานะเป็นดาบูล ส่วนคอลัมน์ที่ 3 เป็นส่วนที่ใช้ เก็บสถานะที่เป็นดาบูลของทิศทาง การเคลื่อนย้ายใดๆ

5.3.4 รูปแบบของเกณฑ์แอสไพเรชัน

ตัวอย่างข้างต้นได้อธิบายถึงการประยุกต์ใช้เกณฑ์แอสไพเรชันซึ่งประกอบไปด้วย เงื่อนไขของการยกเลิกสถานะที่เป็นดาบูล นั่นคือจะทำการยกเลิกสถานะที่เป็นดาบูลของคำตอบ ถ้า คำตอบที่ค้นหาได้ในรอบการคำนวณปัจจุบันมีค่าดีกว่าคำตอบในรอบที่ผ่านมา นั่นคือ $Cost(S^{trial}) < Cost(BestS)$ ลักษณะการกำหนดเกณฑ์แอสไพเรชันแบบนี้เราเรียกว่า เกณฑ์แอส ไพเรชันกำหนดโดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (global aspiration by objective) ซึ่งได้รับความนิยมมาก ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน และเกณฑ์แอสไพเรชันอีกแบบหนึ่งที่แตกต่างจากวิธีนี้คือ เกณฑ์แอส ไพเรชันที่มีขอบเขต ซึ่งขอบเขตนี้จะถูกกำหนดโดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (regional aspiration by objective) วิธีนี้จะประกอบไปด้วยการแบ่งบริเวณการค้นหา ในเซตของบริเวณการค้นหาทั้งหมด ออกเป็นเซตย่อยๆ

เกณฑ์แอสไพเรชันอีกแบบที่น่าสนใจ คือ เกณฑ์แอสไพเรชันที่มีค่าขึ้นอยู่กับ ทิศทางการค้นหาซึ่งเราเรียกว่า เกณฑ์แอสไพเรชันที่กำหนดโดยทิศทาง การค้นหา (aspiration by search direction) นั่นคือ ถ้ามีการปรับปรุงค่าของคำตอบในทิศทาง การเคลื่อนย้าย m ทิศทางการ เคลื่อนย้ายที่ตรงกันข้าม คือ \bar{m} ซึ่งมีค่าอยู่ในดาบูลิสต์แล้วจะถูกยกเลิกสถานะที่เป็นดาบูล ถ้าคำตอบ ที่ได้จากทิศทาง การเคลื่อนย้าย \bar{m} นี้มีค่าดีขึ้น เวกเตอร์ของทิศทาง การเคลื่อนย้าย (direction) จะเป็น

เวกเตอร์ทิศทางที่บ่งบอกว่ามีการปรับปรุงคำตอบ(improving) หรือ ไม่มีการปรับปรุงคำตอบ (no improving) โดยขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนย้ายนั้น $direction(m)$ = มีการปรับปรุงคำตอบ (หรือ ไม่มีการปรับปรุงคำตอบ) ถ้าการเคลื่อนย้ายครั้งล่าสุดประกอบด้วยทิศทาง \bar{m} ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายที่มีการปรับปรุง (หรือไม่ปรับปรุง) ตัวแปรเกณฑ์แอสไพเรชันสำหรับทิศทาง m จะมีค่าที่ผ่านเกณฑ์ นั่นคือ ไม่มีสถานะที่เป็นตาบอด ถ้า $direction(m)$ = มีการปรับปรุงคำตอบ และการเคลื่อนย้ายปัจจุบันที่สุ่มขึ้นมา มีการปรับปรุง นั่นคือ ถ้า $Cost(S^{trial}) < Cost(S)$ หรืออีกนัยหนึ่งเกณฑ์แอสไพเรชัน ของทิศทางการเคลื่อนย้าย m จะมีค่าที่ผ่านเกณฑ์ ถ้าการเคลื่อนย้าย m ทำให้กระบวนการค้นหาที่มีคำตอบที่ดีกว่า และการเคลื่อนย้ายในทิศทางตรงกันข้ามยังทำให้คำตอบที่ได้จากการสุ่มมีค่าดีกว่าคำตอบปัจจุบันอีกด้วย

เพื่อให้สอดคล้องกับตามลิสต์ที่ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2 เกณฑ์แอสไพเรชันที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดได้ดังนี้ ทิศทางการเคลื่อนย้ายใดๆ ที่มีสถานะเป็นตาบอดจะถูกยกเลิกเมื่อทิศทางการเคลื่อนย้ายใดๆ นั้นมีค่าอยู่ในตามลิสต์นานเกินกว่าค่าความคงอยู่ที่กำหนด หรือ ทิศทางการเคลื่อนย้ายใดๆ นั้น ถูกนำมาใช้เป็นคำตอบบ่อยครั้งเกินกว่าเกณฑ์ความถี่ที่กำหนด

5.3.5 เกณฑ์การหยุด

มีวิธีหลายวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการกำหนดสถานะในการหยุดดำเนินการค้นหา ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกำหนดเกณฑ์การหยุดการค้นหาจากสถานะใดสถานะหนึ่งตามข้างล่างนี้

- ค่าคำตอบที่ดีที่สุดมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดไว้
- ครบจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้

ตารางที่ 5.1 ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ทำการทดสอบ

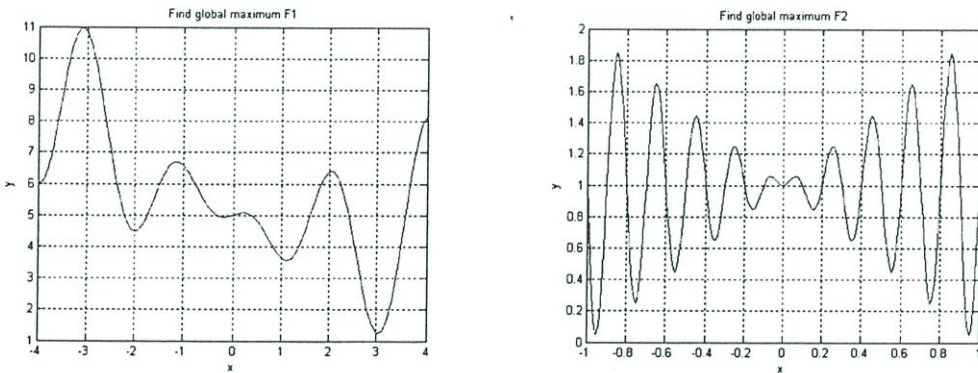
ฟังก์ชัน	ขอบเขต
$F_1 = 4.0 + x \cos(\pi x) + e^{(-0.45x)}$	$x \in [-4, 4]$
$F_2 = x \sin(10\pi x) + 1.0$	$x \in [-1, 1]$
$F_3 = 21.5 + x_1 \sin(4\pi x_1) + x_2 \sin(20\pi x_2)$	$x_1 \in [-3, 12.1]$ $x_2 \in [4.1, 5.8]$
$F_4 = 4000 - 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 + x_1)^2$	$-2.048 \leq x_i \leq 2.048$
$F_5 = 79 - \sum_{j=1}^3 x_j^2$	$-5.12 \leq x_i \leq 5.11$
$F_6 = 20 + \left[\sum_{i=1}^2 (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)) \right]$	$-5.12 \leq x_i \leq 5.11$
$F_7 = \sum_{i=1}^2 -x_i * \sin(\sqrt{ x_i })$	$-512 \leq x_i \leq 511$

ตารางที่ 5.1 ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ทำการทดสอบ (ต่อ)

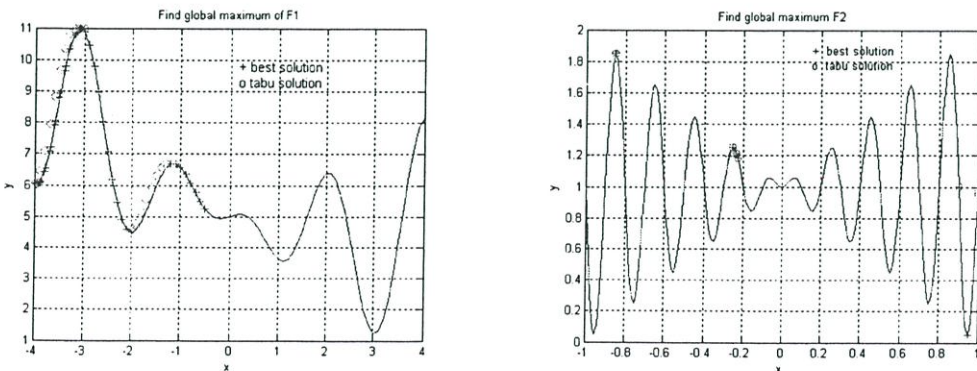
$F_8 = 1 + \sum_{i=1}^2 \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^2 \left(\cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) \right)$	$-512 \leq x_i \leq 511$
$F_9 = 0.5 + \frac{\sin^2(\sqrt{x_1^2 + x_2^2}) - 0.5}{[1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2}$	$-100 \leq x_i \leq 100$
$F_{10} = (x_1^2 + x_2^2)^{0.25} [\sin^2(50(x_1^2 + x_2^2)^{0.1}) + 1]$	$-100 \leq x_i \leq 100$

5.4 การแก้ปัญหาการหาค่าสูงสุดและต่ำสุดของฟังก์ชันคณิตศาสตร์

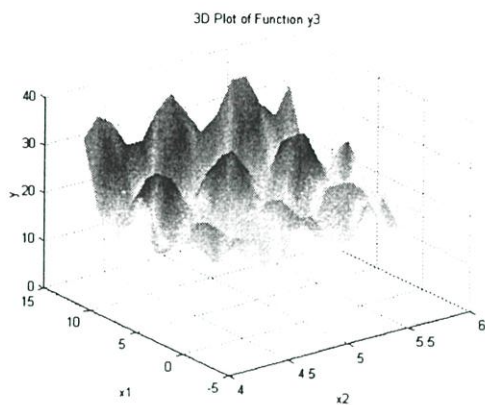
หลักการทั่วไปของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด คือการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าสูงสุด (maximize) หรือต่ำสุด (minimize) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในส่วนนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการค้นหาแบบตาบู่ ด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีรูปแบบที่หลากหลาย จุดมุ่งหมายในการทดสอบคือการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุดของฟังก์ชันที่นำมาทดสอบ ลักษณะของฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่นำมาทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 [36]



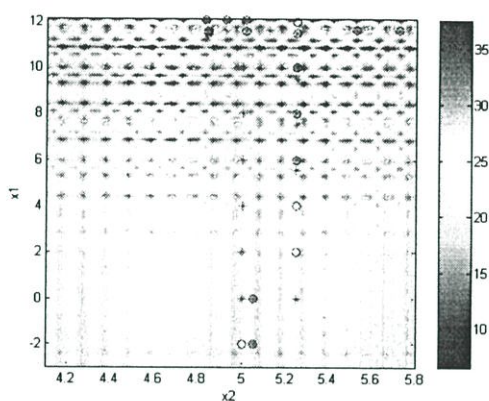
รูปที่ 5.6 ลักษณะกราฟฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_1 และ F_2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.7 กราพลักษณะการลู่อู่เข้าหาคำตอบในลักษณะต่างๆ ของฟังก์ชัน F_1 และ F_2 ตามลำดับ



(ก)



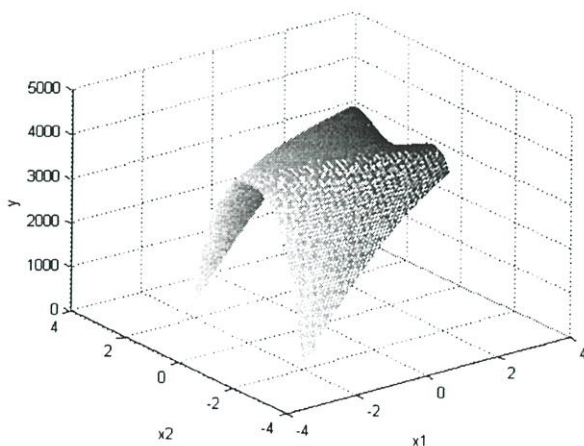
(ข)

รูปที่ 5.8 ลักษณะกราฟ (ก) และลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบ (ข) ของฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_3

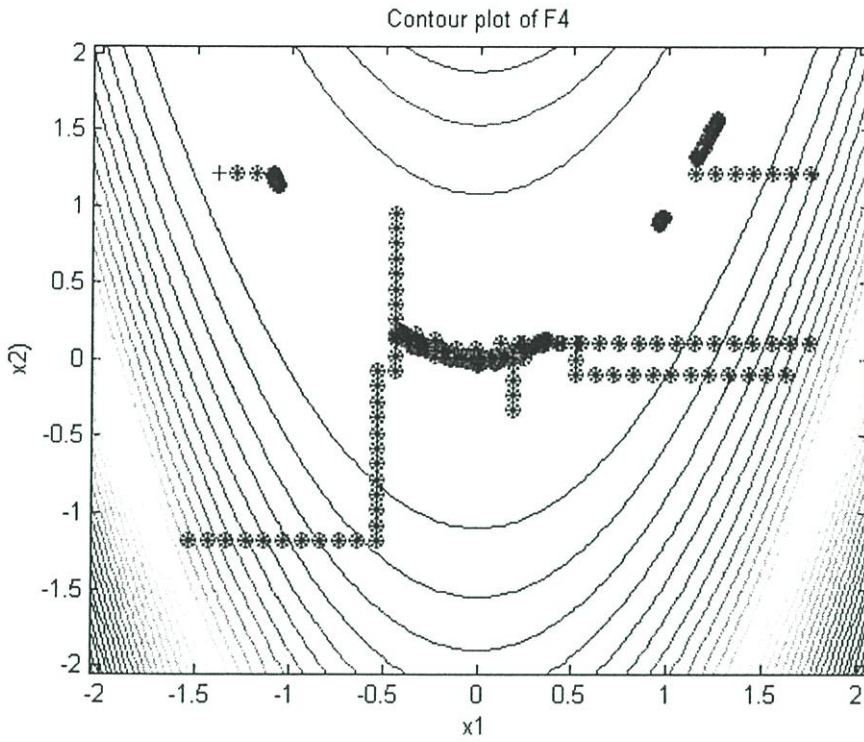
ผลการทดสอบสำหรับฟังก์ชัน F_1 มีค่าสูงสุด ที่ค่า $x = -3.091$ โดยค่าฟังก์ชัน $F_1 = 10.984$

ผลการทดสอบสำหรับฟังก์ชัน F_2 มีค่าสูงสุด ที่ค่า $x = -0.8507$ โดยค่าฟังก์ชัน $F_2 = 1.8505$

ผลการทดสอบสำหรับฟังก์ชัน F_3 มีค่าสูงสุด ที่ค่า $x_1 = 11.619224$ และ $x_2 = 5.624188$ โดยค่าฟังก์ชัน $F_3 = 38.7055$



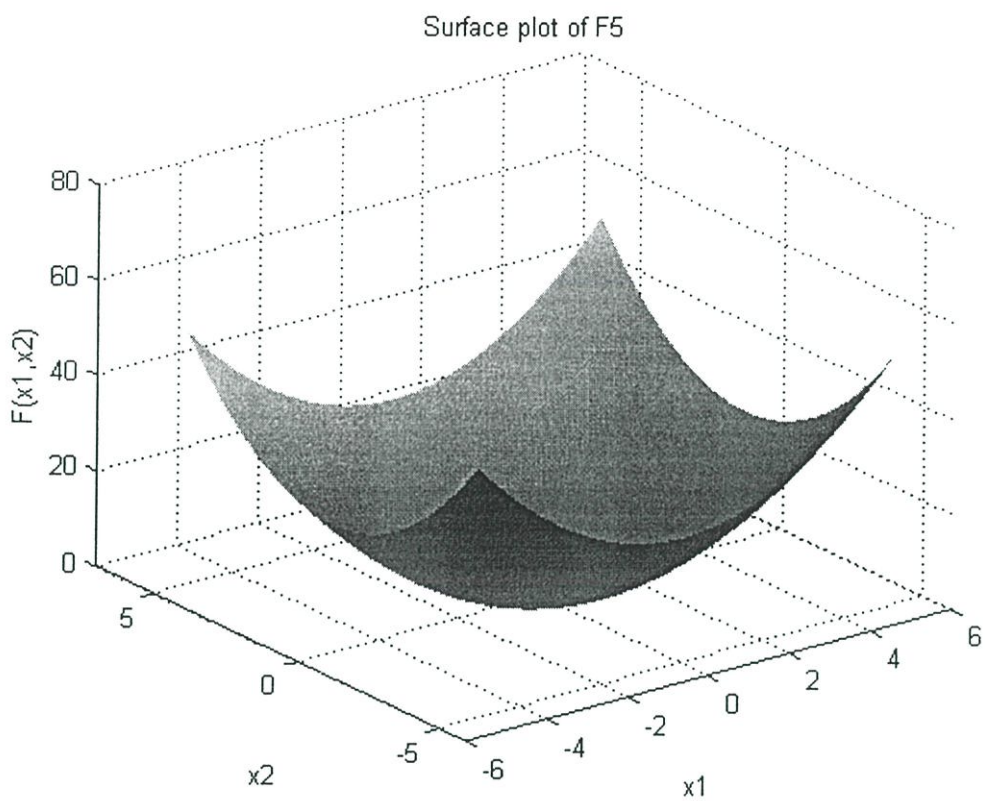
รูปที่ 5.9 ลักษณะของฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_1



