



วิทยานิพนธ์

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบโดยใช้วิธีทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคร่วมกับวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ

**ECONOMIC DISPATCH WITH NON-SMOOTH COST
FUNCTION USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION
WITH SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING**

นางสาววิลาสินี ตีฆาการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบโดยใช้วิธีที่เหมาะสมแบบ
กลุ่มอนุภาคร่วมกับวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ

Economic Dispatch with Non-smooth Cost Function using Particle Swarm Optimization
with Sequential Quadratic Programming

นามผู้วิจัย นางสาววิลาสินี ศึกษาการ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปานจิต ดำรงกุลกำจร, Ph. D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงศ์, Ph. D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 3 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบโดยใช้วิธีทำให้เหมาะสม
แบบกลุ่มอนุภาคร่วมกับวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ

Economic Dispatch with Non-smooth Cost Function using Particle Swarm Optimization
with Sequential Quadratic Programming

โดย

นางสาววิลาสินี ศึกษาการ

เสนอ

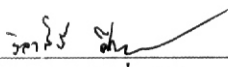
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

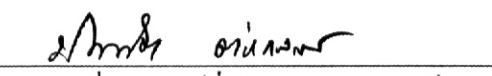
พ.ศ. 2551

วิลาสินี ศีกษาการ 2551: การจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบโดย
ใช้วิธีทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคร่วมกับวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ
ปริญญวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปานจิต คำรงกุลกำจร, Ph.D. 69 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการ
จ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบโดยใช้วิธีไฮบริดซึ่งเป็นการรวมกันของ
วิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคกับวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ โดยที่วิธีการทำให้
เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคเป็นวิธีหาค่าที่เหมาะสมหลักในการหาบริเวณที่เหมาะสมที่สุดโดยรวม
และใช้วิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับในการปรับค่าตอบที่ได้จากวิธีการทำให้เหมาะสมแบบ
กลุ่มอนุภาคให้เป็นที่น่าพอใจเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งวิธีไฮบริด
ดังกล่าวจะถูกนำไปทดสอบกับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา
คือ กรณี 1 สำหรับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบ กรณี 2 สำหรับ
ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบที่มีผลจากจุดคว่ำ กรณี 3
สำหรับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบที่มีผลจากการ
เปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน และกรณี 4 สำหรับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มี
ฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบที่มีผลทั้งจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำ
ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอจะนำไปเปรียบเทียบกับวิธีต่างๆ ที่เคยมีการศึกษามาในอดีต เพื่อ
แสดงประสิทธิภาพของวิธีดังกล่าว

จากผลการทดสอบที่ได้จากกรณีศึกษาทั้ง 4 กรณี พบว่าวิธีไฮบริดที่นำเสนอมี
ประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยไม่คำนึงถึงรูปร่างของฟังก์ชันราคา
ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และมีคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีดังกล่าวดีกว่าการแก้ปัญหาโดย
ใช้วิธีต่างๆ ที่เคยมีการศึกษามาในอดีต


ลายมือชื่อนิสิต


ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

๒๘ / ๗๖ / ๕๗

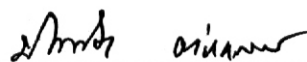
Wilasinee Sugsakarn 2008: Economic Dispatch with Non-smooth Cost Function using Particle Swarm Optimization with Sequential Quadratic Programming.
Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering,
Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor:
Assistant Professor Parnjit Damrongkulkamjorn, Ph.D. 69 pages.

The objective of this thesis is to present an effective method to solve economic dispatch problem (EDP) with non-smooth cost function using a hybrid method that integrates particle swarm optimization (PSO) with sequential quadratic programming (SQP). PSO is the main optimizer to find the optimal global region with SQP is used as a fine tuning to determine the optimal solution at the final stage. The proposed hybrid PSO-SQP method is applied to four different cases of economic dispatch problems. The first case study is a typical EDP with smooth cost function. The second case study is an EDP with non-smooth cost function due to valve-point effects. The third case study is an EDP with non-smooth cost function due to fuel switching effects. The last case study is an EDP with non-smooth cost function due to both valve-point and fuel switching effects. The results of case studies obtained from the proposed PSO-SQP are compared with other methods that have been done in former studies to verify its efficiency.

The comparisons of all four case studies show that the proposed hybrid method is more efficient than the other methods in former studies. The hybrid method can solve EDP with any non-smooth cost functions by using less computational time and yielding higher solution quality.



Student's signature



Thesis Advisor's signature



กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ดร. ปานจิต คำรงกุลกำจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนติดตามความก้าวหน้าและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ดร. ชีรสิทธิ์ เกษตรเกษม และ ผศ. ดร. สมพร สิริสำราญนุกุล ที่ได้สละเวลามาเป็นกรรมการสอบและให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและประสาทความรู้อันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง

และสุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา เป็นอย่างสูง ที่คอยอบรมสั่งสอน ดูแลเอาใจใส่ ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

วิลาสินี ศึกษาการ

เมษายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	10
อุปกรณ์	10
วิธีการ	10
ผลและวิจารณ์	25
ผล	25
วิจารณ์	52
สรุปและข้อเสนอแนะ	55
สรุป	55
ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	58
ภาคผนวก	61
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	69

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ	26
2	ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ	27
3	ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ	29
4	การเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธี NM ในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ	30
5	ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบ เนื่องจากผลของจุดคว่ำ	33
6	ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบ เนื่องจากผลของจุดคว่ำ	35
7	ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบ เนื่องจากผลของจุดคว่ำ	37
8	การเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ ที่เคยมีการศึกษามาในอดีตในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดคว่ำ	40
9	สรุปผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดคว่ำ	41

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
10	การเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ ที่เคยมีการ ศึกษาในอดีตในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดคว่ำ	41
11	ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน	43
12	สรุปผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน	46
13	การเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ ที่เคยมีการ ศึกษาในอดีตในกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน	47
14	ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 4 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำ	49
15	การเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ ที่เคยมีการ ศึกษาในอดีตในกรณี 4 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำ	51

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ	61
2	ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ	61
3	ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ	62
4	ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีผลจากจุดคว่ำ	63
5	ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีผลจากจุดคว่ำ	64
6	ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีผลจากจุดคว่ำ	64
7	ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน	66
8	ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 4 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีทั้งผลจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและผลจากจุดคว่ำ	68

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ฟังก์ชันราคาตัดกันหลายเส้นสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง	5
2	การเข้ารหัส	6
3	แผนผังของวิธีการลดช่องว่างในการค้นหาแบบพลวัต	8
4	ฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงปกติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	12
5	ฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีวาล์วที่ใช้ในการปล่อยไอน้ำ 3 ตัว	13
6	ฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการใช้เชื้อเพลิงหลายชนิด	14
7	การปรับปรุงความเร็วของอนุภาค	15
8	ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นด้วยการเปลี่ยนแปลงวิธีที่ช่วยในการค้นหา	22
9	ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงแต่ละอนุภาคด้วยการเปลี่ยนแปลงวิธีที่ช่วยในการค้นหา	23
10	ตัวอย่างฟังก์ชันราคาที่ราบเรียบ	26
11	คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธี Hybrid PSO-SQP ที่มีสถานะเริ่มต้นแตกต่างกันในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ	27
12	คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธี Hybrid PSO-SQP ที่มีสถานะเริ่มต้นแตกต่างกันในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ	28
13	คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธี Hybrid PSO-SQP ที่มีสถานะเริ่มต้นแตกต่างกันในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ	30
14	ตัวอย่างฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดวาล์ว	33
15	คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธี Hybrid PSO-SQP ที่มีจำนวนของอนุภาคแตกต่างกัน ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดวาล์ว	34

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	การกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง ของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ	35
17	คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ	36
18	การกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง ของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ	37
19	คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ	39
20	การกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง ของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ	40
21	ตัวอย่างของฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน	43
22	คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน	45
23	การกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง ของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ตัวอย่างของฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำ	49
25	คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 4 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำ	50
26	การกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง ของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำ	51

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบโดยใช้วิธีทำให้เหมาะสมแบบ กลุ่มอนุภาคร่วมกับวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ

Economic Dispatch with Non-smooth Cost Function using Particle Swarm Optimization with Sequential Quadratic Programming

คำนำ

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (economic dispatch problem) เป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาที่ต้องการหาค่าใช้จ่ายในการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดโดยกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ได้ต้องเพียงพอต่อความต้องการของระบบ โดยปกติฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้าที่ได้มาจากการประมาณ ซึ่งอยู่ในรูปของสมการกำลังสองและในการแก้ปัญหาดังกล่าวมักจะใช้วิธีที่อาศัยพื้นฐานของเกรเดียนท์ (gradient-based method) อย่างเช่นวิธีนิวตัน (Newton Method), วิธีการวนซ้ำด้วยแลมบ์ดา (lambda-iteration method) ฯลฯ ซึ่งวิธีดังกล่าวเหล่านั้นต้องการฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่มีลักษณะราบเรียบหรือมีลักษณะเชิงเส้นแบบเป็นช่วง (piecewise linear) เพื่อใช้ในการค้นหาคำตอบโดยรวมที่เหมาะสมที่สุด แต่โดยแท้จริงแล้ว คุณลักษณะอินพุท-เอาต์พุทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากผลของจุดวาล์ว (valve-point effects) ซึ่งจะทำให้เกิดจุดต่ำสุดเฉพาะที่ขึ้นหลายจุดบนฟังก์ชันราคา ทำให้ฟังก์ชันราคามีลักษณะไม่ราบเรียบและมีความยากมากยิ่งขึ้นในการค้นหาคำตอบโดยรวมที่เหมาะสมที่สุด และยิ่งมากไปกว่านั้นเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานโดยใช้เชื้อเพลิงที่แตกต่างกันได้หลายชนิด (multiple fuels) เช่น ถ่านหิน, แก๊สธรรมชาติ หรือน้ำมัน ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนใช้เชื้อเพลิงจากชนิดหนึ่งไปเป็นอีกชนิดหนึ่งจะทำให้ฟังก์ชันราคามีลักษณะเป็นฟังก์ชันกำลังสองแบบเป็นช่วง (piecewise quadratic) และเนื่องจากผลของจุดวาล์วและผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน (fuel switching effects) ทำให้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดมีความซับซ้อนและยุ่งยากมากยิ่งขึ้น โดยที่วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวไว้ข้างต้นไม่สามารถแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบได้

เมื่อไม่นานมานี้มีการคิดค้นและพัฒนาวิธีการต่างๆ มาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบที่มีผลเนื่องจากจุดวาล์ว ได้แก่ วิธีเจเนติก

(Genetic Algorithm, GA) (Walters and Sheble, 1993), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการแบบดั้งเดิม (Classical Evolutionary Programming, CEP) (Sinha *et al.*, 2003), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการแบบเร็ว (Fast Evolutionary Programming, FEP) (Sinha *et al.*, 2003), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการแบบเร็วโดยใช้ค่าน้ำหนักเฉลี่ยของการกลายพันธุ์แบบเกาส์เซียนและคอคชชี (Fast Evolutionary Programming using the weighted mean of Gaussian and Cauchy mutations, MFEP) (Sinha *et al.*, 2003), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการแบบเร็วที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น (Improved Fast Evolutionary Programming, IFEP) (Sinha *et al.*, 2003), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น (Improved Evolutionary Programming, IEP) (Park *et al.*, 1998), วิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคที่ถูกแก้ไข (Modified Particle Swarm Optimization, MPSO) (Park *et al.*, 2005), วิธีที่นำเอาวิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคมารวมเข้าด้วยกันกับวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ (PSO-SQP) (Victoire and Jeyakumar, 2004) เป็นต้น

ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบที่มีผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน ได้มีผู้เสนอวิธีในการแก้ปัญหาข้างต้น ดังเช่น วิธีการจัดระบบตามลำดับชั้น (Hierarchical Method, HM) (Lin and Viviani, 1984), วิธีโครงข่ายประสาทฮอปฟิลด์ (Hopfield Neural Network, HNN) (Park *et al.*, 1993), วิธีโครงข่ายประสาทฮอปฟิลด์ซึ่งปรับตัวได้ (Adaptive Hopfield Neural Network, AHNN) (Lee *et al.*, 1993), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น (Improved Evolutionary Programming, IEP) (Park *et al.*, 1998), วิธีวิวัฒนาการซึ่งมีความแตกต่างกัน (Differential Evolution, DE) (Perez-Guerrero and Cedeno-Maldonado, 2005), วิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคที่ถูกแก้ไข (Modified Particle Swarm Optimization, MPSO) (Park *et al.*, 2005) เป็นต้น และเมื่อเร็วๆ นี้ได้มีงานวิจัยที่นำเอาทั้งผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและผลจากจุดคว่ำมารวมเข้ากับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอวิธีเงินเนติกแบบธรรมดาที่มีการปรับตัวคูณ (Conventional Genetic Algorithm with Multiplier Updating, CGA_MU) (Chiang, 2005) และวิธีเงินเนติกที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยการปรับตัวคูณ (Improved Genetic Algorithm with Multiplier Updating, IGA_MU) (Chiang, 2005) ในการแก้ปัญหาดังกล่าว

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีไฮบริดในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบ ซึ่งวิธีไฮบริดนี้เป็นวิธีที่เกิดจากการรวมกันของวิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ (SQP) (Hybrid PSO-SQP) โดยที่ใช้วิธี PSO