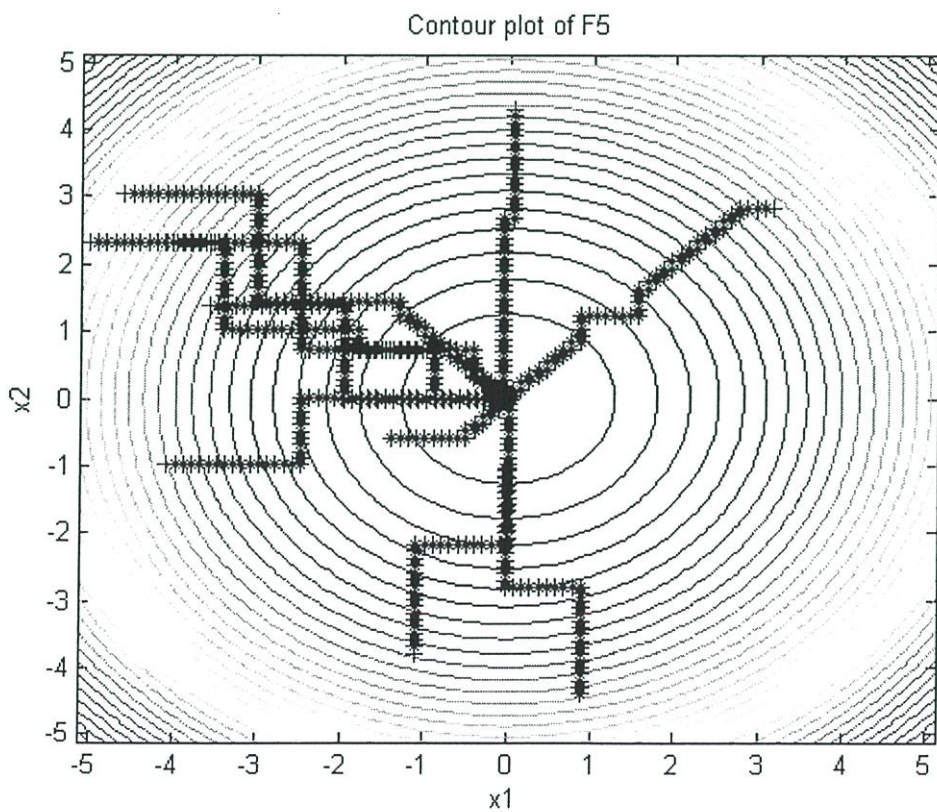
รูปที่ 5.10 ลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบในการทดสอบ F_4

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน F_4 จำนวน 10 ครั้ง

ครั้งที่	x_1	x_2	$F_{4(max)}$	เวลา(วินาที)
1	1	0.94	0.94	0.94
2	2	0.66	0.66	0.66
3	3	0.48	0.48	0.48
4	4	0.72	0.72	0.72
5	5	0.49	0.49	0.49
6	6	0.58	0.58	0.58
7	7	0.51	0.51	0.51
8	8	0.52	0.52	0.52
9	9	0.63	0.63	0.63
10	10	0.55	0.55	0.55
Max			4001.0980	0.9380
Min			4000.4680	0.4840
Avge			4000.9722	0.6063



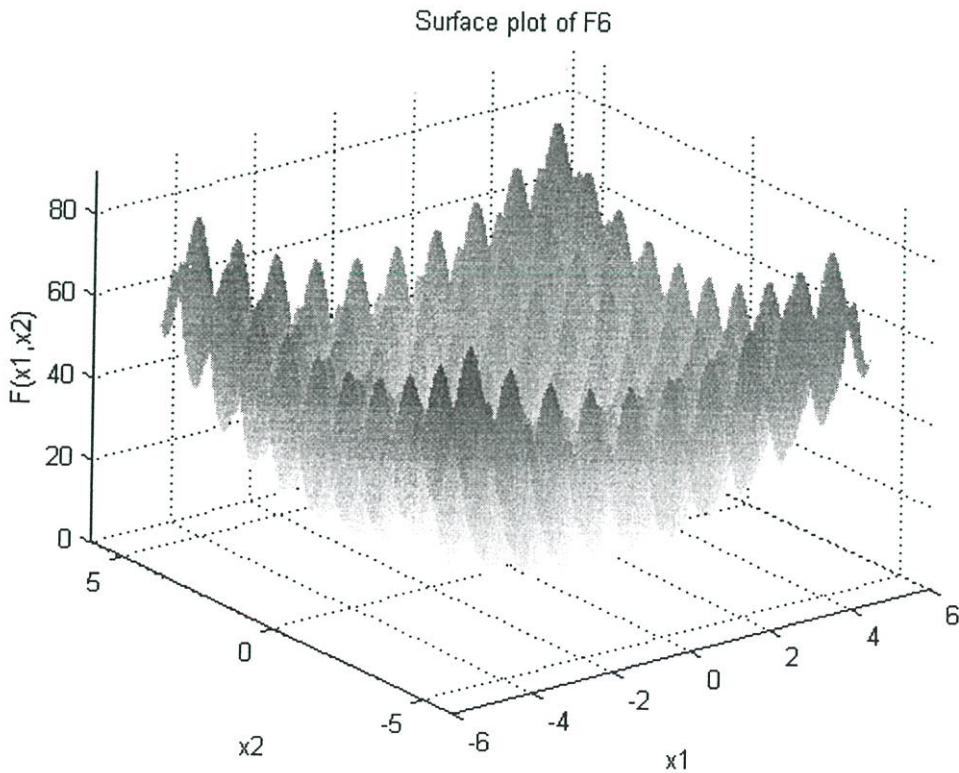
รูปที่ 5.11 ลักษณะของฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ทำการทดสอบ F_5 ,



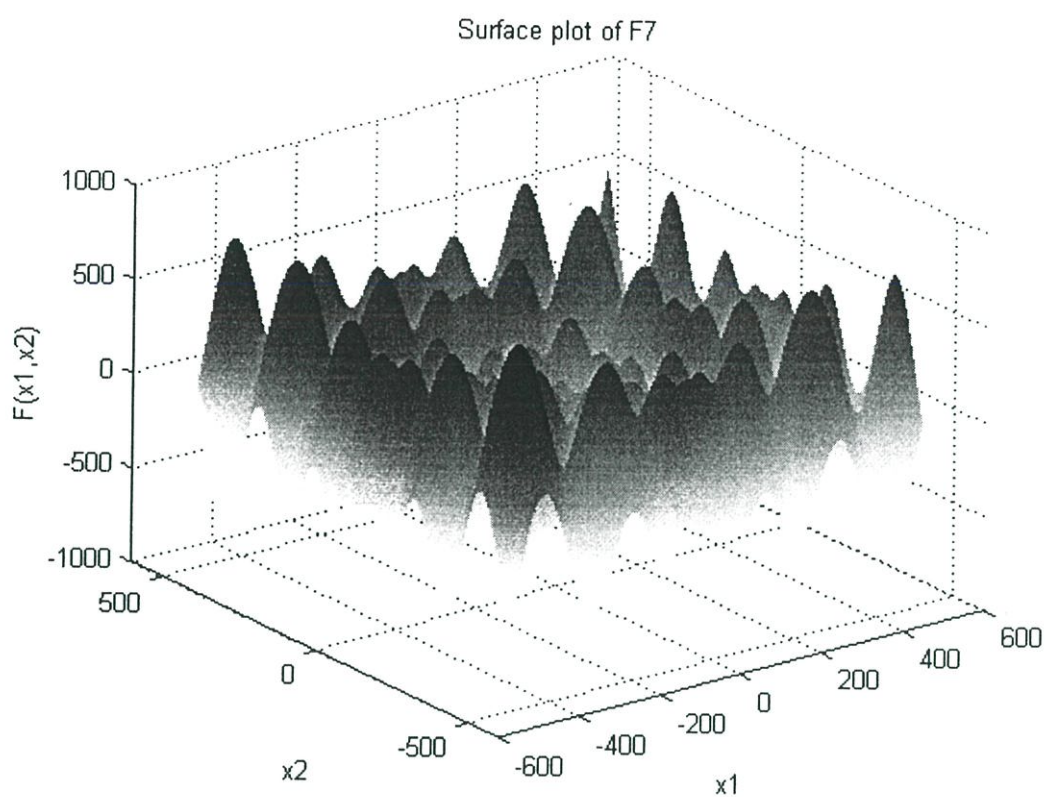
รูปที่ 5.12 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบในการทดสอบ F_5 ,

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน F_5 จำนวน 10 ครั้ง

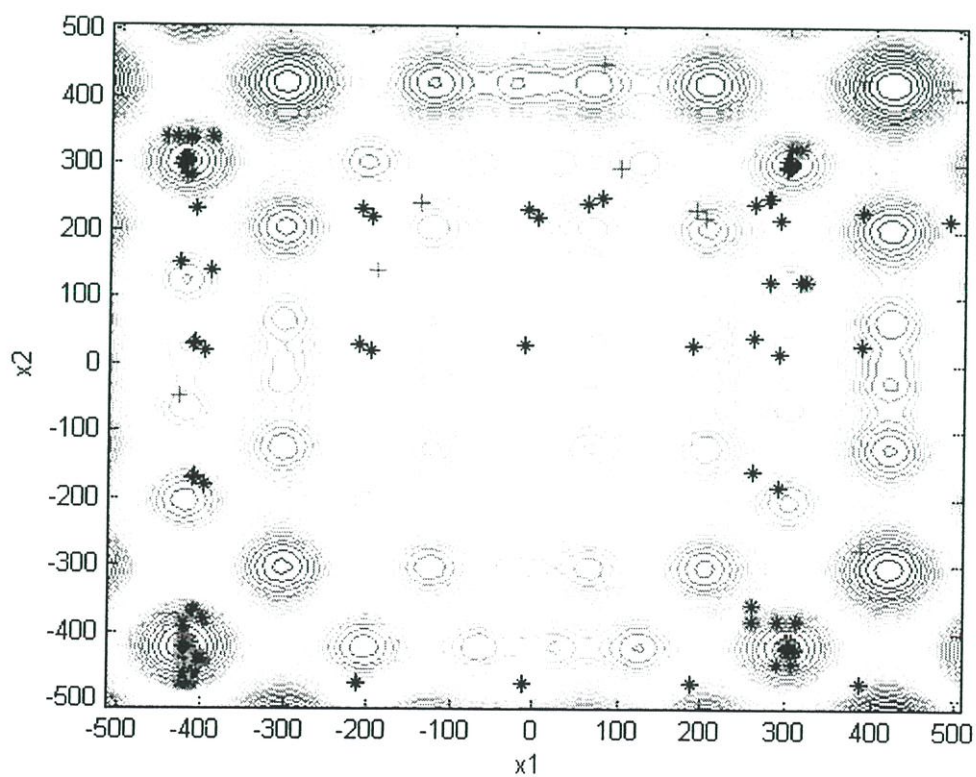
ครั้งที่	x_1	x_2	x_3	$F_{5(max)}$	เวลา
1	0.0000005373	0.0000292654	-0.0000026028	0.00000000086	27.34
2	-0.0000032361	0.0000020727	0.0000012952	0.00000000002	27.67
3	0.0000386102	-0.0001933601	-0.0001685403	0.00000006728	27.97
4	0.0000020424	-0.0000041998	-0.0000053947	0.00000000005	28.25
5	0.0003186782	0.0005811469	0.0034552151	0.00001237780	28.55
6	-0.0000010264	0.0000074143	-0.0000075815	0.00000000011	28.84
7	0.0000040652	-0.0000034637	0.0000071711	0.00000000008	29.13
8	0.0000064851	0.0000001382	-0.0000000313	0.00000000004	29.39
9	-0.0000004270	0.0008687690	-0.0386035028	0.00149098519	29.69
10	-0.0000024584	-0.0000956744	0.0000020943	0.00000000916	29.98
Max			0.001490985	29.98	
Min			0.000000000	27.34	
Avge			0.000150344	28.68	



รูปที่ 5.13 รูปฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_6



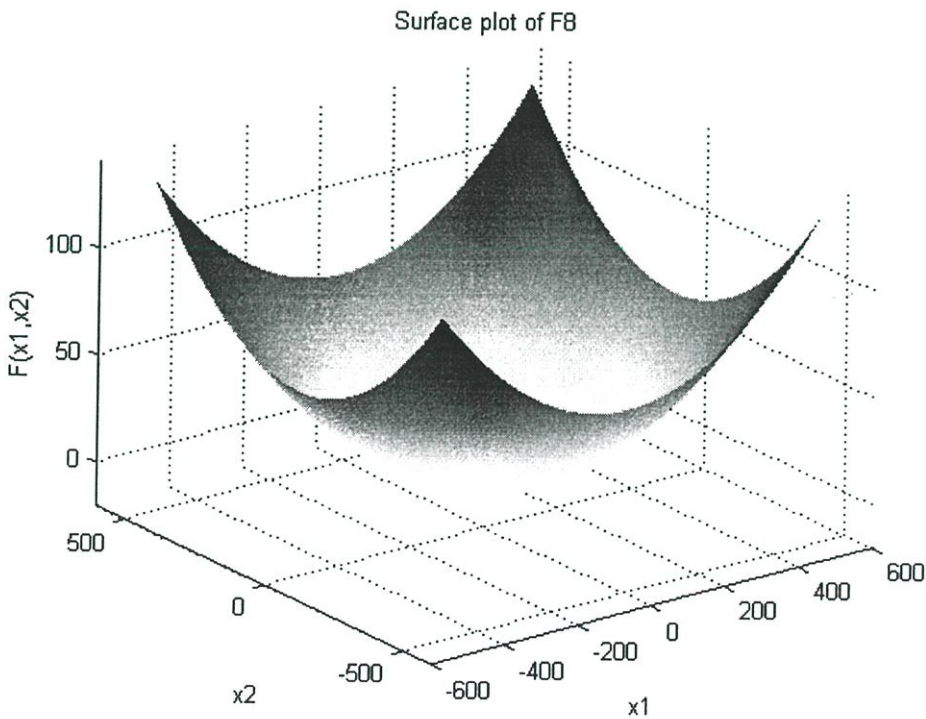
รูปที่ 5.15 ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ทำการทดสอบ F_7



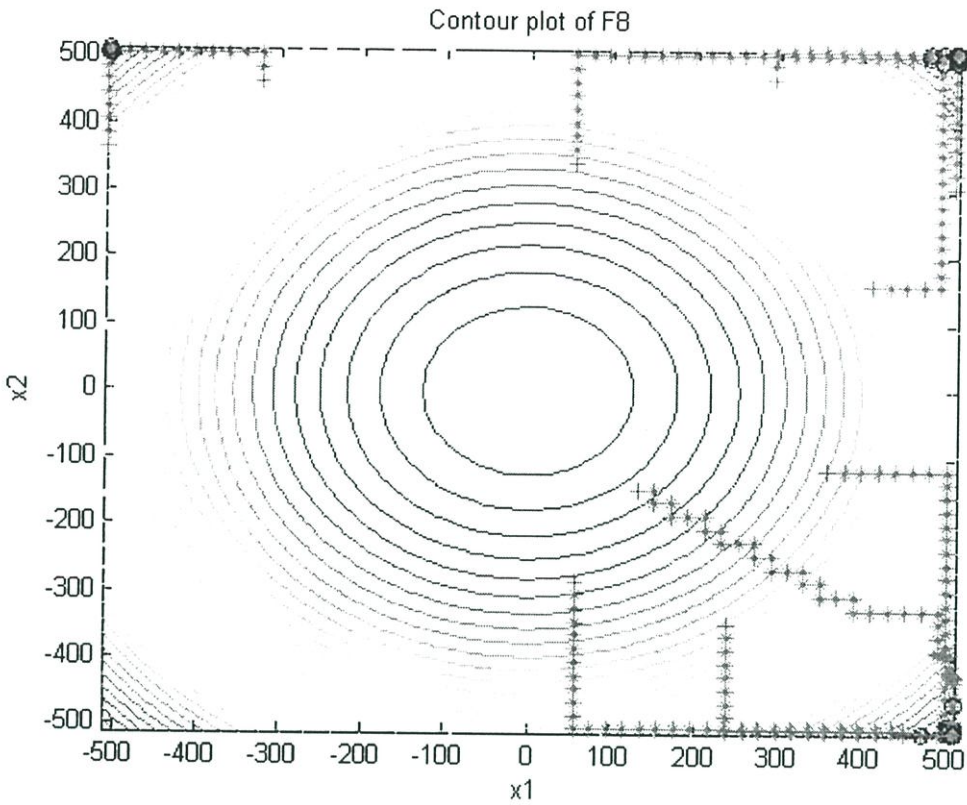
รูปที่ 5.16 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบในการทดสอบ F_7

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน F_7 จำนวน 10 ครั้ง

ครั้งที่	x_1	x_2	$F_{7(\max)}$	เวลา(วินาที)
1	-420.8913517	302.4268458	719.5254657	0.578
2	302.4847173	302.5466859	601.0888406	1.766
3	-421.1133085	-421.0528638	837.9622445	0.593
4	302.4943373	-420.8688006	719.5260609	0.703
5	-421.1008515	-420.9861753	837.963534	1.344
6	303.0060606	-421.3905631	719.4756619	0.578
7	-421.0177067	-421.9195873	837.8513532	0.797
8	-420.9851994	302.5893261	719.5268807	0.437
9	302.2810855	302.3882211	601.0792087	0.438
10	-421.3787793	-419.7961326	837.7711416	0.687
Max			837.9635	1.7660
Min			601.0792	0.4370
Avge			743.1770	0.7921



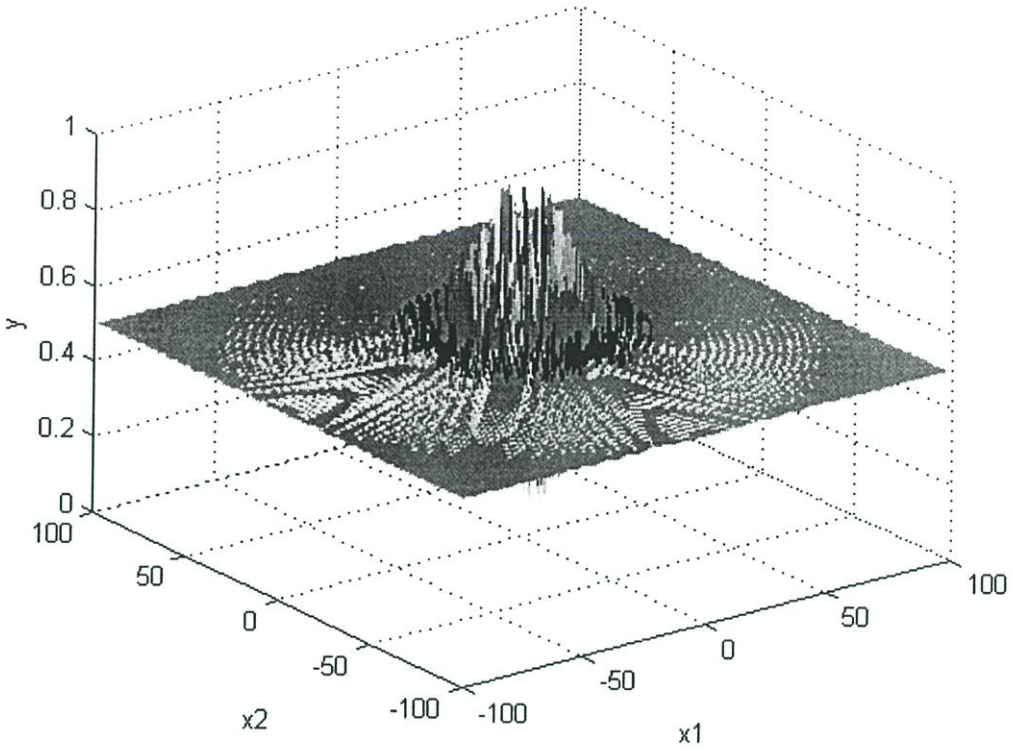
รูปที่ 5.17 ลักษณะฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_8



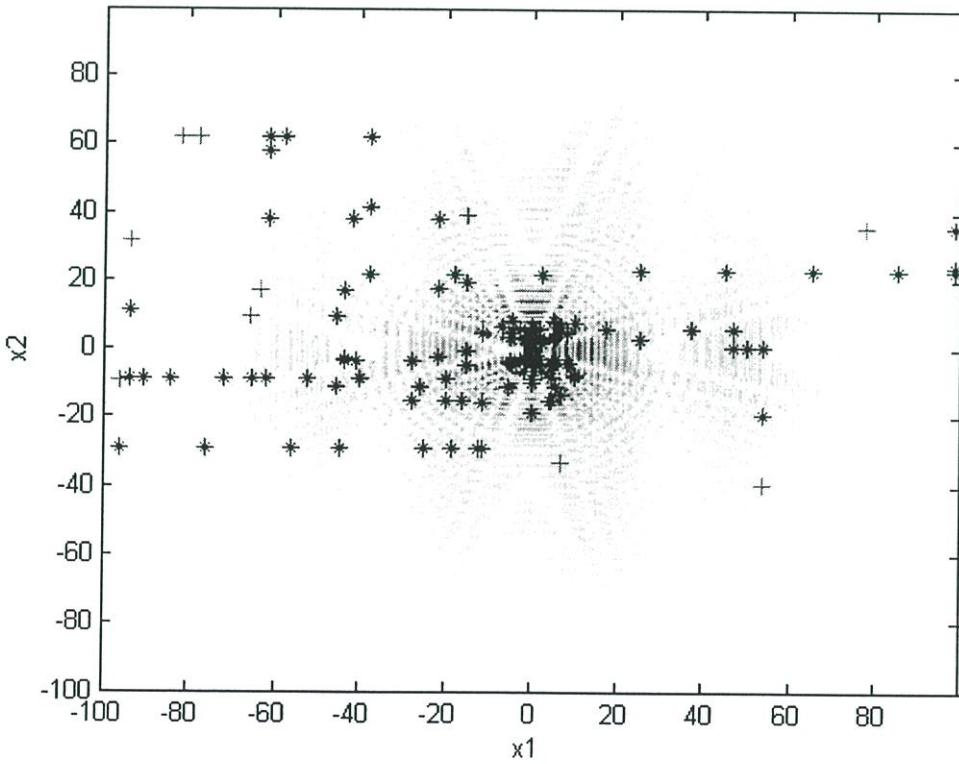
รูปที่ 5.18 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบในการทดสอบ F_8

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน F_8 จำนวน 10 ครั้ง

ครั้งที่	x_1	x_2	$F_{8(\max)}$	เวลา(วินาที)
1	509.11184	510.94963	132.0509	0.781
2	509.22852	-511.41357	132.1174	0.5
3	-511.95058	-507.04201	131.713	0.578
4	509.19074	510.97871	132.0613	0.672
5	-509.19579	-511.53123	132.1175	0.563
6	-511.98835	-506.96030	131.7262	0.531
7	509.23598	-511.47981	132.1182	0.5
8	-509.20924	510.96614	132.0583	0.484
9	-509.21355	510.99847	132.0657	1.141
10	509.19463	510.83789	132.0238	0.593
Max			132.1182	1.1410
Min			131.7130	0.4840
Avge			132.0052	0.6343



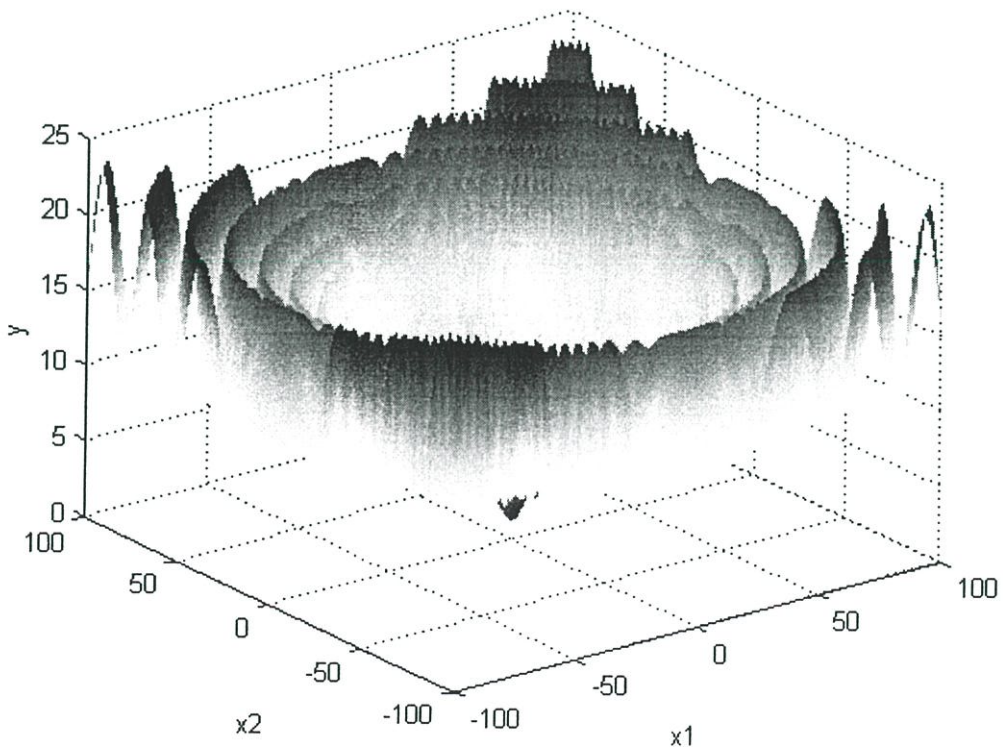
รูปที่ 5.19 รูปภาพฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F ,



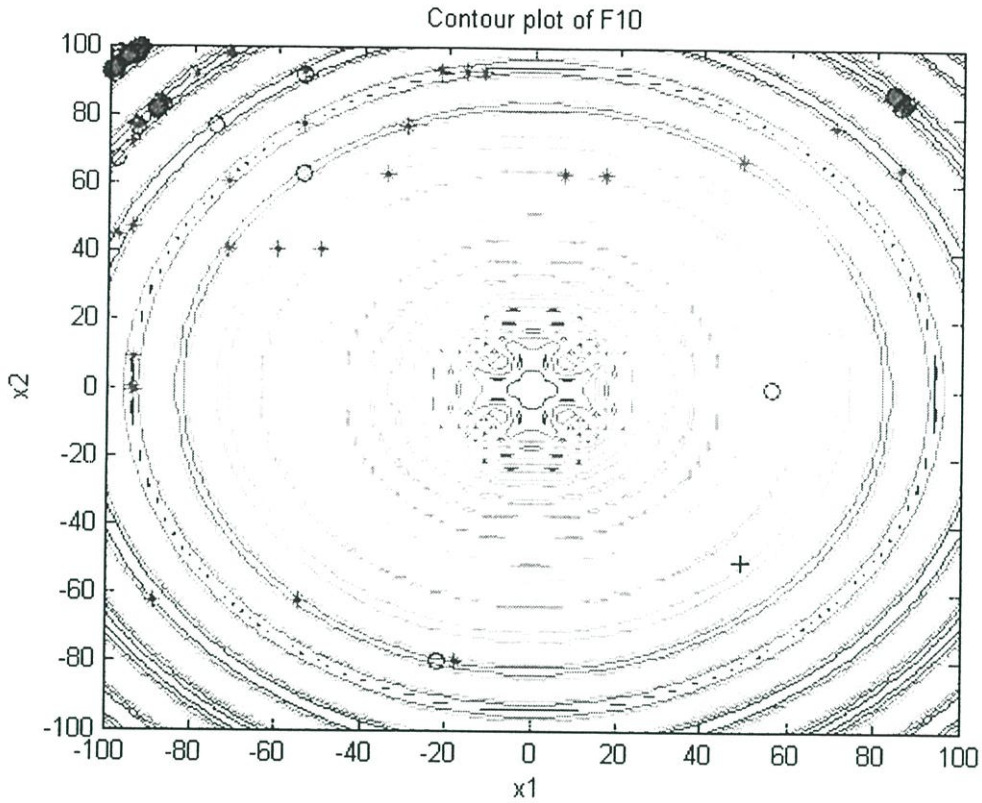
รูปที่ 5.20 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบในการทดสอบ F ,

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน F_9 จำนวน 10 ครั้ง

ครั้งที่	x_1	x_2	$F_{9(\max)}$	เวลา(วินาที)
1	1.922552	-2.44451	0.989485	1.546
2	2.950358	1.18797	0.988549	0.641
3	-0.02869	-0.04177	0.997432	0.703
4	1.837122	-2.54416	0.990284	0.797
5	4.314811	-4.5435	0.962658	1
6	-2.2965	-2.11974	0.990112	0.718
7	2.993487	-0.90562	0.990165	0.532
8	-1.97522	-2.41584	0.989968	0.672
9	5.047502	3.642751	0.960228	0.625
10	2.617122	-1.72519	0.990269	0.563
Max			0.9974	1.5460
Min			0.9602	0.5320
Avge			0.9849	0.7797



รูปที่ 5.21 ภาพฟังก์ชันคณิตศาสตร์ F_{10}



รูปที่ 5.22 ลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบในการทดสอบ F_{10}

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสูงสุดของ ฟังก์ชัน F_{10} จำนวน 10 ครั้ง

ครั้งที่	x_1	x_2	$F_{10(\max)}$	เวลา(วินาที)
1	-87.91535	82.64293	21.9620	0.84
2	-94.00012	98.00057	23.3061	0.30
3	-86.40872	84.24694	21.9611	0.42
4	-98.12319	94.04996	23.3085	0.31
5	-98.56081	93.66751	23.3054	0.31
6	-94.72708	97.36854	23.3088	0.44
7	99.90340	92.42512	23.2871	0.31
8	-88.12871	82.36296	21.9624	0.28
9	-96.45853	95.85944	23.3089	0.45
10	-97.92057	94.21064	23.3092	0.30
Max			23.3092	0.8440
Min			21.9611	0.2810
Avge			22.9020	0.3969

จากผลการทดสอบวิธีการค้นหาแบบตาบอดด้วยฟังก์ชันคณิตศาสตร์ทั้ง 10 รูปแบบ พบว่าวิธีการค้นหาแบบตาบอดสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้เป็นอย่างดี ซึ่งขึ้นอยู่กับคำตอบเริ่มต้นและความซับซ้อนของฟังก์ชันที่นำมาทดสอบ

บทที่ 6

ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเพื่อแก้ปัญหา การจ่ายโหลดอย่างประหยัด

ในบทนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตามู เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 4 กรณีศึกษาประกอบด้วย กรณีที่ 1 เป็นการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยไม่รวมกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 2 เป็นการขยายผลจากกรณีที่ 1 คือการรวมผลของกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเข้าไว้ด้วย โดยทั้ง 2 กรณีมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์อยู่ในรูปแบบของสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง กรณีที่ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์รวมเอาผลของวาล์วเปิด-ปิดไอน้ำของโรงไฟฟ้าเข้าไว้ด้วย ซึ่งทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีความซับซ้อนมากขึ้น กรณีที่ 4 เป็นการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ระบบทดสอบที่ใช้ประกอบไปด้วยระบบโครงข่ายไฟฟ้ากำลังขนาด 6 บัส 30 บัส และ 75 บัส ผลการทดสอบสามกรณีแรกที่แก้ปัญหาโดยวิธีการค้นหาแบบตามู จะทำการเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ในแง่ของผลคำตอบที่ได้ ส่วนในกรณีที่ 4 จะเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตก่อนและหลังการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

6.1 รูปแบบของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

วัตถุประสงค์หลักในการดำเนินการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อนในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ การหาค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องให้ได้กำลังการผลิตรวมทั้งหมด ตรงตามความต้องการของผู้ใช้โดยมีราคาเชื้อเพลิงในการผลิตน้อยที่สุด ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหานี้คือ [1-22]

$$\text{Minimize } F_T = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (6.1)$$

เมื่อ F_T คือ ราคาเชื้อเพลิงรวมทั้งหมด

$F_i(P_i)$ คือ ราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดเครื่องที่ i

n คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ

โดยทั่วไปแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อนจะมีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงอยู่ในรูปของสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง คือ

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (6.2)$$

เมื่อ

a_i , b_i และ c_i คือ สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันอัตราความร้อนของเครื่องกำเนิดเครื่องที่ i

โดยที่ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงรวม จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ คือ เงื่อนไขความสมดุลของกำลังการผลิต(power balance) และความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง

$$\sum_{i=1}^n P_i = D + P_L \quad (6.3)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (6.4)$$

เมื่อ P_i คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

D คือ ความต้องการของกำลังไฟฟ้าในระบบ (demand)

P_L คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดของการส่งจ่าย

$P_{i,\min}$ คือ กำลังผลิตต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

$P_{i,\max}$ คือ กำลังผลิตสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

6.2 วิธีการค้นหาแบบตามูสำหรับแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตามูมาใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้นและให้เป็นคำตอบปัจจุบัน $S_{current} = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n]$

เมื่อ P_1, P_2, \dots, P_n คือ กำลังไฟฟ้าที่ต้องการผลิตของแต่ละเครื่อง ซึ่งจะต้องอยู่ในขีดจำกัดการผลิตของแต่ละเครื่อง และ n คือจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ พร้อมทั้งกำหนด ให้จำนวนรอบของการค้นหา $count = 0$ กำหนดให้ดาบูลิสต์เป็นเซตว่าง

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดหาฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของคำตอบปัจจุบัน $F_T(S_{current})$

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดให้คำตอบที่ดีที่สุด S_{best} ให้เท่ากับคำตอบปัจจุบัน $S_{best} = S_{current}$ และ $F_T(S_{best}) = F_T(S_{current})$

ขั้นตอนที่ 4 ค้นหาคำตอบใหม่จากบริเวณใกล้เคียง $S_{neighbor}$ ของ S_{best} และคำนวณฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของ $S_{neighbor}$ แทนด้วย $F_T(S_{neighbor})$ และตรวจสอบเงื่อนไขต่างๆ ของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดตามสมการที่ (6.3) และ (6.4)

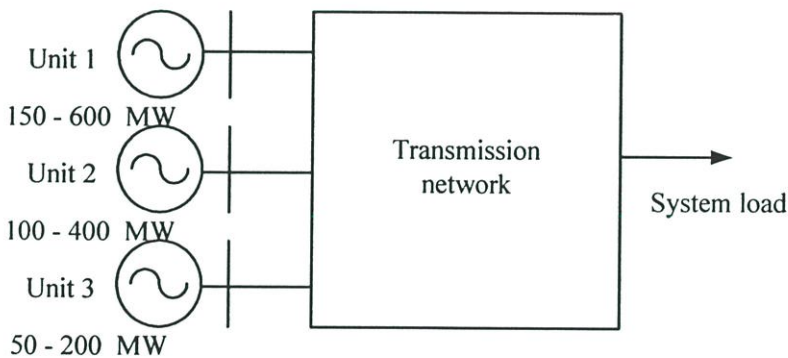
ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $F_T(S_{neighbor}) < F_T(S_{best})$ และเงื่อนไขของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นจริง ให้ปรับปรุงคำตอบใหม่ $S_{best} = S_{neighbor}$ ถ้าค้นหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบเดิมไม่ได้ ให้คำตอบเดิมเป็นคำตอบที่ดีที่สุด

ขั้นตอนที่ 6 โดยการเพิ่มจำนวนรอบของการค้นหา ปรับปรุงบัญชีตาม เกณฑ์ทิศทางการค้นหา และความถี่ของทิศทางการค้นหา

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดการค้นหา คือความผิดพลาดน้อยกว่าที่กำหนดหรือไม่ และจำนวนรอบของการค้นหาเท่ากับจำนวนรอบที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขให้หยุดการค้นหา แต่ถ้าไม่ตรงตามเงื่อนไขให้กลับไปทำงานในขั้นตอนที่ 3

6.3 กรณีศึกษาที่ 1

มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน 3 เครื่อง ความต้องการกำลังไฟฟ้ามีค่า 850 MW ไม่คิดกำลังสูญเสียในระบบการส่งจ่าย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องมีรายละเอียด ตามตารางที่ 1 โดยใช้ข้อมูลจาก [1-4], [17]



รูปที่ 6.1 schematic diagram ของกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 6.1 รายละเอียดของเครื่องกำเนิดกรณีศึกษาที่ 1

Unit	a_i	b_i	c_i	$P_{min}(MW)$	$P_{max}(MW)$
1	561	7.92	0.0016	150	600
2	310	7.85	0.0019	100	400
3	78	7.97	0.0048	50	200

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกรณีศึกษาที่ 1 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$F_T = \sum_{i=1}^3 a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (6.5)$$