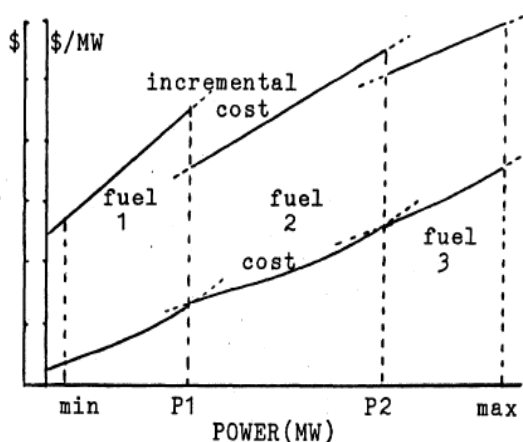
เป็นวิธีหาค่าที่เหมาะสมหลักในการหาบริเวณที่เหมาะสมที่สุดโดยรวม (optimal global region) และใช้วิธี SQP ในการปรับค่าตอบที่ได้จากวิธี PSO ให้เป็นที่น่าพอใจเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งในส่วนของวิธี PSO ในงานวิจัยนี้จะรวมเอาการเปลี่ยนแปลงวิธีที่ช่วยในการค้นหา (modified heuristic search method) มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาของวิธี PSO และนำวิธี Hybrid PSO-SQP มาทำการทดสอบเพื่อให้ทราบประสิทธิภาพของวิธีดังกล่าว โดยทำการแบ่งกรณีศึกษาเป็น 4 กรณี ได้แก่ **กรณี 1** สำหรับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาทีราบเรียบ (smooth cost function) ของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง, 10 เครื่อง และ 40 เครื่อง **กรณี 2** สำหรับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบ (non-smooth cost function) ที่มีผลของจุดคว่ำของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง, 10 เครื่อง และ 40 เครื่อง **กรณี 3** สำหรับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบที่มีผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง **กรณี 4** สำหรับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบที่มีทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจุดคว่ำของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบของทั้ง 4 กรณีศึกษาจะนำมาเปรียบเทียบกับวิธีต่างๆ ที่เคยมีการศึกษามาในอดีต

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาขั้นตอนการทำงานของวิธี Hybrid PSO-SQP
2. ศึกษาการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบ ซึ่งเกิดจากผลของจุดควาแล้วและการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน โดยใช้วิธี Hybrid PSO-SQP ซึ่งเป็นวิธีที่เกิดจากการรวมกันของวิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) กับวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ (Sequential Quadratic Programming, SQP)
3. ทำการวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวิธีดังกล่าวต่อการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบ

การตรวจเอกสาร

Lin and Viviani (1984) ได้นำเสนอวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคากำลังสองแบบเป็นช่วง (piecewise quadratic cost function) ที่เรียกว่า Hierarchical Method (HM) ซึ่งพิจารณาโดยกระจายอำนาจ (decentralize) การคำนวณของฟังก์ชันราคาอย่างเหมาะสม ข้อดีของวิธี HM นี้คือมีความสามารถที่จะหาค่าที่เหมาะสมเหนือความหลากหลายที่มากยิ่งขึ้นของสถานะการทำงาน โดยปกติแล้วจะสมมติให้มีฟังก์ชันราคาหนึ่งเส้นสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง แต่ในบทความนี้จะสมมติให้มีฟังก์ชันราคาตัดกันหลายเส้น (multiple intersecting cost function) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องดังแสดงไว้ในภาพที่ 1 ซึ่งวิธีการนี้มีการประยุกต์ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่สามารถใช้เชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซธรรมชาติและน้ำมันได้



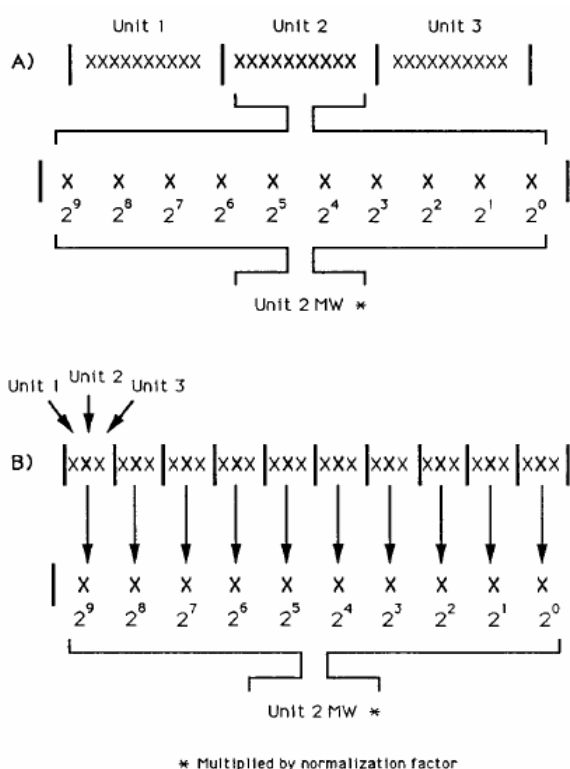
ภาพที่ 1 ฟังก์ชันราคาตัดกันหลายเส้นสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง

ที่มา: Lin and Viviani (1984)

Park *et al.* (1993) ได้นำเสนอวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคากำลังสองแบบเป็นช่วง ที่เรียกว่า Hopfield Neural Network (HNN) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวนมากได้อย่างง่ายดาย

Lee *et al.* (1998) ได้นำเสนอ 2 วิธีที่แตกต่างกันคือ วิธีการปรับเปลี่ยนความชัน (slope adjustment method) และวิธีการปรับเปลี่ยนการไบแอส (bias adjustment method) เพื่อที่จะปรับปรุงการลู่เข้าหาคำตอบของวิธี HNN โดยวิธีนั้นเรียกว่า Adaptive Hopfield Neural Network (AHNN) ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคากำลังสองแบบเป็นช่วง

Walters and Sheble (1993) ได้นำวิธี Genetic Algorithm (GA) มาใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีผลจากจุดคว่ำ (valve-point effects) ซึ่งในการทดสอบได้ใช้การเข้ารหัส (encoding) 2 แบบ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2 และตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบวิธี GA เป็นดังนี้คือ จำนวนรอบการคำนวณเป็น 100, ขนาดของประชากร (population size) เป็น 100, ความยาวของโครโมโซมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องเป็น 11 บิต, โอกาสที่จะเกิดการกระโดดข้าม (crossover) คิดเป็นร้อยละ 0.95 และโอกาสที่จะเกิดการกลายพันธุ์ (mutation) คิดเป็นร้อยละ 0.01



ภาพที่ 2 การเข้ารหัส

ที่มา: Walters and Sheble (1993)