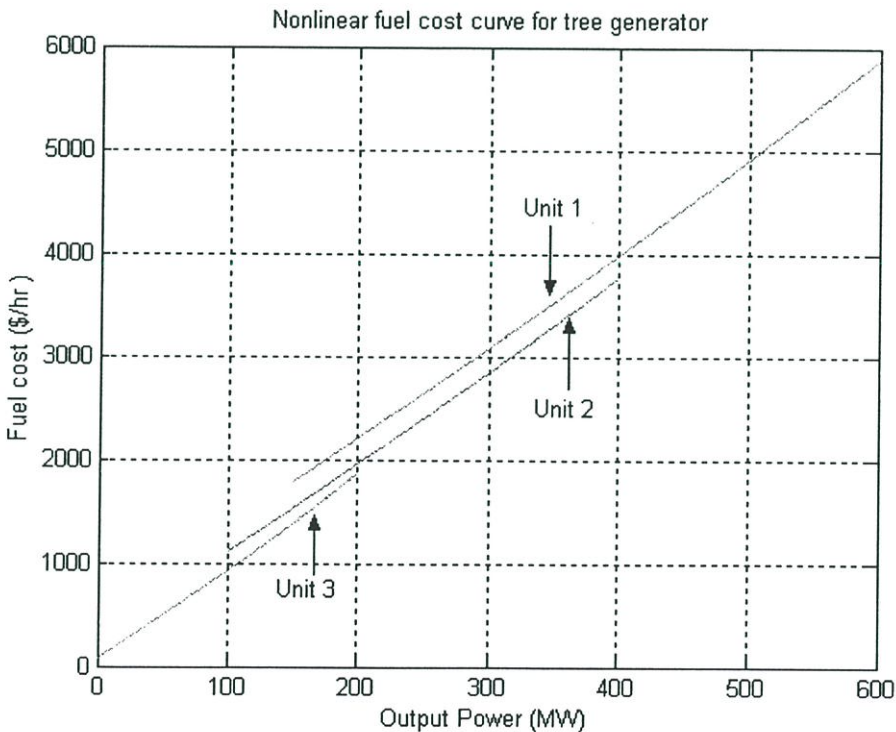
การปรับกำลังการผลิตของกำลังไฟฟ้าจริงในสมการที่ (6.5) จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขความสมดุลของกำลังไฟฟ้าและขีดจำกัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง นั่นคือ

$$D = \sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 \quad (6.6)$$

$$150 \leq P_1 \leq 600 \quad (6.7)$$

$$100 \leq P_2 \leq 400 \quad (6.8)$$

$$50 \leq P_3 \leq 200 \quad (6.9)$$



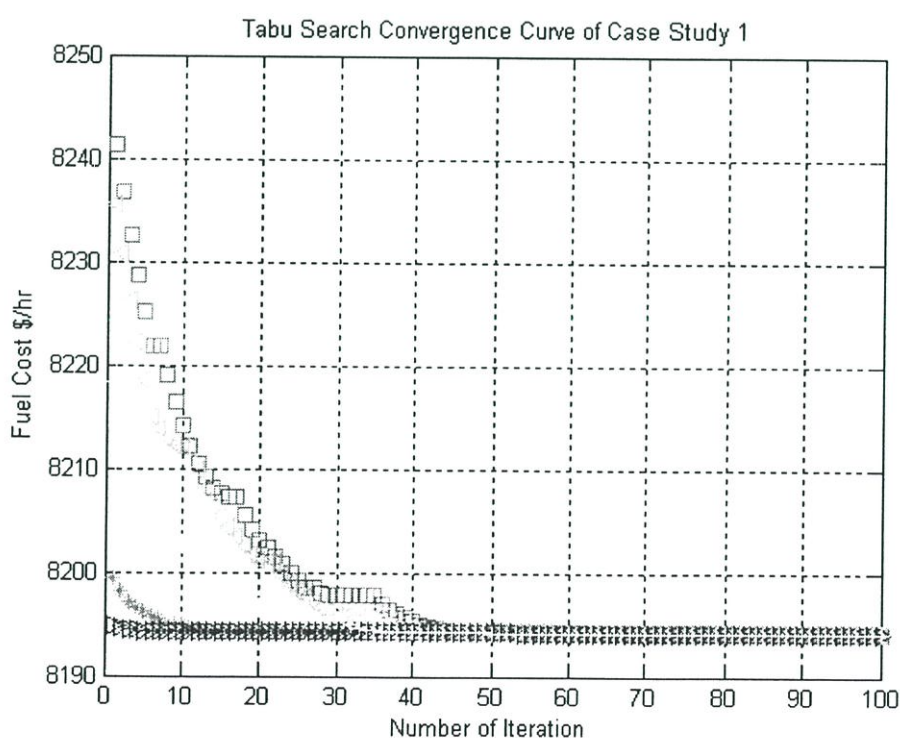
รูปที่ 6.2 ลักษณะกราฟฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดในกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

P(MW)	λ	GA1	GA2	Hopfield	TS
P_1	393.437	393.198	393.112	392.9013	384.528
P_2	334.413	334.789	334.636	334.3876	327.452
P_3	122.149	123.004	122.252	122.1394	138.02
P_T	850	850	850	850	850
F_T	8194.05	8194.360	8194.2931	8194.2031	8194.2015

รูปที่ 6.2 แสดงลักษณะกราฟฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดทั้ง 3 เครื่องของกรณีศึกษาที่ 1 จากรูปกราฟสังเกตเห็นได้ว่าฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงอยู่ในลักษณะไม่เชิงเส้น

ผลการทดสอบของกรณีศึกษาที่ 1 ของวิธีการค้นหาแบบดาบแสดงดังตารางที่ 6.2 โดยทำการเปรียบเทียบผลคำตอบกับวิธี Hopfield neural network [17] วิธีเจเนติก 1 [1] และวิธีวิเจเนติก 2 [4] และวิธีแบบดั้งเดิมคือวิธีการเท่ากันของแลมบ์ดา จะเห็นได้ว่าค่าฟังก์ชันต้นทุนการผลิตมีค่าใกล้เคียงกันทั้งห้าวิธี



รูปที่ 6.3 การลู่เข้าสู่คำตอบที่เป็นคำตอบของกรณีศึกษาที่ 1 โดยทำการทดสอบจำนวน 5 ครั้ง

6.4 กรณีศึกษาที่ 2

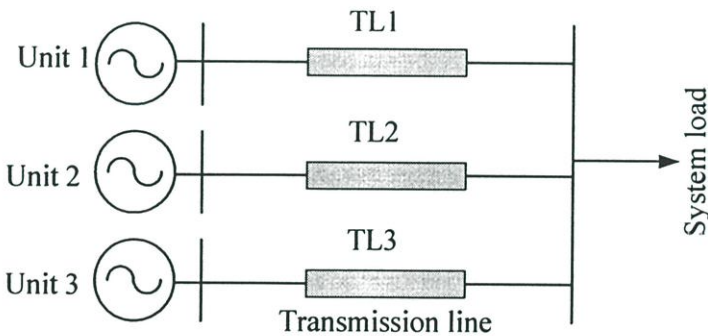
ใช้ข้อมูลเดียวกันกับกรณีศึกษาที่ 1 แต่คิดกำลังสูญเสียในการส่งจ่าย โดยค่ากำลังสูญเสียในสายส่งมีค่าตามสมการที่ 6.10 [22]

$$P_L = 0.00003P_1^2 + 0.00009P_2^2 + 0.00012P_3^2 \quad (6.10)$$

ดังนั้น เงื่อนไขในสมการที่ (6.6) จะต้องพิจารณาผลของกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเข้าไว้ด้วย ดังสมการที่ (6.11) ในขณะที่เงื่อนไขขีดจำกัดกำลังไฟฟ้ายังคงเดิม

$$D + P_L = \sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 \quad (6.11)$$

เมื่อ P_1 , P_2 และ P_3 คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดเครื่องที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

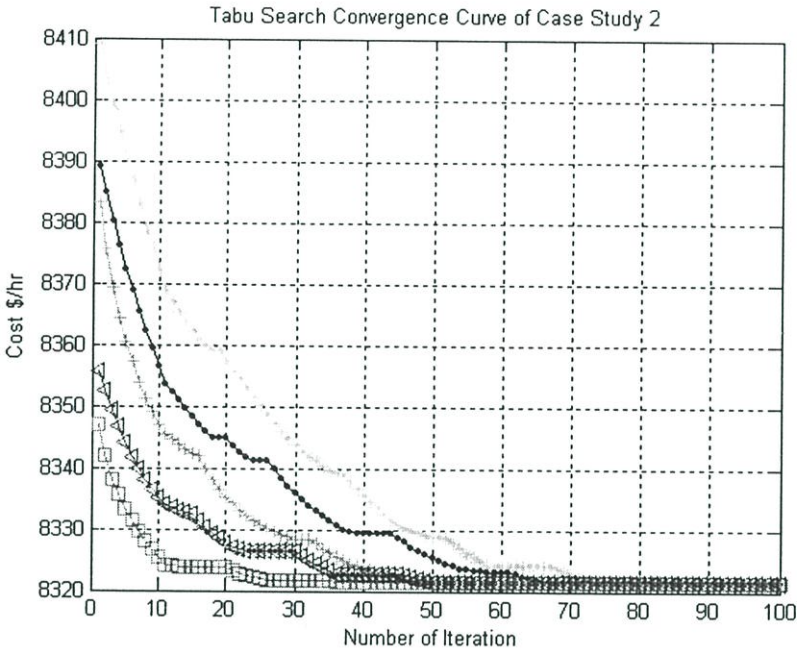


รูปที่ 6.4 Schematic diagram ของระบบในกรณีที่ 2

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

$P(MW)$	λ	GA1	GA2	TS
P_1	435.425	433.410	435.332	418.69
P_2	299.813	301.062	299.854	288.267
P_3	130.585	131.865	130.640	155.78
P_T	865.824010	865.865	865.826	878.388
P_L	15.8241	15.865	15.826	25.65
F_T	8344.21	8344.605	8344.593	3421.32

ผลการทดสอบของกรณีศึกษาที่ 2 แสดงดังตารางที่ 6.3 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีการค้นหาแบบดาบู่ให้คำตอบดีกว่าวิธีจินตนาการทั้งสองแบบ [1], [38] รวมทั้งวิธีการแบบ λ ด้วย และรูปที่ 6.5 แสดงลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบของวิธีการค้นหาแบบดาบู่ในกรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ 6.5 การลู่เข้าสู่คำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมของกรณีศึกษาที่ 2 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง

6.5 กรณีศึกษาที่ 3

กรณีที่ 3 ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน 13 เครื่อง ระบบต้องการกำลังไฟฟ้า 2520 MW ไม่คิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในการส่งจ่าย แต่พิจารณาผลของการเปิด-ปิดวาล์วไอน้ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (valve – point loading) แต่ละเครื่อง ทำให้สมการฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงมีรูปแบบตามสมการที่ 6.12

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \sin[f_i(P_{i,\min} - P_i)]| \quad (6.12)$$

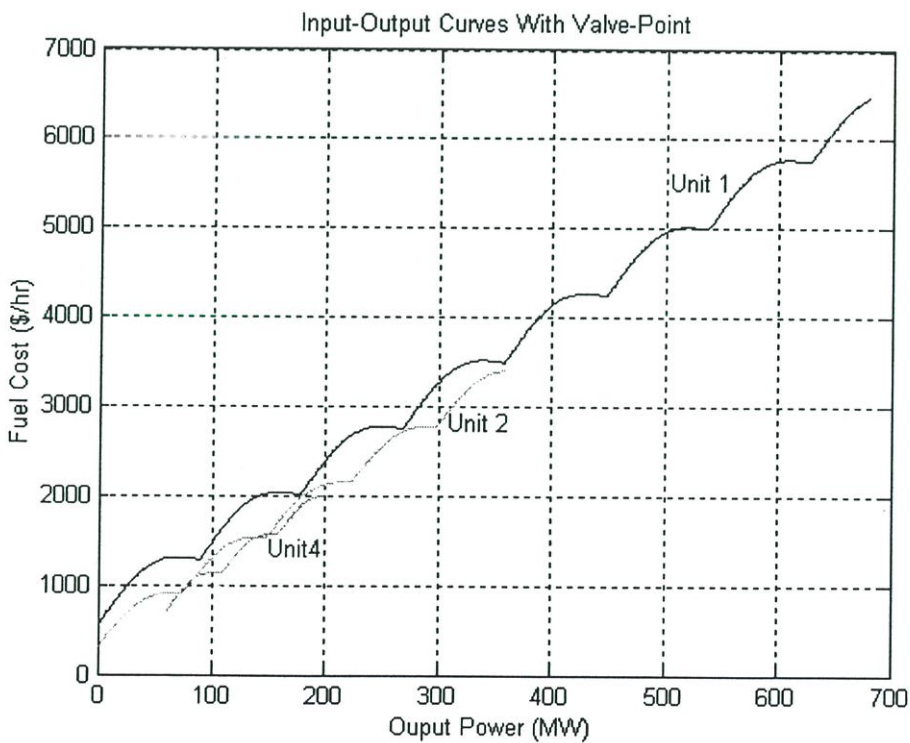
สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกรณีที่ 3 ประกอบด้วยผลรวมของฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดจำนวน 13 เครื่อง สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$F_T = \sum_{i=1}^{13} a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \sin[f_i(P_{i,\min} - P_i)]| \quad (6.13)$$

เงื่อนไขในกรณีศึกษาที่ 3 ประกอบด้วยเงื่อนไขความสมดุลของกำลังไฟฟ้าตามสมการที่ (6.3) โดยไม่พิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง เงื่อนไขขีดจำกัดบนและล่างของกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องตามสมการที่ (6.4) รวมทั้งหมด 27 สมการเงื่อนไขรายละเอียดของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง แสดงไว้ในตารางที่ 6.4 [11] และผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 6.5 โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธี GA1 [11] และ GA2 [38]

ตารางที่ 6.4 รายละเอียดของเครื่องกำเนิดกรณีศึกษาที่ 3

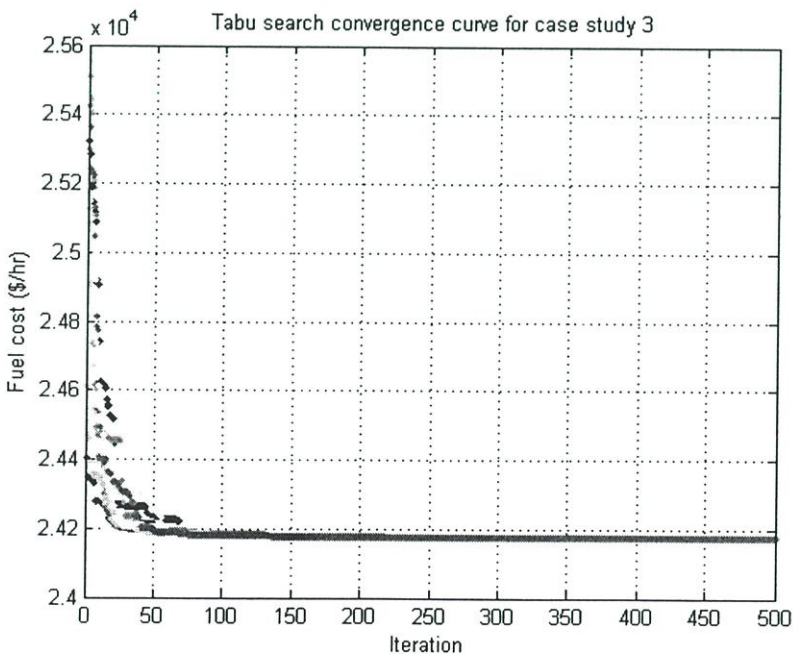
Unit	$P_{i,min}(MW)$	$P_{i,max}(MW)$	a_i	b_i	c_i	e_i	f_i
1	0	680	550	8.1	0.00028	300	0.035
2	0	360	309	8.1	0.00056	200	0.042
3	0	360	307	8.1	0.00056	200	0.042
4-9	60	200	240	7.74	0.00324	150	0.063
10-11	40	120	126	8.6	0.00284	100	0.084
12-13	55	120	126	8.6	0.00284	100	0.084



รูปที่ 6.6 กราฟกำลังไฟฟ้าเนื่องจากผลของ valve - point loading กรณีศึกษาที่ 3

ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 3

$P(MW)$	GA1	GA2	TS
P_1	654.089	679.668	628.3048
P_2	352.438	359.648	299.0738
P_3	352.789	359.824	299.1666
P_4	142.164	157.252	159.7318
P_5	163.274	157.733	159.7324
P_6	142.071	147.748	159.7264
P_7	122.511	151.168	159.7295
P_8	180.098	148.295	159.7243
P_9	139.678	164.299	159.7278
P_{10}	92.096	40.508	77.37974
P_{11}	57.743	41.602	77.39849
P_{12}	55.444	56.080	92.39795
P_{13}	65.606	56.175	87.90638
P_T	2520	2520	2520
F_T	24402.887	24379.782	24170.27



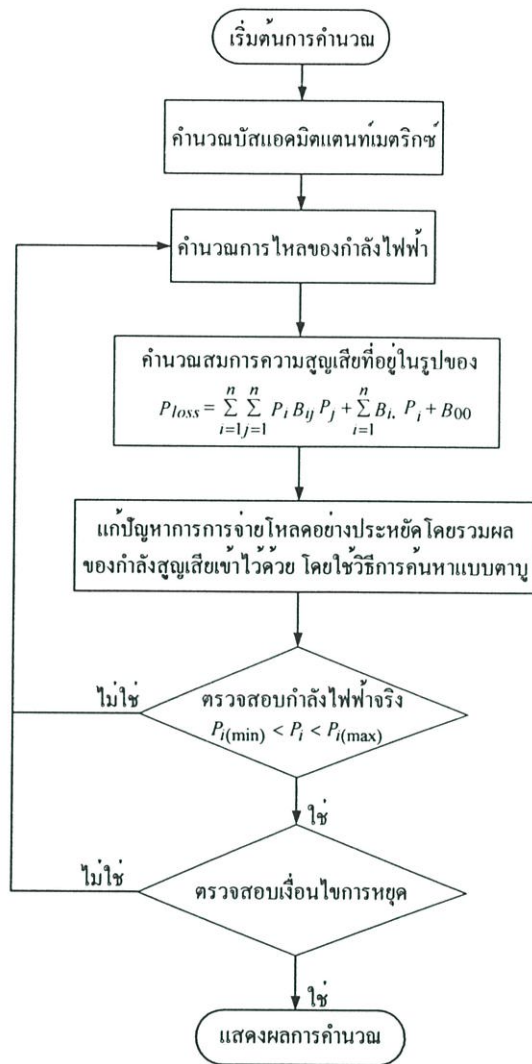
รูปที่ 6.7 ลักษณะการเข้าสู่ค่าตอบในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง

จากผลการทดสอบในกรณีที่ 3 เมื่อคิดผลของการเปิด - ปิดของวาล์วไอน้ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วิธีการค้นหาแบบตามนี้ก็ยังคงให้คำตอบที่ดีกว่าวิธีจินตนาการทั้งสองแบบ ในส่วนของวิธีการเท่ากันของ λ ไม่สามารถนำมาแก้ปัญหาที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลักษณะนี้ได้ เนื่องจากว่าวิธีการแบบดั้งเดิมรวมทั้งวิธีการเท่ากันของ λ จะต้องทำการหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อแปลงค่าสมการที่ไม่เชิงเส้นให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นก่อน แล้วจึงทำการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด รูปที่ 6.5 ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบของวิธีการค้นหาแบบตามในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อทำการทดสอบด้วยคำตอบเริ่มต้นที่ต่างกัน