Attaviriyapap *et al.* (2002) ได้นำเสนอวิธีไฮบริดวิธีใหม่ในการแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัดแบบพลวัต (dynamic economic dispatch) ที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดคว่ำ โดยได้นำเอาวิธี Evolutionary Programming (EP) แบบง่ายมาใช้ในการค้นหาในระดับเบื้องต้น ซึ่งจะได้ทิศทางที่ดีที่นำไปสู่บริเวณที่เหมาะสมที่สุดโดยรวม (optimal global region) และใช้วิธี Sequential Quadratic Programming (SQP) ในการค้นหาเฉพาะที่ (local search) ซึ่งใช้ในการปรับค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดที่คำนวณได้ให้ดีขึ้นในขั้นตอนสุดท้าย

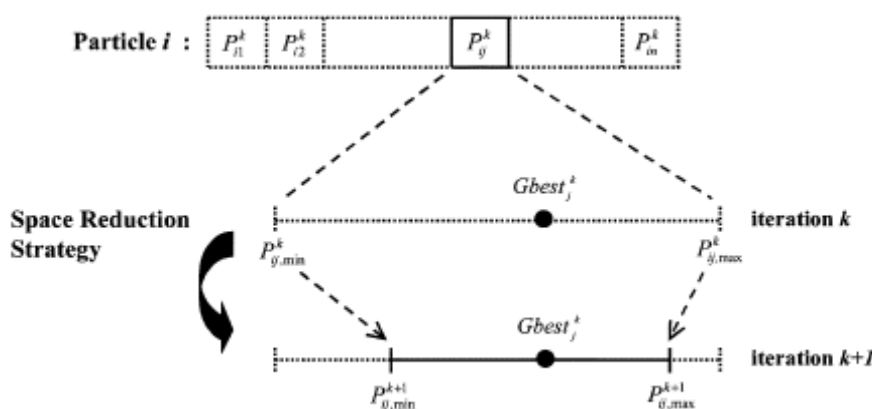
Sinha *et al.* (2003) ได้นำวิธี Evolutionary Programming (EP) ที่ได้จากการปรับปรุงวิธีพื้นฐานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพแบบต่างๆ มาใช้ในการแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่ผลจากจุดคว่ำ

Sinha and Purkayastha (2004) ได้นำเสนอวิธีไฮบริดที่เกิดจากนำเอาคุณลักษณะหลักของวิธี PSO มารวมเข้าด้วยกันกับวิธี EP แบบเก่าที่มีการกลายพันธุ์แบบเกาส์เซียน (Classical Evolutionary Programming with Gaussian mutation, CEP) (PSO_CEP) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีผลจากจุดคว่ำ

Victoire and Jeyakumar (2004) ได้นำเสนอวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีผลกระทบจากจุดคว่ำวิธีใหม่ที่นำเอาวิธี Particle Swarm Optimization (PSO) มารวมเข้าด้วยกันกับวิธี Sequential Quadratic Programming (SQP) โดยใช้วิธี PSO เป็นวิธีที่ใช้ในหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดหลัก (main optimizer) และใช้วิธี SQP ในการปรับค่าตอบที่ได้จากวิธี PSO ในแต่ละรอบการคำนวณให้ดีขึ้น ซึ่งในบทความนี้ได้้นำวิธี PSO-SQP มาทำการทดสอบกับ 3 ระบบที่แตกต่างกัน โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับทุกระบบทดสอบดังนี้คือ ค่าน้ำหนักเริ่มต้น (initial weight, w_{max}) เป็น 0.99, ค่าน้ำหนักสุดท้าย (final weight, w_{min}) เป็น 0.6 และสัมประสิทธิ์การเร่ง (acceleration coefficients) ตั้งค่าไว้ที่ 2 และจากการทดสอบวิธี PSO-SQP กับปัญหาดังกล่าวพบว่ารูปร่างของฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อคุณสมบัติการลู่เข้าหาค่าตอบและข้อดีของวิธี PSO-SQP คือวิธีดังกล่าวมีความสามารถในการค้นหาค่าตอบที่มีคุณภาพสูงและมีคุณลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบที่เร็ว

Park *et al.* (2005) ได้นำเสนอเทคนิคในการปรับปรุงวิธี PSO เพื่อใช้ในการแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบโดยนำเอาวิธีการลดช่องว่างในการค้นหา

แบบพลวัต (dynamic search space reduction strategy) ที่แสดงไว้ในภาพที่ 3 รวมเข้าด้วยกันกับวิธี PSO ซึ่งในบทความนี้ได้นำฟังก์ชันราคากำล้างสองแบบเป็นช่วงมารวมไว้ในสมการของฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) ซึ่งแทนที่จะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันนูนเดียว (a single convex function) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง เพื่อพิจารณาถึงสถานะการทำงานจริงที่มีผลกระทบจากจุดคว่ำและผลกระทบจากเชื้อเพลิงหลายชนิด (multiple fuel effects) และเพื่อที่จะทำให้วิธีดังกล่าวแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีผลกระทบจากจุดคว่ำได้สำเร็จจะต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้คือ ขนาดของประชากรตั้งค่าไว้ที่ 20, ค่าน้ำหนักเริ่มต้น (initial weight, w_{max}) เป็น 1.0, ค่าน้ำหนักสุดท้าย (final weight, w_{min}) เป็น 0.5 และสัมประสิทธิ์การเร่ง (acceleration coefficients) ตั้งค่าไว้ที่ 2 และสำหรับวิธีดังกล่าวในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีผลกระทบจากเชื้อเพลิงหลายชนิดโดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้คือ ขนาดของประชากรเป็น 30, ค่าน้ำหนักเริ่มต้นเป็น 0.5, ค่าน้ำหนักสุดท้ายเป็น 0.1 และสัมประสิทธิ์การเร่งตั้งค่าไว้ที่ 2 และในบทความนี้ยังได้นำเสนอเทคนิคที่ใช้จัดการเงื่อนไขความเท่ากัน (equality constraint) และเงื่อนไขความไม่เท่ากัน (inequality constraint) ในวิธีดังกล่าวอีกด้วย



ภาพที่ 3 แผนผังของวิธีการลดช่องว่างในการค้นหาแบบพลวัต

ที่มา: Park *et al.* (2005)

Perez-Guerrero and Cedeno-Maldonado (2005) ได้นำเสนอวิธี Differential Evolution (DE) ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบซึ่งเป็นผลมาจาก

จุดคว่ำ, บริเวณการทำงานที่ถูกห้าม (prohibited operating zones) และการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน (fuel switching effects)