ผลจากการทดสอบกรณีศึกษาทั้งสามกรณี ดังแสดงในตารางที่ 6.2 6.3 และ 6.5 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีต่างๆ จะเห็นได้ว่า วิธีการค้นหาแบบตามได้คำตอบราคาเชื้อเพลิงต่ำกว่าวิธีอื่นๆ จากกรณีศึกษาที่ 1 คำตอบที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ก็เนื่องจากว่าปัญหามีขนาดเล็กและลักษณะฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีรูปแบบที่ยังง่ายอยู่ ทำให้คำตอบที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและอาจถือว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแล้วได้ กรณีศึกษาที่ 2 คำตอบที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามมีค่าที่ดีกว่าวิธีการแบบอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ จากกรณีศึกษาที่ 3 ปัญหามีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นคำตอบที่ได้จึงมีความแตกต่างกันมากขึ้น จากผลการทดสอบ คำตอบที่ได้จากวิธีที่นำเสนอมีค่าดีกว่านั่นคือ ค่าราคาต้นทุนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตมีค่าต่ำกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบทั้งสองวิธี และจากรูปที่ 6.3, 6.5 และ 6.7 แสดงลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบของวิธีการค้นหาแบบตาม ซึ่งสามารถลู่เข้าสู่คำตอบได้รวดเร็ว และที่สำคัญสามารถหลุดออกจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น ไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากการทำงานและทดสอบกับปัญหาในกรณีต่างๆ พบว่ายิ่งปัญหามีความซับซ้อนมากขึ้นเท่าใด จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบก็จะใช้มากขึ้นด้วย อีกประการหนึ่ง คำตอบเริ่มต้นก็เป็นสิ่งสำคัญในการค้นหาเพราะถ้าสุ่มเลือกหรือสมมติคำตอบเริ่มต้นที่ไม่ดี การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดก็จะใช้เวลาในการค้นหามากขึ้นหรืออาจจะได้คำตอบที่ยังไม่ดีพอ ซึ่งเป็นสิ่งที่การแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมแบบสุ่มวิธีการแบบต่างๆ พบได้บ่อยๆ

6.6 กรณีศึกษาที่ 4

เนื่องจากคำตอบที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการต่างๆ อาจจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่บัสอ้างอิงมีค่าเกินขีดจำกัดได้ ดังนั้นการทดสอบผลของคำตอบที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดกับระบบที่เป็นโครงข่ายก็เป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นในกรณีที่ 4 จึงเป็นการรวมเอาผลของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเข้ากับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ขบวนการทำงานในการแก้ปัญหา ลักษณะนี้แสดงไว้ในรูปที่ 6.8 ระบบที่นำมาทดสอบสำหรับกรณีนี้ คือ ระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 6 บัส 11 สายส่ง ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส และระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เขต 2)



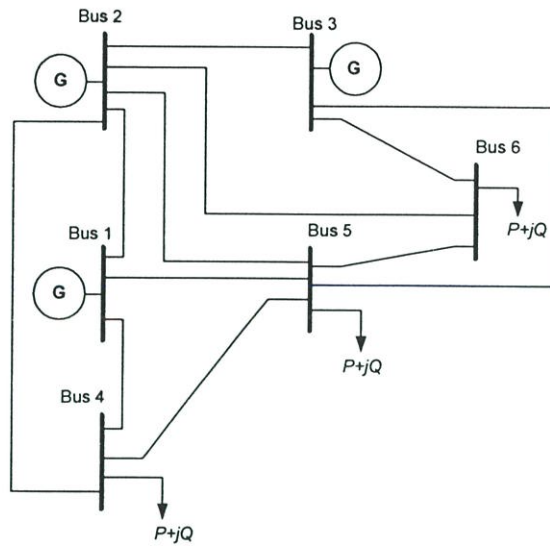
รูปที่ 6.8 ผังการทำงานในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหัดสำหรับกรณีศึกษาที่ 4

6.6.1 ระบบทดสอบ 6 บัส

ระบบทดสอบ 6 บัส 11 สายส่ง [22] ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 3 เครื่อง พิกัดกำลังการผลิตและพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 6.6 ความต้องการกำลังไฟฟ้าทั้งหมดมีค่า 210 MW

ตารางที่ 6.6 ข้อมูลเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องของระบบ 6 บัส

Unit	a_i	b_i	c_i	$P_{i,min}(MW)$	$P_{i,max}(MW)$
P_1	213.1	11.669	0.00533	50	200
P_2	200	10.333	0.00889	37.5	150
P_3	240	10.833	0.00741	45	180



รูปที่ 6.9 ระบบทดสอบ 6 บัส

ตารางที่ 6.7 ผลการคำนวณโหลดไฟฟ้าก่อนแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

Bus No	Voltage	Angle	Load		Generation		Injected
			MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar
1	1.05	0	0	0	89.703	24.890	0
2	1.05	-2.740	0	0	52.829	89.936	0
3	1.05	-2.298	0	0	74.648	63.614	0
4	0.987	-3.542	70	70	0	0	0
5	0.977	-4.254	70	70	0	0	0
6	0.991	-4.421	70	70	0	0	0
รวม			210	210	217.1814	178.441	0

ตารางที่ 6.8 ต้นทุนการผลิตก่อนแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

เครื่องที่	กำลังการผลิต (MW)	ต้นทุนการผลิต (\$/MWh)
P_1	89.7032135	1302.7355
P_2	52.8292801	770.69634
P_3	74.6489064	1089.9635
รวม	217.1814	3163.3954

ตารางที่ 6.9 ผลการคำนวณโหลดไฟฟ้าหลังแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

Bus No	Voltage	Angle	Load		Generation		Injected
			MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar
1	1.05	0	0	0	50.025	38.811	0
2	1.05	-0.432	0	0	90.786	74.650	0
3	1.05	-0.239	0	0	75.913	63.230	0
4	0.985	-2.036	70	70	0	0	0
5	0.976	-2.669	70	70	0	0	0
6	0.991	-2.375	70	70	0	0	0
รวม			210	210	216.726	176.693	0

ตารางที่ 6.10 ต้นทุนการผลิตหลังแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู

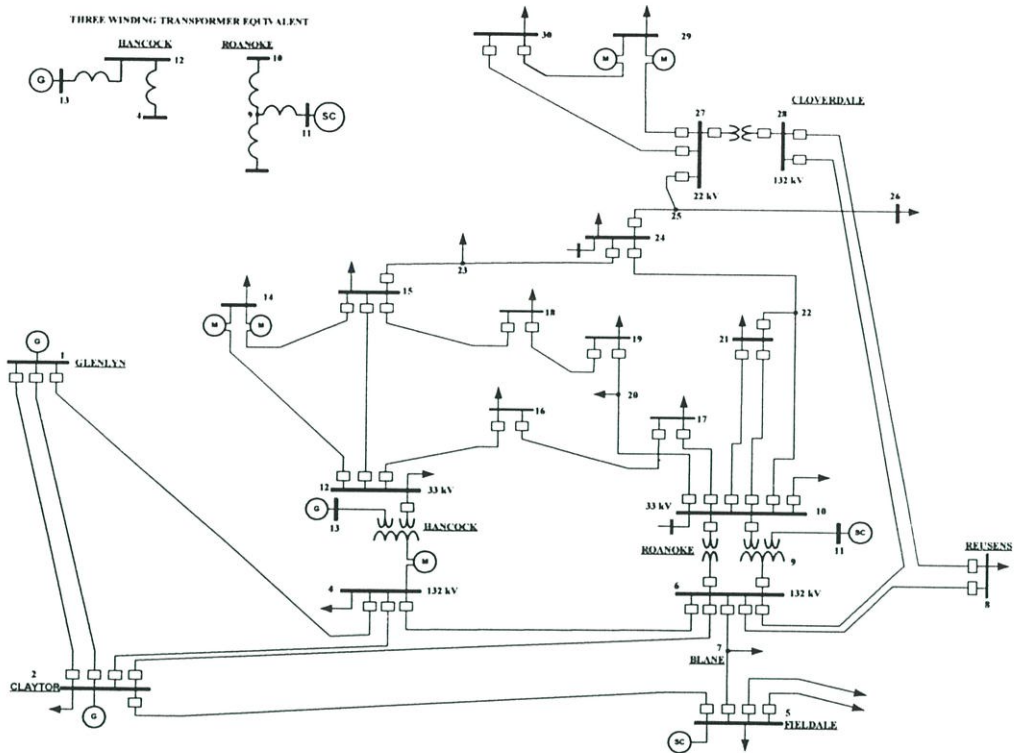
เครื่องที่	กำลังการผลิต (MW)	ต้นทุนการผลิต (\$/MWh)
P_1	50.024896	810.178781
P_2	90.786904	1211.37479
P_3	75.913941	1105.07901
รวม	216.726384	3126.63257

6.6.2 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 6 เครื่อง รายละเอียดของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องแสดงไว้ในตารางที่ 6.11

ตารางที่ 6.11 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง

Unit	a_i	b_i	c_i	$P_{i,min}(MW)$	$P_{i,max}(MW)$
P_1	0	2	0.00375	50	200
P_2	0	1.75	0.0175	20	80
P_5	0	1	0.0625	15	50
P_8	0	3.25	0.00834	10	35
P_{11}	0	3	0.025	10	30
P_{13}	0	3	0.025	12	40



รูปที่ 6.10 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ตารางที่ 6.12 ผลการคำนวณโหลดไฟล้ก่อนแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

Bus No	Voltage	Angle	Load		Generation		Injected
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.086	0.000	0.00	0.00	112.30	23.37	1
2	1.065	-1.829	21.70	12.70	73.85	9.28	2
3	1.048	-3.699	2.40	1.20	0.00	0.00	3
4	1.039	-4.411	7.60	1.60	0.00	0.00	4
5	1.033	-6.869	94.20	19.00	40.51	19.77	5
6	1.036	-5.268	0.00	0.00	0.00	0.00	6
7	1.028	-6.433	22.80	10.90	0.00	0.00	7
8	1.033	-5.342	30.00	30.00	27.94	19.24	8
9	1.065	-7.087	0.00	0.00	0.00	0.00	9
10	1.058	-8.722	5.80	2.00	0.00	0.00	10
11	1.085	-5.850	0.00	0.00	11.99	10.45	11
12	1.066	-7.463	11.20	7.50	0.00	0.00	12

(ต่อ)

13	1.061	-5.862	0.00	0.00	22.55	-3.04	0
14	1.052	-8.405	6.20	1.60	0.00	0.00	0
15	1.048	-8.579	8.20	2.50	0.00	0.00	0
16	1.055	-8.265	3.50	1.80	0.00	0.00	0
17	1.052	-8.788	9.00	5.80	0.00	0.00	0
18	1.039	-9.309	3.20	0.90	0.00	0.00	0
19	1.037	-9.556	9.50	3.40	0.00	0.00	0
20	1.042	-9.404	2.20	0.70	0.00	0.00	0
21	1.046	-9.159	17.50	11.20	0.00	0.00	0
22	1.047	-9.147	0.00	0.00	0.00	0.00	0
23	1.039	-9.131	3.20	1.60	0.00	0.00	0
24	1.036	-9.532	8.70	6.70	0.00	0.00	4.3
25	1.036	-9.485	0.00	0.00	0.00	0.00	0
26	1.019	-9.889	3.50	2.30	0.00	0.00	0
27	1.045	-9.200	0.00	0.00	0.00	0.00	0
28	1.035	-5.725	0.00	0.00	0.00	0.00	0
29	1.026	-10.378	2.40	0.90	0.00	0.00	0
30	1.015	-11.222	10.60	1.90	0.00	0.00	0
รวม			283.40	126.20	289.15	79.08	23.3

ตารางที่ 6.13 ต้นทุนการผลิตก่อนแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

เครื่องที่	กำลังการผลิต (MW)	ต้นทุนการผลิต (\$/MWh)
P1	112.30	205.588
P2	73.85	252
P5	40.51	206.25
P8	27.94	86.4625
P11	11.99	70
P13	40.51	90.625
รวม	289.6835	833.68

ตารางที่ 6.14 ผลการคำนวณโหลดไฟฟ้าหลังแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

Bus No	Voltage	Angle	Load		Generation		Injected
			MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar
1	1.086	0.000	0.00	0.00	170.62	9.14	0
2	1.065	-3.217	21.70	12.70	51.59	23.42	0
3	1.047	-5.042	2.40	1.20	0.00	0.00	0
4	1.037	-6.050	7.60	1.60	0.00	0.00	0
5	1.033	-9.666	94.20	19.00	20.51	27.51	0
6	1.036	-7.134	0.00	0.00	0.00	0.00	0
7	1.027	-8.678	22.80	10.90	0.00	0.00	0
8	1.033	-7.274	30.00	30.00	25.49	22.15	0
9	1.065	-9.159	0.00	0.00	0.00	0.00	0
10	1.058	-10.872	5.80	2.00	0.00	0.00	19
11	1.085	-7.977	0.00	0.00	11.46	10.55	0
12	1.064	-9.979	11.20	7.50	0.00	0.00	0
13	1.061	-9.087	0.00	0.00	12.55	-2.24	0
14	1.051	-10.875	6.20	1.60	0.00	0.00	0
15	1.047	-11.003	8.20	2.50	0.00	0.00	0
16	1.055	-10.630	3.50	1.80	0.00	0.00	0
17	1.052	-11.004	9.00	5.80	0.00	0.00	0
18	1.039	-11.638	3.20	0.90	0.00	0.00	0
19	1.037	-11.827	9.50	3.40	0.00	0.00	0
20	1.042	-11.645	2.20	0.70	0.00	0.00	0
21	1.046	-11.317	17.50	11.20	0.00	0.00	0
22	1.047	-11.307	0.00	0.00	0.00	0.00	0
23	1.038	-11.456	3.20	1.60	0.00	0.00	0
24	1.036	-11.722	8.70	6.70	0.00	0.00	4.3
25	1.036	-11.560	0.00	0.00	0.00	0.00	0
26	1.019	-11.964	3.50	2.30	0.00	0.00	0
27	1.045	-11.205	0.00	0.00	0.00	0.00	0
28	1.034	-7.620	0.00	0.00	0.00	0.00	0

(ต่อ)

29	1.026	-12.382	2.40	0.90	0.00	0.00	0
30	1.015	-13.227	10.60	1.90	0.00	0.00	0
รวม			283.40	126.20	292.24	90.53	23.3

ตารางที่ 6.15 ต้นทุนการผลิตหลังแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม

เครื่องที่	กำลังการผลิต (MW)	ต้นทุนการผลิต (\$/MWh)
P_1	170.62	452.9838
P_2	51.59	129.9937
P_5	20.51	49.35243
P_8	25.49	85.89358
P_{11}	11.46	43.42729
P_{13}	12.55	39.98657
รวม	292.27	801.413

ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม ของระบบทดสอบ 6 บัส และระบบมาตรฐาน IEEE 30 บัส แสดงไว้ในตารางที่ 6.10 และ 6.15 ตามลำดับ จากผลของคำตอบพบว่าวิธีการค้นหาแบบตาม สามารถเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมได้เป็นอย่างดีและมีค่าดีกว่าคำตอบก่อนการแก้ปัญหา ต้นทุนการผลิตหลังจากทำการแก้ปัญหาในระบบทดสอบ 6 บัสลดลงเหลือ 3126.632 \$/MWh จากค่าคำตอบเริ่มต้น 3163.395 \$/MWh และในระบบทดสอบ IEEE 30 บัสต้นทุนการผลิตก่อนการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด คือ 901.926 \$/MWh หลังจากแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดแล้ว ต้นทุนการผลิตลดลงเหลือ 801.663 \$/MWh

ผลการคำนวณโหลดไฟฟ้าหลังการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ของระบบไฟฟ้าทั้งสองแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 6.9 และ 6.15 ตามลำดับ ผลจากการคำนวณโหลดไฟฟ้าพบว่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดอยู่ในขอบเขตพิกัด

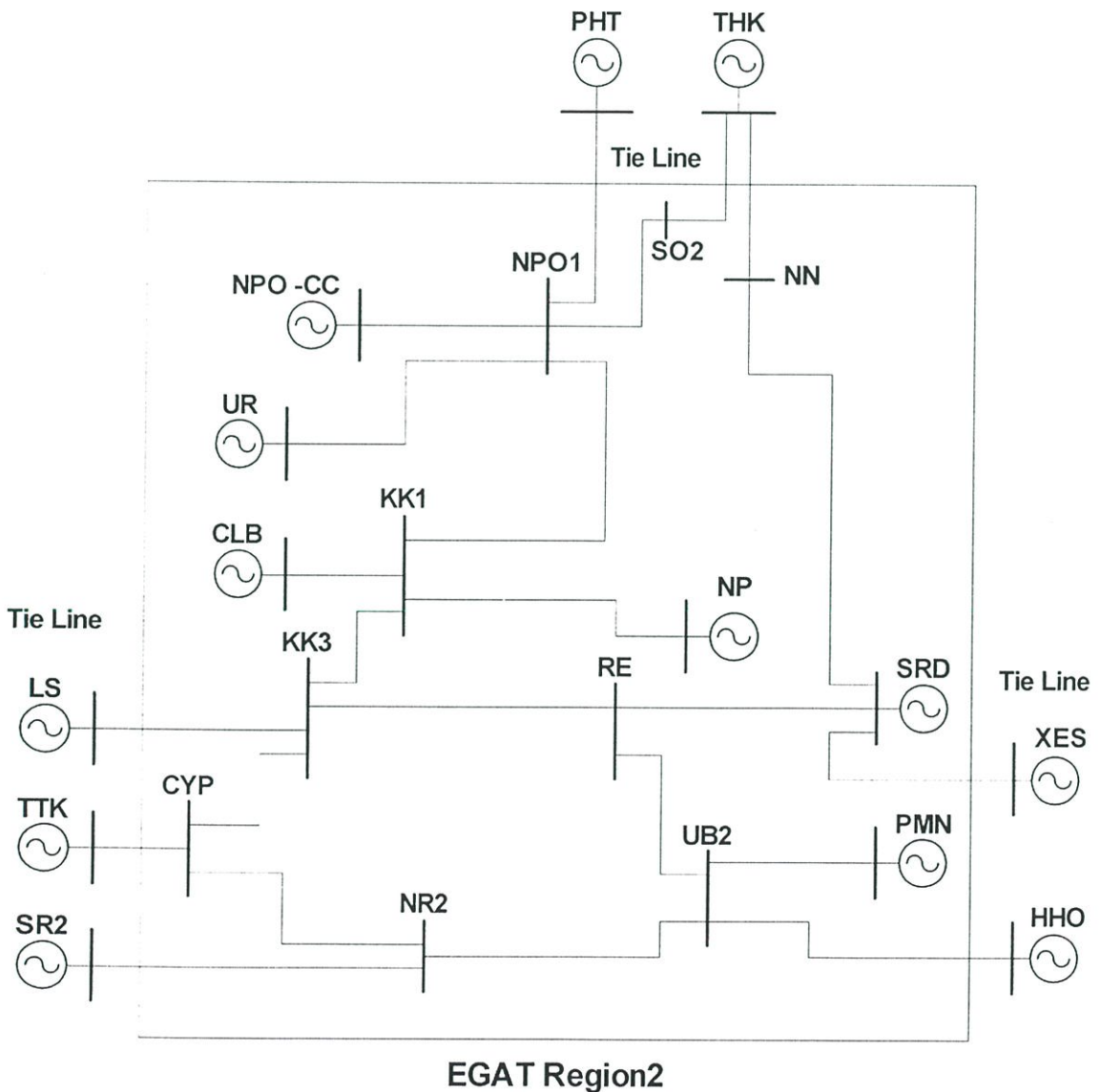
6.6.3 ระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (เขต 2)

ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ(เขต 2) ประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมจำนวน 1 แห่งและโรงไฟฟ้าพลังน้ำจำนวน 5 แห่ง รวมทั้งหมด 6 แห่ง และได้มีการจัดซื้อกำลังไฟฟ้าจากประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาวเพิ่มอีกจำนวน 4 แห่ง มีการเชื่อมโยงกำลังไฟฟ้าจากเขตอื่นๆ ในประเทศอีก 3 แห่ง ดังนั้น ระบบ

ไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เขต 2 จึงมีโรงไฟฟ้าทั้งหมด 13 แห่ง ระบบที่นำมาทดสอบในหัวข้อนี้ คือ ระบบไฟฟ้าในเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2544 โดยแบ่งช่วงสำหรับการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดออกเป็น 3 ช่วง คือช่วงที่ความต้องการกำลังไฟฟ้ามีค่ามาก ช่วงความต้องการกำลังไฟฟ้ามีค่าปานกลาง และช่วงความต้องการกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำ

ข้อกำหนดในการแก้ปัญหาที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

1. โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมนำพองกำหนดให้เป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อน
2. สายส่งเชื่อมโยงที่เสียค่าใช้จ่ายในการซื้อไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยสายส่งเชื่อมโยงที่มาจากประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาวจะกำหนดให้เป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อน
3. สายส่งเชื่อมโยงที่เชื่อมจากการไฟฟ้าภายในประเทศจะไม่ทำการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิต



รูปที่ 6.11 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

โดยที่

<i>CLB</i>	คือ โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนจุฬาภรณ์
<i>NP</i>	คือ โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนน้ำพุง
<i>SRD</i>	คือ โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนสิรินธร
<i>PMN</i>	คือ โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนปากมูล
<i>UR</i>	คือ โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนอุบลรัตน์
<i>NPO</i>	คือ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมน้ำพอง
<i>LS</i>	คือ สายส่งเชื่อมโยงหล่มสัก
<i>TTK</i>	คือ สายส่งเชื่อมโยงท่าตะโก
<i>SR2</i>	คือ สายส่งเชื่อมโยงสระบุรี 2
<i>XES</i>	คือ สายส่งเชื่อมโยงเซเซค โดยเชื่อมต่อกับการไฟฟ้าของประเทศลาว
<i>PHT</i>	คือ สายส่งเชื่อมโยงโพนคอง โดยเชื่อมต่อกับการไฟฟ้าของประเทศลาว
<i>THK</i>	คือ สายส่งเชื่อมโยงท่าแขก โดยเชื่อมต่อกับการไฟฟ้าของประเทศลาว
<i>HHO</i>	คือ สายส่งเชื่อมโยงห้วยแฮะ โดยเชื่อมต่อกับการไฟฟ้าของประเทศลาว

6.6.3.1 ผลการคำนวณก่อนแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

ผลการคำนวณก่อนการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในช่วงเวลาต่างๆ ทั้งสามช่วง ประกอบด้วยช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุดมีระยะเวลาทั้งหมด 5 ชั่วโมง คือตั้งแต่เวลา 17.00-22.00 น. ช่วงความต้องการไฟฟ้าปานกลางเริ่มตั้งแต่เวลา 8.00-17.00 น. รวมระยะเวลาทั้งหมด 11 ชั่วโมง และช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำเริ่มตั้งแต่เวลา 0.00-8.00 น. รวมระยะเวลาทั้งหมด 8 ชั่วโมง ราคาค่าเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแต่ละแห่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.16 อัตราการใช้ไฟฟ้าในการผลิตกำลังไฟฟ้ของโรงไฟฟ้าพลังน้ำแต่ละแห่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.17 พิกัดปริมาณน้ำของโรงไฟฟ้าพลังน้ำทั้ง 4 แห่ง ที่สามารถนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้ในแต่ละวันแสดงไว้ในตารางที่ 6.18

ตารางที่ 6.16 ราคาค่าเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแต่ละแห่ง

โรงไฟฟ้า	a_i (บาท / kWh)	b_i (บาท / kWh)	c_i (บาท / kWh)
โรงไฟฟ้าความร้อนร่วมน้ำพอง	0	0.9772	0
สายส่งเชื่อมโยงเซเซค	0	2.034	0
สายส่งเชื่อมโยงโพนคอง	0	2.034	0
สายส่งเชื่อมโยงท่าแขก	0	1.9507	0
สายส่งเชื่อมโยงห้วยแฮะ	0	1.74	0

ตารางที่ 6.17 ปริมาณน้ำที่ใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำแต่ละแห่ง

โรงไฟฟ้า	ปริมาณน้ำที่ใช้ผลิตกำลังไฟฟ้า (ลบ.ม. / kWh)
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนจุฬาภรณ์	1.117
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนน้ำพุง	5.0946
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนสิรินธร	13.9688
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนปากมูล	ไม่เปิดดำเนินการ
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนอุบลรัตน์	30.8768

ตารางที่ 6.18 ขีดจำกัดปริมาณน้ำของเขื่อนแต่ละแห่งที่สามารถระบายได้ในแต่ละวัน

โรงไฟฟ้า	ปริมาณน้ำที่สามารถระบายได้ต่อวัน(ล้าน ลบ.ม.)
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนจุฬาภรณ์	0.121
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนน้ำพุง	0.6
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนสิรินธร	10
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนอุบลรัตน์	15.25

ตารางที่ 6.19 ขีดจำกัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละช่วงความต้องการไฟฟ้า

โรงไฟฟ้า	โหลดสูงสุด		โหลดปานกลาง		โหลดต่ำ	
	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)
โรงไฟฟ้าความร่อนร่วมน้ำพอง	0	350	0	350	0	350
สายส่งเชื่อม โยงหล่มสัก	201.6	201.6	117.6	117.6	60.4	60.4
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนจุฬาภรณ์	0	40	0	40	0	40
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนน้ำพุง	0	6	0	6	0	6
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนสิรินธร	0	36	0	36	0	36
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนปากมูล	0	0	0	0	0	0
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนอุบลรัตน์	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2
สายส่งเชื่อม โยงเซเซต	0	51	0	51	0	51
สายส่งเชื่อม โยงโพนค้อง	0	126	0	126	0	126
สายส่งเชื่อม โยงท่าแขก	0	220	0	220	0	220
สายส่งเชื่อม โยงห้วยเสาะ	0	140	0	140	0	140

(ต่อ)

สายส่งเชื่อมโยงสระบุรี 2	355.8	355.8	125.5	125.5	84.5	84.5
สายส่งเชื่อมโยงท่าตะโก	341.8	341.8	184.4	184.4	161.2	161.2

ตารางที่ 6.20 ต้นทุนการผลิตที่ใช้ในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ต้นทุนการผลิต(บาท)
โรงไฟฟ้าความร้อนร่วมน้ำพอง	331.74	1,620,894.72
สายส่งเชื่อมโยงหล่มสัก	201.60	-
สายส่งเชื่อมโยงเขเสด	28.20	286,794.00
สายส่งเชื่อมโยงโพนตอง	104.60	1,063,782.00
สายส่งเชื่อมโยงท่าแขก	218.90	2,135,041.15
สายส่งเชื่อมโยงห้วยเขาชะ	138.20	1,202,340.00
สายส่งเชื่อมโยงสระบุรี 2	355.80	-
สายส่งเชื่อมโยงท่าตะโก	341.80	-
รวม	1,720.84	6,308,851.87

ตารางที่ 6.21 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ปริมาณน้ำที่ระบาย(ลบ.ม.)
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนจุฬาภรณ์	19.70	110,024.50
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนน้ำพอง	5.10	129,912.30
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนสิรินธร	32.90	2,297,867.60
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนปากมูล	-	-
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนอุบลรัตน์	25.20	3,890,476.80
รวม	82.90	6,428,281.20

ตารางที่ 6.22 ราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าปานกลาง

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ต้นทุนการผลิต(บาท)
โรงไฟฟ้าความร้อนร่วมน้ำพอง	328.33	3,529,255.30
สายส่งเชื่อมโยงหล่มสัก	117.60	-
สายส่งเชื่อมโยงเขเสด	20.30	454,192.20

(ต่อ)

สายส่งเชื่อมโยงโปนด้อย	72.90	1,631,064.60
สายส่งเชื่อมโยงท่าแขก	215.00	4,613,405.50
สายส่งเชื่อมโยงห้วยเหาะ	135.70	2,597,298.00
สายส่งเชื่อมโยงสระบุรี 2	125.50	-
สายส่งเชื่อมโยงท่าตะโก	184.40	-
รวม	1,199.73	12,825,215.60

ตารางที่ 6.23 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าปานกลาง

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ปริมาณน้ำที่ระบาย(ลบ.ม.)
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนจุฬาภรณ์	-	-
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนน้ำพุง	5.10	285,807.06
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนสิรินธร	33.30	5,116,771.44
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนปากมูล	-	-
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนอุบลรัตน์	25.00	8,491,120.00
รวม	63.40	13,893,698.50

ตารางที่ 6.24 ราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ต้นทุนการผลิต(บาท)
โรงไฟฟ้าความร้อนร่วมน้ำพอง	312.01	2,439,140.46
สายส่งเชื่อมโยงหล่มสัก	60.40	-
สายส่งเชื่อมโยงเซเซด	24.50	398,664.00
สายส่งเชื่อมโยงโปนด้อย	97.00	1,578,384.00
สายส่งเชื่อมโยงท่าแขก	218.90	3,416,065.84
สายส่งเชื่อมโยงห้วยเหาะ	5.20	72,384.00
สายส่งเชื่อมโยงสระบุรี 2	84.50	-
สายส่งเชื่อมโยงท่าตะโก	161.20	-
รวม	963.71	7,904,638.30

ตารางที่ 6.25 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ปริมาณน้ำที่ระบาย(ลบ.ม.)
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนจุฬาภรณ์	-	-
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนน้ำพุง	5.30	216,011.04
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนสิรินธร	35.10	3,922,439.04
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนปากมูล	-	-
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนอุบลรัตน์	25.10	6,200,061.44
รวม	65.50	10,338,511.52

ต้นทุนราคาค่าเชื้อเพลิงรวมตลอดทั้งวันก่อนการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด มีค่าเท่ากับ 27,038,705.77 บาท และปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าตลอดทั้งวันคือ 30,660,491.22 ลบ.ม. จากผลการคำนวณก่อนแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดทำให้ทราบว่า มีโรงไฟฟ้าพลังน้ำบางแห่งที่ทำการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยใช้น้ำเกินเงื่อนไขที่กำหนด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการหาค่าที่เหมาะสมในการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งเป็นที่มาของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

6.6.3.2 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม

สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ที่ประกอบด้วยฟังก์ชันต้นทุนการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน และฟังก์ชันต้นทุนการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$F_{total} = F_{thermal} + F_{hydro} \quad (6.14)$$

โดยที่

F_{total} คือ ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้ารวม

$F_{thermal}$ คือ ต้นทุนรวมของต้นทุนการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน

F_{hydro} คือ ต้นทุนรวมของต้นทุนการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ

ต้นทุนรวมในการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อนทั้งหมด n เครื่อง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการโพลิโนเมียลกำลังสองได้ดังต่อไปนี้

$$F_{thermal} = \sum_{i=1}^n a_i + b_i * P_i + c_i * P_i^2 \quad (6.15)$$

ต้นทุนรวมในการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำทั้งหมด m เครื่อง จะแปรผันตามอัตราการไหลของน้ำในท่อส่งน้ำสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$F_{hydro} = \sum_{i=1}^m q_i * P_i \quad (6.16)$$

โดยที่

q_i คือ ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านท่อส่งน้ำของเครื่องกำเนิดเครื่องที่ i

เนื่องจากต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ไม่เสียค่าใช้จ่ายในการผลิตกำลังไฟฟ้างั้นสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในกรณีศึกษานี้ จะมีเพียงสมการฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อนเท่านั้น สามารถเขียนได้ดังนี้

$$F_{total} = F_{(NPO)} + F_{(XES)} + F_{(PHT)} + F_{(THK)} + F_{(HHO)} \quad (6.18)$$

โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. เงื่อนไขความสมดุลของกำลังไฟฟ้า

$$D + P_L = \sum_{i=1}^n P_i + \sum_{j=1}^m P_j \quad (6.19)$$

2. เงื่อนไขขีดจำกัดกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{min} \leq P_i \leq P_{max} \quad (6.20)$$

3. เงื่อนไขขีดจำกัดปริมาณน้ำที่สามารถระบายได้ในแต่ละวัน

$$\sum_{i=1}^4 q_i \leq q_{lim} \quad (6.21)$$

เมื่อ

 q_{lim} คือ ขีดจำกัดปริมาณน้ำที่สามารถระบายได้ในหนึ่งวัน q_i คือ ปริมาณน้ำที่ใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

4. เงื่อนไขขีดจำกัดปริมาณน้ำที่สามารถระบายได้ในแต่ละช่วงเวลา

$$q_{i,t} \leq q_{i,t-1} - q_{lim} \quad (6.22)$$

โดยที่

 $q_{i,t}$ คือ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i ในช่วงเวลา t $q_{i,t-1}$ คือ ปริมาณน้ำที่ใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i ในช่วงเวลา $t-1$

ผลการคำนวณหลังการแก้ปัญหาการจ่ายไหลต่ออย่างประหยัดในช่วงเวลาต่างๆ ทั้งสามช่วง แสดงรายละเอียดไว้ในตารางข้างล่าง ประกอบด้วยต้นทุนการผลิตช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด แสดงไว้ในตารางที่ 6.26 และ 6.27 ต้นทุนการผลิตช่วงความต้องการไฟฟ้าปานกลางแสดงไว้ในตารางที่ 6.28 และ 6.29 ต้นทุนการผลิตช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำแสดงไว้ในตารางที่ 6.30 และ 6.31 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.26 ราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ต้นทุนการผลิต(บาท)
โรงไฟฟ้าความร้อนร่วมน้ำพอง	349.94	1,709,822.32
สายส่งเชื่อมโยงหล่มสัก	201.60	-
สายส่งเชื่อมโยงเซเสด	27.16	276,266.78
สายส่งเชื่อมโยงโพนด้อย	81.62	830,071.54
สายส่งเชื่อมโยงท่าแขก	218.90	2,135,041.15
สายส่งเชื่อมโยงห้วยเฮาะ	138.20	1,202,340.00
สายส่งเชื่อมโยงสระบุรี 2	355.80	-
สายส่งเชื่อมโยงท่าตะโก	341.80	-
รวม	1715.028	6,153,541.79

ตารางที่ 6.27 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ปริมาณน้ำที่ระบาย(ลบ.ม)
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนจุฬาภรณ์	21.63	120,778.26
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนน้ำพุง	5.99	152,591.55
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนสิรินธร	35.99	2,513,954.82
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนปากมูล	-	-
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนอุบลรัตน์	25.20	3,890,476.80
รวม	88.810	6,677,801.44

ตารางที่ 6.28 ราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าปานกลาง

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ต้นทุนการผลิต(บาท)
โรงไฟฟ้าความร้อนร่วมน้ำพอง	349.944	3,761,615.97
สายส่งเชื่อมโยงหล่มสัก	117.600	-
สายส่งเชื่อมโยงเซเสด	6.316	141,305.41
สายส่งเชื่อมโยงโพนด้อย	58.974	1,319,484.90
สายส่งเชื่อมโยงท่าแขก	214.154	4,595,258.04
สายส่งเชื่อมโยงห้วยเสาะ	140.000	2,679,600.00
สายส่งเชื่อมโยงสระบุรี 2	125.500	-
สายส่งเชื่อมโยงท่าตะโก	184.400	-
รวม	1196.888	12,497,264.32

ตารางที่ 6.29 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าปานกลาง

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ปริมาณน้ำที่ระบาย(ลบ.ม)
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนจุฬาภรณ์	-	-
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนน้ำพุง	5.759	322,711.94
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนสิรินธร	35.400	5,439,520.37
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนปากมูล	0.000	-
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนอุบลรัตน์	25.000	8,491,120.00
รวม	66.159	14,253,352.31

ตารางที่ 6.30 ราคาซื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ต้นทุนการผลิต(บาท)
โรงไฟฟ้าความร้อนร่วมน้ำพอง	349.998	2,736,146.41
สายส่งเชื่อมโยงหล่มสัก	60.400	-
สายส่งเชื่อมโยงเซเสด	15.728	255,922.47
สายส่งเชื่อมโยงโพนดอง	28.104	457,304.82
สายส่งเชื่อมโยงท่าแขก	145.054	2,263,655.24
สายส่งเชื่อมโยงห้วยเฮาะ	140.000	1,948,800.00
สายส่งเชื่อมโยงสระบุรี 2	84.500	-
สายส่งเชื่อมโยงท่าตะโก	161.200	-
รวม	984.984	7,661,828.93

ตารางที่ 6.31 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ

โรงไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า(MW)	ปริมาณน้ำที่ระบาย(ลบ.ม)
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนจุฬาภรณ์	-	-
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนน้ำพุง	3.064	124,863.37
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนสิรินธร	18.320	2,047,245.95
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนปากมูล	-	-
โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนอุบลรัตน์	11.609	2,867,704.52
รวม	32.993	5,039,813.84

ตารางที่ 6.32 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตก่อนและหลังแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

เปรียบเทียบต้นทุน	โรงไฟฟ้าพลังความร้อน(บาท)	โรงไฟฟ้าพลังน้ำ(ลบ.ม)
ต้นทุนรวมก่อนแก้ปัญหา	26,821,255.74	30,660,491.22
ต้นทุนรวมหลังแก้ปัญหา	26,312,635.05	25,970,967.59
ต้นทุนลดลง	508,620.69	4,689,523.63
เปอร์เซ็นต์ที่ลดลง	1.90	15.30

ผลจากการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่ ทำให้ค่าต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้านลดลงมีค่าเท่ากับ 26,312,635.05บาท และปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้า

ตลอดทั้งวันลดลงมีค่าเท่ากับ 25,970,967.59 ลบ.ม. จะเห็นได้ว่าสามารถลดต้นทุนการใช้เชื้อเพลิง ในการผลิตกำลังไฟฟ้าลงได้ 1.90 เปอร์เซ็นต์ และลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าตลอดทั้งวัน ลงได้ 15.30 เปอร์เซ็นต์ และผลจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า พบว่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของ เครื่องกำเนิดอยู่ในขอบเขตพิกัดที่กำหนด

บทที่ 7

สรุป วิจารณ์และข้อเสนอแนะ

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่ง ในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลัง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการค้นหาแบบตาบอดเพื่อแก้ปัญหา เนื่องจากวิธีการค้นหาแบบตาบอดมีความง่ายต่อการนำประยุกต์ใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบอื่นๆ ตัวอย่างเช่น วิธีจินตติค อัลกอริทึม วิธีฮอปฟิลด์ นิวรอลเน็ตเวิร์ค วิธีชีวภูมูเลตเตด แอนนีลลิ่ง และวิธีการหาค่าแบบดั้งเดิม คือ วิธีการเท่กันของแลมบ์ดา จากกรณีศึกษาที่หนึ่ง และกรณีศึกษาที่สองพบว่าคำตอบที่ได้จากวิธีการต่างๆ ที่นำมาเปรียบเทียบกันมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันกับคำตอบที่ได้รับจากวิธีการค้นหาแบบตาบอด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอมีความสามารถในการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสม ได้ดังเช่นวิธีการค้นหาแบบอื่น แต่วิธีการค้นหาแบบตาบอดมีความง่ายกว่าในการดำเนินงาน เช่น ฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงสามารถนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้โดยตรง ไม่มีการปรับเปลี่ยนมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม เช่น วิธีการเท่กันของแลมบ์ดา ซึ่งวิธีการนี้ต้องอาศัยการหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีความเป็นเชิงเส้น ทำให้วิธีการนี้ค่อนข้างมีข้อจำกัดเมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไม่อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่รวมเอาผลการเปิด-ปิดของวาล์วไอน้ำในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น วิธีการค้นหาง่ายต่อการโปรแกรมไม่ต้องมีการเข้า-ถอดรหัสเมื่อเทียบกับวิธี GA ไม่มีฟังก์ชันทางสถิติหรือความน่าจะเป็นและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมกระบวนการค้นหาที่ยุ่งยากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี SA ไม่ต้องมีกระบวนการเรียนรู้ซึ่งอาจจะต้องใช้เวลาพอสมควรเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี HNN เป็นต้น เนื่องจากว่าปัญหาที่นำมาทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดเพียงสามเครื่องเท่านั้น ซึ่งถือว่าเป็นปัญหามิติขนาดเล็ก และคำตอบที่ได้ก็อาจจะถือว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมทั่วไปได้ ในกรณีศึกษาที่สาม ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะอยู่ในรูปแบบที่มีความไม่เชิงเส้นสูง และไม่สามารถหาค่าอนุพันธ์เพื่อให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้นได้ ดังนั้นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบใดก็ตาม ที่มีลักษณะการหาคำตอบด้วยการหาค่าอนุพันธ์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จะไม่สามารถนำมาแก้ปัญหาลักษณะนี้ได้ ในกรณีศึกษาที่สี่ จะทำการเปรียบเทียบผลคำตอบที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับ วิธีจินตติค อัลกอริทึม สองแบบ และผลของการดำเนินงานพบว่าวิธีการค้นหาแบบตาบอดยังคงให้คำตอบดีกว่า วิธีจินตติค อัลกอริทึม ทั้งสองแบบอย่างเห็นได้ชัด ในกรณีศึกษาที่ 4 เป็นการรวมเอาผลของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเข้าไว้ด้วย ระบบไฟฟ้าที่นำมาทดสอบเป็นระบบที่มีขนาดเล็กและขนาดกลาง ผลจากการดำเนินงานพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถให้คำตอบที่เหมาะสมได้ ซึ่งสังเกตได้จากผลของคำตอบ

ต้นทุนการผลิตที่มีค่าลดลงจากค่าเดิมก่อนการแก้ปัญหา จากผลการดำเนินงานทั้งสี่กรณีศึกษา สามารถสรุปข้อดีของวิธีการค้นหาแบบตามาได้ดังต่อไปนี้

- 1). วิธีการค้นหาแบบตามาสามารถหลุดออกจากคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะถิ่นได้ และดำเนินการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมทั่วไปต่อไปได้โดยไม่หยุดชะงัก ดังจะเห็นได้จากรูปภาพลักษณะการค้นหาคำตอบทั้ง 3 กรณีศึกษา ซึ่งมีคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะถิ่นอยู่หลายค่า
- 2). วิธีการค้นหาแบบตามามีความง่ายกว่าวิธี GA SA HNN มีความยืดหยุ่นกว่าวิธีกว่าวิธีแบบดั้งเดิมที่อาศัยวิธีการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น
- 4). วิธีการค้นหาแบบตามามีความยืดหยุ่นในกลวิธีต่างๆ เช่นการกำหนดลักษณะของตามูลิสต์ ขนาดของตามูลิสต์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยง่ายซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่ทำการศึกษา วิธีการสร้างคำตอบบริเวณใกล้เคียงที่สามารถสร้างได้ง่าย ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนให้เข้ากับปัญหาลักษณะต่างๆ ได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมลักษณะต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เนื่องจากวิธีการค้นหาแบบตามาเป็นการหาค่าที่เหมาะสมแบบสุ่ม ดังนั้นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งคล้ายกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมสุ่มแบบสุ่มต่างๆ ไป เช่น วิธีจีเนติก อัลกอริทึม และ วิธีชีวภูมูเลตเตด แอนนีลลิ่ง การกำหนดคำตอบเริ่มต้นที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้ต้องใช้เวลาในการประมวลผลมากขึ้นและอาจทำให้คำตอบที่ได้จากการค้นหามีค่าที่ด้อยลง การแกว่งของคำตอบเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณา ในกรณีที่ต้องการคำตอบที่มีความละเอียดสูงที่พิจารณาค่าแห่งของทศนิยมตำแหน่งสูงๆ พบว่าวิธีการค้นหาแบบตามาที่นำเสนอช่วยให้คำตอบไม่แน่นอน เนื่องจากว่าวิธีการเคลื่อนย้ายที่ใช้ในวิธานิพนธ์นี้เป็นการสุ่มค่าขึ้นมา วิธีการแก้ไขสามารถทำได้โดยการกำหนดให้ค่าช่วงก้าว(step size) มีค่าที่ละเอียดขึ้น ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้ดีพอสมควร

มีวิธีการหรือเทคนิคต่างๆ ที่สามารถนำมาพัฒนาวิธีการค้นหาแบบตามาที่นำเสนอในวิธานิพนธ์ฉบับนี้ได้ ตัวอย่างเช่น การรวมลักษณะเด่นในการดำเนินงานของกรรมวิธีต่างๆ เข้าด้วยกัน ตัวอย่างเช่น การรวมเอาวิธีการค้นหาแบบตามาเข้ากับวิธีจีเนติก อัลกอริทึม หรือ วิธีการค้นหาแบบตามาทำงานร่วมวิธีชีวภูมูเลตเตด แอนนีลลิ่ง เป็นต้น ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานที่เรียกว่าการดำเนินงานแบบไฮบริดจ์ (hybrid) และการเพิ่มประสิทธิภาพวิธีการค้นหาแบบตามา โดยกำหนดลักษณะการประมวลผลเป็นแบบขนาน (parallel) ซึ่งจะส่งผลให้เวลาในการประมวลผลลดน้อยลง แต่ปัญหาที่ตามมาคือจำเป็นต้องมีหน่วยประมวลผลเพิ่มขึ้น และหน่วยประมวลผลทั้งหมดจะต้องต่อผ่านระบบโครงข่าย (LAN) ดังนั้นอาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้น

วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถนำไปประยุกต์เข้ากับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมแบบอื่นในระบบไฟฟ้ากำลังได้ ยกตัวอย่างเช่น วิธีการทำออปติมัลเพาเวอร์ฟลิว วิธีการทำยูนิคคอมมิตเมนต์ วิธีการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ วิธีการระบุเอกลักษณ์ขององค์ประกอบต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] Gerald B. Sheble and Kristin Britting "Refine Genetic Algorithm Economic Dispatch Problem" *IEEE Trans. On Power system*, Vol. 10, NO.1, February, 1994.
- [2] Gerald B. Sheble and Kristin Britting "Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading" *IEEE Trans. On Power system*, Vol. 8, NO. 3, August, 1993.
- [3] A. Barkirtzis, V. Petridis and S. Kazalis "Genetic Algorithm Solution to Economic Dispatch Problem" *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 141, No. 4., July 1994.
- [4] K.P. Wong, K Doan. "A Recursive Economic Dispatch Algorithm for Assessing the Costs of Thermal Generator Schedules" *IEEE Trans. PWRS-7*, NO. 2, 1995
- [5] Wong, K.P, Wong, Y.W. "Combine Genetic Algorithm/Simulate Annealing Approach to Short-Term Generation Scheduling with Take or Pay Fuel contract" *IEEE Trans. On Power system*, Vol. 11, NO. 1, November, 1996
- [6] Po-Hung Chen and Hong-Chan Chang. "Large-Scale Economic Dispatch by Genetic Algorithm" *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, no. 4, Nov. 1995. pp. 1919-1925.
- [7] S. O. Orero and M. R. Irving. "Economic Dispatch of Generators with Prohibited Operating Zones : a Genetic Algorithm Approach." *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 143, no. 6, Nov. 1996. pp. 529-534.
- [8] Hong-Tzer Yang, Pai-Chuan Yang, and Ching-Lien Huang. "Evolutionary Programming based Economic Dispatch for Units with Non-smooth Fuel Cost Functions." *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, no. 1, Feb. 1996. pp. 112-118.
- [9] Y. H. Song and C. S. V. Chou. "Advanced Engineered-Conditioning Genetic Approach to Power Economic Dispatch." *IEE Proc. Gener. Trans. Distrib.*, vol. 144, no. 3, May. 1997. pp. 285-292.
- [10] David C. Walters and Gerald B. Sheble. "Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Value Point Loading." *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, no. 3, Aug. 1993. pp. 1325-1332.

- [11] K. P. Wong and Y. W. Wong. "Genetic and Genetic/Simulated-Annealing Approaches to Economic Dispatch." *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 141, no. 4, Jul. 1994. pp. 507-513.
- [12] F. Li, R. Morgan, D. Williams, and Y. H. Song. "Handling Constrained Power Dispatch with Genetic Algorithms." *IEE Conference of Genetic Algorithms in Engineering Systems*, no. 414, Sep. 1995, pp.181-187.
- [13] W. Ongsakul and J. Tippayachai. "Constrained Economic Dispatch by Micro Genetic Algorithm based on Migration and Merit Order Loading Solutions." *Proc. of Int. Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2000, pp. 510 –517.
- [14] W. Ongsakul and N. Ruangpayoongsak. "Constrained Dynamic Economic Dispatch by Simulated Annealing/Genetic Algorithms." *IEEE Power Engineering Society Int. Conf. on Power Industry Computer Applications*, 2001 pp. 207 –212.
- [15] K.P. Wang, C.C. Fung. "Simulate Annealing Base Economic Dispatch Algorithm" *IEE. Proc.C.*, Vol.140, No.6., p.507-513, November 1993.
- [16] J.H.Park, et al., "Economic load dispatch for piecewise quadratic cost function using Hopfield neural network", *IEEE Trans. On Power system*, Vol. 8, No. 3, 1993, pp 1030-1038
- [17] Ching-Tong Su and Gwo-jen Chiou "A Fast - Computation Hopfield Method to Economic Dispatch of Power System" *IEEE Trans. On Power system*, Vol. 12, NO. 4, November, 1997
- [18] K.Y. Lee, A.S. Yome, and J.H. Park, "Adaptive Hopfield networks for economic load dispatch," *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 13, pp.519-526, May 1998.
- [19] X. S. Han, H.B. Gooi, and Daniel S. Kirschen "Dynamic Economic Dispatch: Feasible and Optimal Solutions", *IEEE Trans. On Power system*, Vol. 16, NO. 1, February 2001
- [20] W. Ongsakul and J. Tippayachai, "Micro Genetic Algorithm based on Migration and Merit Order Loading Solutions to the Constrained Economic Dispatch Problems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 24, no. 3, Mar. 2002, pp. 223-231.
- [22] A. J Wood, B.F. Wollenberg, "Power Generation Operation and Control", John Wiley and Sons, New York, 1984

- [23] J. Arrillaga and C. P. Arnold. "Computer Analysis of Power Systems". Great Britain : John Wiley & Sons, Ltd. 1990.
- [24] John J. Grainger and William D. Stevenson, Jr. "Power System Analysis". McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [25] Arthur R. Bergen and Vijay Vittal. "Power System Analysis". 2nd Edition. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 2000.
- [26] Hadi Sadaat. "Power system analysis" .International edition. WCB/McGraw-Hill. 1999
- [27] F. Glover, "Tabu Search Part I" , *ORSA J. Comput.*, Vol.1 No.3, pp.190-206, 1989.
- [28] F. Glover, "Tabu Search Part II" , *ORSA J. Comput.*, Vol.2 No.1, pp.4-32, 1990.
- [29] F. Glover and M. Laguna "Tabu Search" In Handbook of Applied Optimization, P. M. Pardalos and M. G. C. Resende (Eds.), Oxford University Press, pp. 194-208 (2002)
- [30] J.A.Bland and G.P.Dawson, "Tabu Search and Design Optimization" *Computer - aided design*. Vol.23, No.3, pp.195-201, 1991.
- [31] Arne Thesen "Design and Evaluation of Tabu Search Algorithms for Multiprocessor Scheduling" *Journal of Hueristics*, 4:141-160, 1998.
- [32] M. Laguna, R. Martí and V. Campos "Intensification and Diversification with Elite Tabu Search Solutions for the Linear Ordering Problem" *Computers and Operations Research*, vol. 26, pp. 1217-1230 (1999)
- [33] F. Glover and M. Laguna "Tabu Search" Boston, MA: Kluwer, 1997 pp.2-151
- [34] Lester Ingber. "Simulated Annealing: Practice versus Theory." *Mathl. Comput. Modeling.*, vol. 18, no. 11, 1993. pp. 29-57.
- [35] R.A.Rutenbar. "Simulated Annealing Algorithms: an Overview." *IEEE Circuits and Devices*, vol. 5, no. 1, Jan. 1989, pp. 19-26.
- [36] David E. Goldberg. "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning". Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989.
- [37] David A Coley. "An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Enginrrs". World Scientific Co.Pte.Ltd, 1999.
- [38] ธวัช เกิดชื่น ธนชาติ นุ่มนนท์ และ กิติพงษ์ ดันมิตร "การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยวิธีเงินเนติก" , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 , 2540
- [39] ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว "การประยุกต์ใช้วิธีการเชิงปัญญาประดิษฐ์ในการหาคำตอบในงานวิศวกรรม" การประชุมวิชาการ "วิศวกรรม ม.อ. 2002" ครั้งที่ 1, 2545

ภาคผนวก ก. งานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1. สุวิทย์ คำสว่าง จงรักษ์ บุญเส็ง และ สราวุธ โพธิยา , “การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่” วิศวกรรมสาร ม.ข. ฉบับที่ 4 ปีที่ 29 ตุลาคม 2545
2. สุวิทย์ คำสว่าง จงรักษ์ บุญเส็ง “การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบหลายขบวนการ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 25
3. S.Khamsawang, C.Boonseng and S.Pothiya “Solving the Economic Dispatch Problem with Tabu Search Algorithm” 2002 IEEE International Conferences on Industrial Technology “Productivity Reincarnation through Robotics & Automation” , Bangkok ,Thailand
4. S.Khamsawang, C.Boonseng and S.Pothiya “Solving the Economic Dispatch Problem with Multiple Tabu Search Procedure” 2003 IEEE Power Engineering Conference, Singapore, (accepted)
5. สุวิทย์ คำสว่าง จงรักษ์ บุญเส็ง “การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26 (อยู่ระหว่างการจัดพิมพ์)
6. สาคร จันทรโทศรี สราวุธ โพธิยา และ สุวิทย์ คำสว่าง “การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่” วิศวกรรมสาร ม.ข. ฉบับที่ 4 ปีที่ 29 ตุลาคม 2545

ภาคผนวก ข

ข.1 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายไหลโดยประมาณที่ 1 เมื่อพิจารณาการจ่ายไหลตลอด 24 ชั่วโมง

ชั่วโมงที่	Demand	Lambda				Tabu Search				Lambda รวม	Tabu Search รวม
		P ₁	P ₂	P ₃	P _{total}	P ₁	P ₂	P ₃	P _{total}		
1	300	150.00	100.00	50.00	300	150.00	100.00	50.00	300	3387.07	3387.07
2	300	150.00	100.00	50.00	300	150.00	100.00	50.00	300	3387.07	3387.07
3	300	150.00	100.00	50.00	300	150.00	100.00	50.00	300	3387.07	3387.07
4	350	156.24	143.76	50.00	350	153.86	145.03	51.12	350	3803.69	3803.75
5	400	181.89	164.39	53.72	400	181.85	164.45	53.70	400	4226.16	4226.16
6	450	205.38	183.30	61.33	450	206.43	182.42	61.15	450	4652.39	4652.38
7	800	369.81	315.61	114.58	800	375.45	310.50	114.05	800	7738.64	7738.73
8	1000	463.78	391.21	145.01	1000	462.65	390.95	146.40	1000	9582.89	9582.90
9	1100	532.68	400.00	167.32	1100	532.68	400.00	167.32	1100	10529.64	10529.64
10	1150	570.44	400.00	179.56	1150	570.44	400.00	179.56	1150	11011.74	11011.74
11	1150	570.44	400.00	179.56	1150	570.45	400.00	179.55	1150	11011.74	11011.74
12	1200	600.00	400.00	200.00	1200	600.00	400.00	200.00	1200	11500.16	11500.16
13	1100	532.68	400.00	167.32	1100	532.67	400.00	167.33	1100	10529.64	10529.64
14	800	369.81	315.61	114.58	800	369.46	316.08	114.47	800	7738.64	7738.65
15	800	369.81	315.61	114.58	800	377.11	308.90	113.99	800	7738.64	7738.81