Chiang (2005) ได้นำเสนอการปรับปรุงวิธี GA (IGA) ด้วยการปรับตัวคูณ (multiplier updating, MU) (IGA_MU) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหัยคที่มีผลกระทบจากจุดคว่ำ, ผลกระทบจากเชื้อเพลิงหลายชนิด และ ผลกระทบจากทั้งจุดคว่ำและเชื้อเพลิงหลายชนิด สำหรับการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหัยคที่ปฏิบัติการได้จริง ซึ่งสภาวะการทำงานจริงในระบบไฟฟ้ากำลังจะเกิดผลกระทบทั้งสองอย่างขึ้นในเวลาเดียวกันเสมอ โดยในวิธีดังกล่าว IGA จะช่วยในเรื่องของประสิทธิภาพในการค้นหาและเสาะหาคำตอบอย่างรวดเร็ว ส่วน MU จะช่วยให้วิธีดังกล่าวเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหัยค

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. ระบบปฏิบัติการ Windows XP
3. โปรแกรม Microsoft Office
4. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ข้อมูลเชิงวิศวกรรม คณิตศาสตร์ MATLAB เวอร์ชัน 7.0

วิธีการ

วิธีการในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch Problem), วิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO), วิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ (Sequential Quadratic Programming, SQP), วิธี Hybrid PSO-SQP ที่ประยุกต์ใช้กับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด และสุดท้ายคือวิธีดำเนินการวิจัยและกรณีศึกษา

1. ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch Problem)

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดคือปัญหาที่ต้องการหาค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องภายในระบบ โดยที่มีค่าใช้จ่ายหรือราคาต้นทุนหรือค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตต่ำที่สุด ซึ่งกำลังการผลิตไฟฟ้านั้นจะต้องเพียงพอต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบ ดังนั้นปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดจึงเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม (optimization problem) โดยมีฟังก์ชันของราคาเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) ซึ่งเป็นไปตามสมการนี้ (Wood and Wollenberg, 1996)

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

- เมื่อ P_i คือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i
 F_T คือฟังก์ชันของราคาค่าเชื้อเพลิงรวม มีหน่วยเป็น หน่วยราคาต่อชั่วโมง
 $F_i(P_i)$ คือฟังก์ชันของราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i มีหน่วยเป็น หน่วยราคาต่อชั่วโมง

โดยจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของการผลิตกำลังไฟฟ้าให้สมดุลกับความต้องการและขีดจำกัดของการผลิต ดังสมการ (2) และ (3)

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_{loss} \quad (2)$$

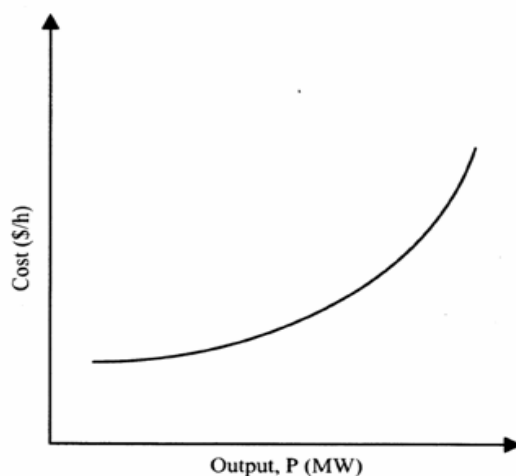
$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (3)$$

- เมื่อ P_D คือความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบ
 P_{loss} คือค่าความสูญเสียของระบบ
 N คือจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
 $P_{i,min}$ และ $P_{i,max}$ คือกำลังการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i

โดยปกติแล้วฟังก์ชันของราคาค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดจะอยู่ในรูปของสมการกำลังสอง (quadratic function) หรือสมการโพลิโนเมียล (polynomial) ซึ่งเป็นฟังก์ชันราคาที่ราบเรียบ (smooth cost function) ดังแสดงในภาพที่ 4 และสมการต่อไปนี้

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (4)$$

- เมื่อ a_i , b_i และ c_i คือสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i



ภาพที่ 4 ฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงปกติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

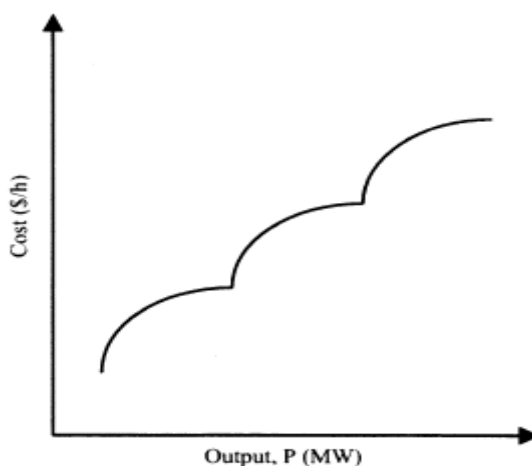
ที่มา: Perez-Guerrero and Cedenio-Maldonado (2005)

และในปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหัตที่มีผลจากจุดวาล์ว (valve point effect) และจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน (fuel switching effect) จะทำให้เกิดฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบ (non-smooth cost function) ขึ้น ซึ่งจะทำให้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหัตมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นและยากต่อการคำนวณ

1.1 ผลที่เกิดจากจุดวาล์ว (valve point effect) (Walters and Sheble, 1993; Wood and Wollenberg, 1996; Chiang, 2005; Perez-Guerrero and Cedenio-Maldonado, 2005) คือผลที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำขนาดใหญ่ที่มีจำนวนของวาล์วที่ใช้ในการปล่อยไอน้ำเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้การเปิดเป็นลำดับเพื่อให้ได้กำลังการผลิตเพิ่มขึ้น และเมื่อระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มากขึ้น ดังนั้นจึงต้องเพิ่มไอน้ำให้มากขึ้นโดยทำการเปิดวาล์วตัวที่สอง ซึ่งระหว่างที่มีการเปิดวาล์วตัวที่สองจะทำให้ incremental heat rate ลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเปิดวาล์วตัวแรกจะทำให้เกิด throttling losses เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะทำให้ incremental heat rate เพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใด ซึ่งในการเพิ่มขึ้นนี้ทำให้เกิดลักษณะความไม่ต่อเนื่องของ incremental heat rate และทำให้เกิดการกระเพื่อม (ripple) บนกราฟเส้นโค้งของฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งจะทำให้ฟังก์ชันของราคาค่าเชื้อเพลิงมีลักษณะดังนี้

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \times \sin(f_i \times (P_{i,min} - P_i))| \quad (5)$$

เมื่อ e_i และ f_i คือสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่เกิดจาก valve-point ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i



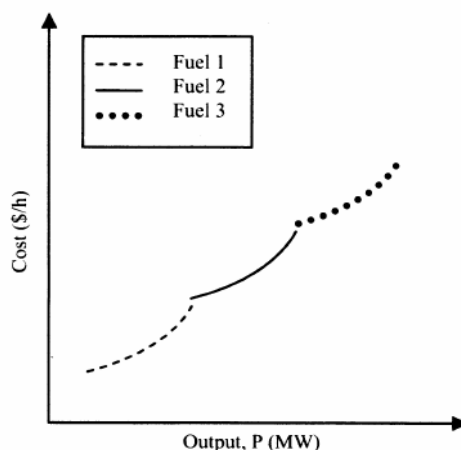
ภาพที่ 5 ฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีวาล์วที่ใช้ในการปล่อยไอน้ำ 3 ตัว