(ต่อ)

16	900	416.79	353.41	129.80	900	421.689	349.358	128.953	900	8653.43	8653.50
17	900	416.79	353.41	129.80	900	416.8	353.409	129.791	900	8653.43	8653.43
18	900	416.79	353.41	129.80	900	418.864	351.065	130.071	900	8653.43	8653.45
19	1100	532.68	400.00	167.32	1100	532.661	400	167.339	1100	10529.6	10529.64
20	1200	600.00	400.00	200.00	1200	600	400	200	1200	11500.2	11500.16
21	1100	532.68	400.00	167.32	1100	530.339	399.995	169.666	1100	10529.6	10529.67
22	1000	463.78	391.21	145.01	1000	466.212	390	143.788	1000	9582.89	9582.91
23	800	369.81	315.61	114.58	800	369.866	315.678	114.456	800	7738.64	7738.64
24	400	181.89	164.39	53.72	400	182.239	164.245	53.5156	400	4226.16	4226.16
รวม	19500	9304.16	7260.93	2934.91	19500	9321.71	7242.07	2936.22	19500	190293	190293.06

ข.2 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายไหลต่ออย่างประหยัดในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อพิจารณาการจ่ายไหลตลอด 24 ชั่วโมง

ชั่วโมงที่	Demand	Lambda						Tabu					
		P1	P2	P3	P total	P loss	P1	P2	P3	P total	P loss	Lambda	Tabu
1	300	150.00	101.91	50.00	301.91	1.91	150.00	101.87	50.02	301.89	1.89	3402.8	3402.6
2	310	150.00	112.11	50.00	312.11	2.11	150.00	112.06	50.03	312.08	2.08	3487.1	3486.9
3	330	161.27	121.13	50.00	332.40	2.40	160.17	122.20	50.01	332.39	2.38	3656.7	3656.5
4	350	173.48	129.22	50.00	352.71	2.71	172.59	128.61	51.47	352.67	2.67	3827.3	3827.1

(ต่อ)

5	400	199.46	146.38	57.68	403.52	3.52	199.17	146.12	58.18	403.47	3.47	4257.2	4256.8
6	450	225.32	163.42	65.70	454.44	4.44	225.24	162.88	66.26	454.37	4.37	4691.9	4691.3
7	800	408.85	282.75	122.40	814.01	14.01	407.30	282.47	123.85	813.62	13.62	7870.5	7866.9
8	1000	515.69	351.01	155.27	1021.96	21.96	512.05	350.69	158.46	1021.19	21.19	9796.4	9789.1
9	1100	569.65	385.15	171.83	1126.63	26.63	567.95	382.65	174.94	1125.53	25.53	10790.2	10780.3
10	1120	580.49	391.98	175.15	1147.62	27.62	576.32	390.76	179.44	1146.51	26.51	10991.4	10980.9
11	1140	591.34	398.81	178.48	1168.63	28.63	590.91	394.08	182.35	1167.34	27.34	11193.5	11182.4
12	1150	598.41	400.00	180.65	1179.06	29.06	593.07	400.00	184.83	1177.91	27.91	11294.9	11283.4
13	1100	569.65	385.15	171.83	1126.63	26.63	567.04	382.31	176.17	1125.52	25.52	10790.2	10780.3
14	800	408.85	282.75	122.40	814.01	14.01	406.38	282.21	125.03	813.61	13.61	7870.5	7866.9
15	850	435.43	299.81	130.59	865.82	15.82	440.00	293.70	131.50	865.19	15.19	8344.4	8340.2
16	900	462.09	316.88	138.79	917.75	17.75	459.09	317.23	140.90	917.22	17.22	8823.3	8818.1
17	930	478.13	327.11	143.72	948.97	18.97	470.48	331.20	146.81	948.49	18.49	9113.1	9107.4
18	1000	515.69	351.01	155.27	1021.96	21.96	511.82	350.83	158.55	1021.20	21.20	9796.4	9789.1
19	1100	569.65	385.15	171.83	1126.63	26.63	567.14	382.37	176.01	1125.53	25.53	10790.2	10780.3
20	1150	598.41	400.00	180.65	1179.06	29.06	593.23	400.00	184.67	1177.91	27.91	11294.9	11283.4
21	1140	591.34	398.81	178.48	1168.63	28.63	586.62	398.21	182.65	1167.48	27.48	11193.5	11182.3
22	1100	569.65	385.15	171.83	1126.63	26.63	565.81	385.55	174.28	1125.63	25.63	10790.2	10780.3

(ต่อ)

23	800	450.00	252.10	110.85	812.95	12.94	405.07	284.56	124.04	813.67	13.67	7874.0	7866.9
24	400	199.46	146.38	57.68	403.52	3.52	200.00	144.59	58.86	403.45	3.45	4257.2	4256.8
รวม	19720	10172.28	6914.20	3041.06	20127.54	407.54	10077.45	6927.12	3109.30	20113.87	393.87	196198.0	196056.4

ข.3 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายไฟตลอดยี่สิบสองชั่วโมงที่ 3 เมื่อไม่พิจารณาค่าการเปิด-ปิดของวาล์วไอน้ำ ทำการจ่ายไฟตลอด 24 ชั่วโมง

ชั่วโมงที่	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	Total Power (MW)	Total Cost	ค่า Lambda
1	27	14	14	60	60	60	60	60	60	40	40	55	55	605	8072.58	8.1154
2	50	25	25	60	60	60	60	60	60	40	40	55	55	650	8438.05	8.128
3	70	35	35	62	62	62	62	62	62	40	40	55	55	700	8844.74	8.1392
4	110	55	55	65	65	65	65	65	65	40	40	55	55	800	9659.78	8.1615
5	189	95	95	72	72	72	72	72	72	40	40	55	55	1000	11296.53	8.2059
6	388	194	194	89	89	89	89	89	89	40	40	55	55	1500	15427.32	8.317165
7	680	262	262	101	101	101	101	101	101	40	40	55	55	2000	19617.77	8.393795
8	680	360	360	135	135	135	135	135	135	40	40	55	55	2400	23008.59	8.6148
9	680	360	360	152	152	152	152	152	152	40	40	55	55	2500	23875.47	8.7228
10	680	360	360	143	143	143	143	143	143	40	40	55	55	2450	23440.68	8.6688
11	680	360	360	160	160	160	160	160	160	40	40	55	55	2550	24312.96	8.7768
12	680	360	360	197	197	197	197	197	197	40	40	55	55	2772	26288.02	9.01656

(ต่อ)

13	680	360	360	177	177	177	177	177	177	177	40	40	40	55	55	2650	25196.04	8.8848
14	680	360	360	152	152	152	152	152	152	152	40	40	40	55	55	2500	23875.47	8.7228
15	680	360	360	135	135	135	135	135	135	135	40	40	40	55	55	2400	23008.59	8.6148
16	680	360	360	143	143	143	143	143	143	143	40	40	40	55	55	2450	23440.68	8.6688
17	680	360	360	160	160	160	160	160	160	160	40	40	40	55	55	2550	24312.96	8.7768
18	680	360	360	168	168	168	168	168	168	168	40	40	40	55	55	2600	24753.15	8.8308
19	680	360	360	197	197	197	197	197	197	197	40	40	40	55	55	2770	26269.99	9.0144
20	680	360	360	197	197	197	197	197	197	197	40	40	40	55	55	2772	26288.02	9.01656
21	680	360	360	177	177	177	177	177	177	177	40	40	40	55	55	2650	25196.04	8.8848
22	680	360	360	85	85	85	85	85	85	85	40	40	40	55	55	2100	20472.75	8.2908
23	388	194	194	89	89	89	89	89	89	89	40	40	40	55	55	1500	15427.32	8.317165
24	189	95	95	72	72	72	72	72	72	72	40	40	40	55	55	1000	11296.53	8.205988
รวม																47869	471,820.03	8.562051

ข.4 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู ในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อไม่พิจารณาค่าการเปิด-ปิดของวาล์วได้นำ ทำการจ่ายโหลด

24 ชั่วโมง

ชั่วโมงที่	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	Total Power	Total Cost
1	25	15	15	60	60	60	60	60	60	40	40	55	55	605	8072.79

(ต่อ)

20	680	360	360	186	200	190	186	180	186	61	61	61	2772	26283.07
21	680	360	360	150	185	180	180	160	180	53	55	55	2650	25195.66
22	625	350	350	90	110	110	85	80	110	40	40	55	2100	20458.07
23	400	200	200	80	93	82	88	80	88	40	40	55	1500	15427.83
24	195	100	100	60	75	75	73	60	72	40	40	55	1000	11296.67
รวม													47869	471,790.240

ข.5 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธี ๑ ในกรณีศึกษาที่ ๓ เมื่อประมาณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปแบบโพลีโนเมียลกำลังสอง ทำการจ่ายโหลด 24 ชั่วโมง

ชั่วโมงที่	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	Total Power	Total Cost	Lambda
1	0	0	0	60	60	60	60	60	60	68	68	55	55	605	9384.41	9.422
2	0	0	0	60	60	60	60	60	60	90	90	55	55	650	9786.92	8.467
3	0	80	6	60	60	60	60	60	60	101	101	55	55	757	10192.10	8.022
4	24	49	34	64	64	64	64	64	64	99	99	55	55	800	10997.52	8.075
5	119	82	70	71	71	71	71	71	71	98	98	55	55	1000	12619.35	8.143
6	357	164	160	87	87	87	87	87	87	94	94	55	55	1500	16733.36	8.313
7	594	247	249	103	103	103	103	103	103	90	90	55	55	2000	20932.27	8.483
8	680	345	356	123	123	123	123	123	123	85	85	55	55	2400	24359.90	8.686

(ต่อ)

9	680	360	360	360	138	138	138	138	138	138	138	138	138	81	81	55	55	2500	25234.93	8,838
10	680	360	360	360	129	129	129	129	129	129	129	129	129	83	83	55	55	2450	24795.36	8,745
11	680	360	360	360	147	147	147	147	147	147	147	147	147	79	79	55	55	2550	25679.17	8,932
12	680	360	360	360	187	187	187	187	187	187	187	187	187	69	69	55	55	2772	27708.15	9,347
13	680	360	360	360	165	165	165	165	165	165	165	165	165	75	75	55	55	2650	26581.71	9,119
14	680	360	360	360	138	138	138	138	138	138	138	138	138	81	81	55	55	2500	25234.93	8,838
15	680	345	356	360	123	123	123	123	123	123	123	123	123	85	85	55	55	2400	24359.90	8,686
16	680	360	360	360	129	129	129	129	129	129	129	129	129	83	83	55	55	2450	24795.36	8,745
17	680	360	360	360	147	147	147	147	147	147	147	147	147	79	79	55	55	2550	25679.17	8,932
18	680	360	360	360	156	156	156	156	156	156	156	156	156	77	77	55	55	2600	26128.10	9,025
19	680	360	360	360	187	187	187	187	187	187	187	187	187	69	69	55	55	2770	27689.46	9,344
20	680	360	360	360	187	187	187	187	187	187	187	187	187	69	69	55	55	2772	27708.15	9,347
21	680	360	360	360	165	165	165	165	165	165	165	165	165	75	75	55	55	2650	26581.71	9,119
22	642	263	267	267	107	107	107	107	107	107	107	107	107	89	89	55	55	2100	21782.24	8,517
23	357	164	160	160	87	87	87	87	87	87	87	87	87	94	94	55	55	1500	16733.36	8,313
24	119	82	70	70	71	71	71	71	71	71	71	71	71	98	98	55	55	1000	12619.35	8,143
รวม																		47869	504,317	8,733

๗.6 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการกำหนดแบบตามู ในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อประมาณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปแบบโพลีโนเมียล
กำลังสอง ทำการจ่ายโหลด 24 ชั่วโมง

ชั่วโมงที่	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	Total Power	Total Cost
1	0.0	35.0	20.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	40.0	40.0	55.0	55.0	605.0	9275.74
2	5.0	43.0	25.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	62.0	40.0	40.0	55.0	55.0	650.0	9637.85
3	25.9	50.0	35.0	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	65.8	40.0	40.0	55.0	55.0	700.0	10041.17
4	110.0	59.1	45.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	65.9	40.0	40.0	55.0	55.0	800.0	10851.35
5	175.0	100.0	90.0	71.8	75.9	71.8	76.8	76.8	71.8	40.0	40.0	55.0	55.0	1000.0	12480.68
6	375.1	200.0	200.0	90.0	90.0	90.0	88.3	88.3	88.3	40.0	40.0	55.0	55.0	1500.0	16613.89
7	590.3	300.0	300.0	105.6	101.5	105.3	105.3	101.1	101.0	40.0	40.0	55.0	55.0	2000.0	20833.48
8	680.0	360.0	360.0	135.0	135.0	137.7	132.8	132.7	136.8	40.0	40.0	55.0	55.0	2400.0	24279.77
9	680.0	360.0	360.0	154.8	154.7	151.6	154.9	151.5	142.2	40.0	40.0	55.0	55.2	2500.0	25168.82
10	680.0	360.0	360.0	150.0	142.6	141.8	141.7	141.7	142.1	40.0	40.0	55.0	55.0	2450.0	24722.36
11	680.0	360.0	360.0	159.4	159.8	160.2	160.0	154.8	160.7	40.0	40.0	58.6	56.5	2550.0	25619.57
12	680.0	360.0	360.0	190.0	193.6	192.6	193.1	200.0	189.5	40.0	40.0	55.0	78.2	2772.0	27606.63
13	680.0	360.0	360.0	178.5	178.4	160.0	170.0	180.0	178.3	40.0	40.0	55.0	69.8	2650.0	26532.73
14	680.0	360.0	360.0	159.3	160.1	140.0	140.0	163.8	146.6	40.0	40.0	55.0	55.1	2500.0	25168.73
15	680.0	360.0	360.0	135.0	130.0	135.0	135.0	140.0	135.0	40.0	40.0	55.0	55.0	2400.0	24280.10

(ต่อ)

16	680.0	360.0	360.0	145.0	145.0	140.0	140.0	144.0	146.0	40.0	40.0	55.0	55.0	2450.0	24722.92
17	680.0	360.0	360.0	150.0	150.0	150.0	150.0	168.7	182.6	40.0	40.0	55.0	63.7	2550.0	25619.58
18	680.0	360.0	360.0	160.0	160.0	160.0	160.0	177.3	178.9	40.0	40.0	55.0	68.9	2600.0	26074.50
19	680.0	360.0	360.0	200.0	180.0	180.0	180.0	199.9	199.9	40.0	40.0	55.0	95.3	2770.0	27588.33
20	680.0	360.0	360.0	198.7	198.1	180.0	180.0	198.0	200.0	40.0	40.0	55.0	82.2	2772.0	27606.66
21	680.0	360.0	360.0	150.0	183.1	170.0	170.0	183.1	186.2	40.0	40.0	55.0	72.7	2650.0	26532.89
22	625.0	350.0	350.0	95.0	95.0	95.0	100.0	100.0	100.0	40.0	40.0	55.0	55.0	2100.0	21683.92
23	425.0	190.0	200.0	80.0	80.0	80.0	80.0	84.7	90.3	40.0	40.0	55.0	55.0	1500.0	16614.13
24	205.0	110.0	105.0	60.0	60.0	60.0	60.0	75.0	75.0	40.0	40.0	55.0	55.0	1000.0	12480.67
รวม														47869	502,036.483

ข.7 ผลการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม ในกรณีศึกษาที่ 3 ทำการจ่ายโหลด 24 ชั่วโมง

ชั่วโมงที่	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	Total Power	Total Cost
1	0	0	0	60	60	60	60	60	60	40	40	55	110	605	8124.54
2	0	15	20	60	60	60	60	60	60	40	40	55	120	650	8462.28
3	20	45	20	60	60	60	60	60	60	40	40	55	120	700	8853.36
4	90	75	48	60	60	60	60	60	60	40	40	55	92	800	9747.61

(ต่อ)

5	140	95	90	70	70	70	70	70	70	70	70	70	40	40	40	55	120	1000	11337.62
6	359	229	225	110	60	110	60	60	60	60	60	60	40	40	40	55	92	1500	15507.63
7	539	300	299	110	110	110	110	110	110	110	110	110	40	40	40	55	68	2000	19714.48
8	680	360	360	160	160	110	110	110	110	110	110	110	40	40	40	55	106	2400	23070.38
9	680	360	360	160	160	110	124	160	160	160	160	160	40	40	40	55	92	2500	24038.06
10	680	360	360	160	140	140	140	140	140	140	140	140	40	40	40	55	55	2450	23501.16
11	628	360	360	160	160	160	160	160	160	160	160	160	40	40	40	55	108	2550	24489.88
12	680	360	360	200	200	200	200	200	200	200	182	40	40	40	55	55	2772	26729.15	
13	680	360	360	160	160	160	170	170	170	170	170	40	45	40	55	120	2650	25457.18	
14	628	360	360	160	160	160	110	160	160	160	160	40	40	40	55	108	2500	24038.03	
15	680	360	360	140	130	135	135	135	135	135	135	40	40	40	55	55	2400	23070.79	
16	680	360	360	155	145	140	140	140	140	140	140	40	40	40	55	55	2450	23501.55	
17	628	360	360	160	160	160	160	160	160	160	160	40	40	40	55	108	2550	24489.91	
18	680	360	360	160	160	160	160	160	160	160	160	40	40	40	55	107	2600	24866.58	
19	680	360	360	200	180	180	180	180	180	180	180	40	55	40	55	120	2770	26699.10	
20	680	360	360	200	200	177	180	180	180	180	180	40	40	40	55	120	2772	26729.06	
21	675	360	360	160	160	160	160	160	160	160	160	40	40	40	55	120	2650	25456.60	
22	628	360	360	110	110	110	60	60	60	60	60	40	40	40	55	107	2100	20531.56	

(ต่อ)

23	375	190	200	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	40	40	40	55	120	1500	15507.72
24	195	100	90	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	40	40	40	55	120	1000	11338.60
รวม																				
																			47869	475,262.83

ประวัติผู้เขียน

นายสุวิทย์ คำสว่าง เกิดเมื่อ วันที่ 5 เมษายน พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดหนองคาย สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรจากวิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2537 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2539 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงาน ณ. สถาบันแห่งนี้ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2539 กระทั่งถึงปัจจุบัน ในระหว่างทำงานได้ลาศึกษาต่อ ณ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเมื่อปี พ.ศ. 2542