ที่มา: Perez-Guerrero and Cedenio-Maldonado (2005)

1.2 ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน (fuel switching effect) (Lin and Viviani, 1984; Wood and Wollenberg, 1996; Chiang, 2005; Perez-Guerrero and Cedenio-Maldonado, 2005) คือผลที่เกิดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเครื่องที่สามารถทำงานโดยใช้เชื้อเพลิงที่แตกต่างกันได้หลายชนิด (multiple fuels) ซึ่งการที่มีการใช้เชื้อเพลิงหลายชนิดจะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนใช้เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งไปยังอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ฟังก์ชันของราคาค่าเชื้อเพลิงอยู่ในรูปของฟังก์ชันราคาคอตราคิกเป็นช่วง (piecewise quadratic functions) ดังแสดงในภาพที่ 6 และมีลักษณะฟังก์ชันดังนี้

$$F_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_i + c_{i1}P_i^2, & \text{fuel 1, } P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i1} \\ a_{i2} + b_{i2}P_i + c_{i2}P_i^2, & \text{fuel 2, } P_{i1} < P_i \leq P_{i2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{ik} + b_{ik}P_i + c_{ik}P_i^2, & \text{fuel } k, P_{i,k-1} < P_i \leq P_{i,\max} \end{cases} \quad (6)$$

เมื่อ a_{ik} , b_{ik} และ c_{ik} คือสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i โดยใช้เชื้อเพลิงชนิดที่ k



ภาพที่ 6 ฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการใช้เชื้อเพลิงหลายชนิด

ที่มา: Perez-Guerrero and Cedeno-Maldonado (2005)

และถ้าเรานำผลที่เกิดจากจุดคว่ำและการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิง k ชนิดมาพิจารณาพร้อมกันจะได้ฟังก์ชันของราคาค่าเชื้อเพลิงดังสมการนี้ (Chiang, 2005)

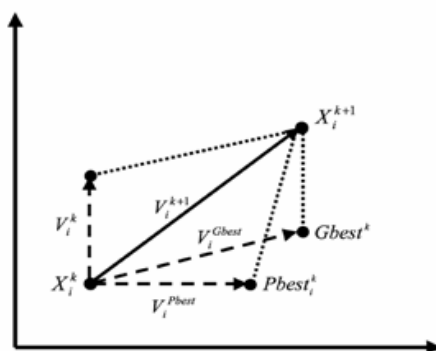
$$F_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_i + c_{i1}P_i^2 + |e_{i1} \times \sin(f_{i1} \times (P_{i1,min} - P_i))|, & \text{fuel 1, } P_{i1,min} \leq P_i \leq P_{i1} \\ a_{i2} + b_{i2}P_i + c_{i2}P_i^2 + |e_{i2} \times \sin(f_{i2} \times (P_{i2,min} - P_i))|, & \text{fuel 2, } P_{i1} < P_i \leq P_{i2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{ik} + b_{ik}P_i + c_{ik}P_i^2 + |e_{ik} \times \sin(f_{ik} \times (P_{ik,min} - P_i))|, & \text{fuel } k, P_{ik-1} < P_i \leq P_{i,max} \end{cases} \quad (7)$$

2. วิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO)

ในปี 1995 Kennedy และ Eberhart ได้ริเริ่มเทคนิคการคำนวณที่มีวิวัฒนาการ (evolutionary computation technique) แบบใหม่ที่มีชื่อเรียกว่า การทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) (Kennedy and Eberhart, 1995) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับเทคนิคการ

คำนวณที่มีวิวัฒนาการอื่นๆ โดย PSO จะใช้ทฤษฎีของการสุ่มสุ่มประชากรเริ่มต้นและใช้การประเมินค่าและการเปลี่ยนแปลงเหล่าประชากรเพื่อค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (optimal solution) ซึ่ง PSO จะมีความคล้ายคลึงกับวิธีเจเนติก (Genetic Algorithm, GA) ตรงที่ประชากรเริ่มต้นได้จากการสุ่มเหมือนกัน แต่ต่างกันตรงที่ PSO ไม่ได้ใช้ตัวดำเนินการต่างๆ ในขั้นตอนการเปลี่ยนแปลง เช่น การกลายพันธุ์และการสลับไขว้ เหมือน GA แต่ PSO ใช้การปรับปรุงตัวมันเอง ในขั้นตอนการเปลี่ยนแปลง และเมื่อนำ PSO มาเปรียบเทียบกับเทคนิคการคำนวณที่มีวิวัฒนาการอื่นๆ ซึ่งความได้เปรียบของ PSO คือเป็นวิธีที่ใช้งานได้ง่ายและมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงที่น้อย โดยแบบจำลองพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ของ PSO สามารถอธิบายได้ดังนี้

ให้ฝูง (swarm) หนึ่งฝูงมีอนุภาค (particle) n ตัวอยู่ในขนาดของช่วงที่ใช้ในการค้นหา d (d -dimensional search space) ที่รอบการทำงานที่ k ให้ $x_i^k = (x_{i1}^k, x_{i2}^k, \dots, x_{id}^k)$ ใช้อธิบายตำแหน่ง (position) ของอนุภาคตัวที่ i , $Pbest_i^k = (Pbest_{i1}^k, Pbest_{i2}^k, \dots, Pbest_{id}^k)$ แสดงตำแหน่งก่อนหน้าที่ดีที่สุดของอนุภาคตัวที่ i , ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคโดยรวมคือ $Gbest_d^k = (Gbest_1^k, Gbest_2^k, \dots, Gbest_d^k)$, ความเร็ว (velocity) ของอนุภาคตัวที่ i คือ $v_i^k = (v_{i1}^k, v_{i2}^k, \dots, v_{id}^k)$ และประชากรแต่ละตัวเรียกว่าอนุภาค (particle) หรือตัวกระทำ (agent) สามารถนำไปปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงไปยังตำแหน่งใหม่ที่สอดคล้องกับความเร็วปัจจุบัน ซึ่งความแตกต่างระหว่างตำแหน่งปัจจุบันและตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาค ($Pbest$) และตำแหน่งที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาค ($Gbest$) ใช้ในการปรับปรุงความเร็วของอนุภาคตัวที่ i สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7 ซึ่งวิธีในการปรับปรุงความเร็วของอนุภาคมีหลายวิธีดังนี้ (Eberhart and Shi, 2001; Sriyanyong *et al.*, 2007)



ภาพที่ 7 การปรับปรุงความเร็วของอนุภาค

ที่มา: Park *et al.* (2005)

2.1 วิธีดั้งเดิมของ PSO (Original PSO algorithm: OPSO) การปรับปรุงความเร็วของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากสมการ (8)

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 \times rand_1 \times (Pbest_{id} - x_{id}^k) + c_2 \times rand_2 \times (Gbest_d - x_{id}^k) \quad (8)$$

เมื่อค่าของ c_1 และ c_2 เท่ากับ 2 และค่าของ $rand_1$ และ $rand_2$ คือจำนวนสุ่มในช่วง [0,1]

2.2 วิธีการพื้นฐานของ PSO (Basic PSO algorithm: BPSO) เนื่องจาก OPSO ไม่ได้ทำการปรับขนาดก้าว (step size) ของความเร็วซึ่งทำให้ความสามารถในการค้นหามีคุณภาพต่ำ ดังนั้น BPSO จึงใช้ค่าน้ำหนักความเฉื่อย (w) เพื่อให้การค้นหเฉพาะที่ (local) และโดยรวม (global) สมดุล ซึ่งการปรับปรุงความเร็วของอนุภาคใน BPSO สามารถคำนวณได้จากสมการ (9)

$$v_{id}^{k+1} = w \cdot v_{id}^k + c_1 \times rand_1 \times (Pbest_{id} - x_{id}^k) + c_2 \times rand_2 \times (Gbest_d - x_{id}^k) \quad (9)$$

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{Iter_{max}} \times Iter \quad (10)$$

เมื่อ w_{max} คือค่าน้ำหนักความเฉื่อยเริ่มต้น
 w_{min} คือค่าน้ำหนักความเฉื่อยสุดท้าย
 $Iter$ คือจำนวนรอบการทำงาน
 $Iter_{max}$ คือจำนวนรอบการทำงานสูงสุด

โดยที่ w เท่ากับ 0.9 ที่รอบการทำงานแรกและลดลงเป็นเชิงเส้นไปจนถึง 0.4 ที่รอบการคำนวณสุดท้าย

2.3 วิธีตัวประกอบการหดตัวของ PSO (Constriction factor PSO algorithm: CPSO) เป็นวิธีที่ใช้เพื่อยืนยันการลู่เข้าของวิธี PSO ซึ่งการปรับปรุงความเร็วของอนุภาคใน CPSO สามารถคำนวณได้จากสมการ (11)

$$v_{id}^{k+1} = K \times [v_{id}^k + c_1 \times rand_1 \times (Pbest_{id} - x_{id}^k) + c_2 \times rand_2 \times (Gbest_d - x_{id}^k)] \quad (11)$$

$$K = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \quad \varphi = c_1 + c_2, \quad \varphi > 4 \quad (12)$$

เมื่อ φ โดยทั่วไปตั้งค่าไว้ที่ 4.1, c_1 และ c_2 เท่ากับ 2.05 และ K เท่ากับ 0.729

2.4 วิธีดั้งเดิมของ PSO ที่รวมค่าน้ำหนักความเฉื่อยและตัวประกอบการหดตัวด้วย (Original PSO including inertia weight and constriction factor algorithm: CBPSO) ในวิธีนี้ได้นำค่าน้ำหนักความเฉื่อยและตัวประกอบการหดตัวรวมเข้าไปไว้ใน OPSO ซึ่งการปรับปรุงความเร็วของอนุภาคใน CBPSO สามารถคำนวณได้จากสมการ (13)

$$v_{id}^{k+1} = K \times [w \cdot v_{id}^k + c_1 \times rand_1 \times (Pbest_{id} - x_{id}^k) + c_2 \times rand_2 \times (Gbest_d - x_{id}^k)] \quad (13)$$

การปรับปรุงตำแหน่งของแต่ละอนุภาคสามารถคำนวณได้จากสมการ (14)

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (14)$$

เมื่อ v_{id}^k คือความเร็วของอนุภาคตัวที่ i ที่รอบการทำงานที่ k ในขนาดของช่วงที่ใช้ในการค้นหา d ;

$$V_{d,min} \leq v_{id}^k \leq V_{d,max} ; i = 1, 2, \dots, n, \quad d = 1, 2, \dots, m$$

x_{id}^k คือตำแหน่งปัจจุบันของอนุภาคตัวที่ i ที่รอบการทำงานที่ k

w คือตัวประกอบค่าน้ำหนักความเฉื่อย

k คือจำนวนของรอบการทำงาน

n คือจำนวนของอนุภาคในกลุ่ม

m คือจำนวนของสมาชิกในอนุภาคหนึ่งตัว

K คือตัวประกอบการหดตัว

c_1, c_2 คือค่าคงที่ความเร่ง (acceleration constant)

$rand_1, rand_2$ คือการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (uniformly distributed) โดยการใช้สุ่มจำนวนในช่วง $[0,1]$

และสามารถทำให้ประสิทธิภาพของ PSO ดีขึ้นได้ จากการเลือกค่าน้ำหนักความเฉื่อย (w) และค่าคงที่ความเร่ง (c_1, c_2) อย่างระมัดระวัง

3. วิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ (Sequential Quadratic Programming, SQP)

วิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ (Sequential Quadratic Programming, SQP) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและประสบผลสำเร็จในการแก้ปัญหาที่มีเงื่อนไขที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearly constrained) ซึ่งวิธี SQP มีสมรรถนะที่เหนือกว่าวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear programming) วิธีอื่นๆ ในแง่ของประสิทธิภาพ, ความแม่นยำ, และร้อยละของคำตอบที่ประสบผลสำเร็จที่เหนือกว่า (Nash and Sofer, 1996) ซึ่ง SQP จะมีแนวคิดหลักเพื่อให้ได้ทิศทางการค้นหา (search direction) โดยใช้วิธีโปรแกรมกำลังสอง (Quadratic Programming, QP) เป็นปัญหาย่อย (subproblem) ซึ่งวิธี QP คือปัญหาที่มีฟังก์ชันเป้าหมายอยู่ในรูปของสมการกำลังสอง (quadratic objective function) และมีเงื่อนไขที่มีความเป็นเชิงเส้น (linear constraints) และนั่นก็คือลักษณะโดยทั่วไปของวิธี Newton สำหรับการหาค่าที่ดีที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไข (unconstrained optimization) โดยในแต่ละรอบการทำงานจะใช้วิธี Broyden-Foldfarb-Goldfarb-Shanno (BFGS) quasi-Newton เพื่อปรับปรุง Hessian matrix ของฟังก์ชันลากรางเจียน (Lagrangian function) ซึ่งคำตอบที่ได้จะนำไปใช้ในการสร้างรูปแบบทิศทางการค้นหาสำหรับกระบวนการค้นหาเส้นทาง โดยปัญหาย่อย QP สามารถอธิบายได้ดังสมการ (15) (Attaviriyanupap *et al.*, 2002)

$$\text{Minimize } \frac{1}{2} d_k^T H_k d_k + \nabla f(x_k)^T d_k \quad (15)$$

โดยที่จะต้องเป็นไปตามสมการ (16)

$$\begin{aligned} [\nabla g(x_k)]^T d_k + g_i(x_k) &= 0, i = 1, \dots, m_e \\ [\nabla g(x_k)]^T d_k + g_i(x_k) &\leq 0, i = m_e + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (16)$$

เมื่อ H_k คือ Hessian matrix ที่นิยามโดยฟังก์ชันลากรางเจียนดังสมการ (17)

$$L(x, \lambda) = f(x) + \lambda^T g_i(x) \text{ at } x = x_k \quad (17)$$

d_k คือทิศทางการค้นหาที่รอบการทำงานที่ k

$f(x)$ คือฟังก์ชันเป้าหมายในสมการ (1)

$g(x)$ คือเงื่อนไขจากสมการ (2) และ (3)

m_e คือจำนวนของเงื่อนไขความเท่ากัน

m คือจำนวนของเงื่อนไข

และวิธี SQP ที่ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลักคือ

1) ปรับปรุง Hessian matrix ของฟังก์ชันลากรางเจียน

ในแต่ละรอบการทำงาน H_k ประมาณได้จาก B_k ซึ่งคำนวณโดยใช้วิธี BFGS quasi-Newton ดังสมการ (18)

$$B_{k+1} = B_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{(B_k s_k)(B_k s_k)^T}{s_k^T B_k s_k} \quad (18)$$

เมื่อ $s_k = x_{k+1} - x_k$, $q_k = \nabla f(x_{k+1}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x_{k+1}) - \nabla f(x_k) - \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x_k)$ และ λ คือตัวคูณลากรางจ์

2) ปัญหาโปรแกรมกำลังสอง

ทิศทางการค้นหา d_k ที่แต่ละรอบการทำงานที่ k สามารถคำนวณได้จากแก้ปัญหาย่อย QP ตามสมการ (15) โดยเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการ (16)

3) การค้นหาเส้นทางและการคำนวณฟังก์ชันคุณค่า (merit function)

คำตอบที่ได้จากปัญหาย่อย QP คือเวกเตอร์ d_k ที่นำไปใช้ในการสร้างรูปแบบของรอบการทำงานใหม่

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (19)$$

เมื่อ α_k คือความยาวก้าว (step length) ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดเพื่อที่จะทำให้ฟังก์ชันคุณค่าลากรางเจียนลดลงอย่างพอเหมาะ และฟังก์ชันคุณค่าสามารถอธิบายได้ดังสมการ (20)

$$L = f(x) - \sum_{i=1}^m \lambda_i (g_i(x) - s_i) + \frac{1}{2} \sum \rho_i (g_i(x) - s_i)^2 \quad (20)$$

เมื่อ λ คือตัวคูณลากรางจ์

s คือตัวแปรเฉื่อย (slack variable) ที่ไม่มีค่าเป็นลบ

ρ คือตัวแปรค่าปรับ (penalty parameter) ซึ่งมีค่าไม่เป็นลบและจะถูกกำหนดค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ที่ตอนเริ่มต้นของรอบการทำงานแรก หลังจากนั้นค่าดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนแปลงเมื่อจำเป็นต่อการลดลงของฟังก์ชันคุณค่าในสมการ (19)

4. วิธี Hybrid PSO-SQP ที่ประยุกต์ใช้กับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

วิธี Hybrid PSO-SQP เป็นวิธีที่เกิดจากการรวมกันของวิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ (SQP) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธี PSO เป็นวิธีหาค่าที่เหมาะสมหลักในการหาบริเวณที่เหมาะสมที่สุดโดยรวม (optimal global region) และใช้วิธี SQP ในการปรับคำตอบที่ได้จากวิธี PSO ให้เป็นที่น่าพอใจเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

4.1 รับค่าข้อมูลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งได้แก่ สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิง (a, b, c), สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่เกิดจากจุดคว่ำ (e, f), ขีดจำกัดของการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P_{min}, P_{max}) และความต้องการกำลังไฟฟ้า (P_{load})

4.2 กำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ, ตำแหน่ง และความเร็วของแต่ละอนุภาค (particle)

4.2.1 กำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งได้แก่ ขนาดของประชากร (population size), ค่าน้ำหนักความเฉื่อยเริ่มต้น (initial inertia weight: w_{max}), ค่าน้ำหนักความเฉื่อยสุดท้าย (final inertia weight: w_{min}), ค่าคงที่ความเร่ง (acceleration constants: c_1, c_2) และจำนวนรอบการทำงานสูงสุด

4.2.2 ทำการสุ่มประชากรเริ่มต้นโดยใช้การเปลี่ยนแปลงวิธีที่ช่วยในการค้นหา ซึ่งมีแนวคิดหลักคือกำหนดค่าตำแหน่งเริ่มต้นของแต่ละอนุภาคโดยจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของการผลิตกำลังไฟฟ้าให้สมดุลกับความต้องการ (power balance) และขีดจำกัดของการผลิตกำลังไฟฟ้า (operating limit) ซึ่งวิธีที่ช่วยในการค้นหาได้ทำการเปลี่ยนแปลงมาจาก Park *et al.* (2003) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหา โดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงการค้นหาเป็นดังภาพที่ 8

4.2.3 กำหนดค่าความเร็วเริ่มต้นของแต่ละอนุภาค

4.2.4 คำนวณค่าที่เหมาะสม (fitness value: F_f) ของแต่ละอนุภาคโดยใช้สมการ (1)

4.2.5 กำหนดให้แต่ละค่าที่เหมาะสมเป็น P_{best}

4.2.6 ทำการค้นหาค่าตำแหน่งที่ดีที่สุด (ที่มีราคาต่ำที่สุด) จากอนุภาคทั้งหมด (ค่า P_{best}) และกำหนดให้ค่านี้เป็น G_{best}

4.3 ทำการปรับปรุงความเร็วและตำแหน่ง

4.3.1 ปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งของแต่ละอนุภาคโดยใช้สมการ (9) และ (14) ตามลำดับ

4.3.2 ถ้า $x_{id}^{k+1} > P_{i,max}$ ให้ $x_{id}^{k+1} = P_{i,max}$ หรือถ้า $x_{id}^{k+1} < P_{i,min}$ ให้ $x_{id}^{k+1} = P_{i,min}$ ไม่เช่นนั้นแล้วให้ $x_{id}^{k+1} = x_{id}^k$

4.4 ทำการเปลี่ยนแปลงแต่ละอนุภาคโดยใช้แนวคิดเบื้องต้นเหมือนขั้นตอนที่ 4.2 ยกเว้นกระบวนการหาค่าสุดท้าย (final value: P_{ff}) ดังแสดงในส่วนที่ 1 และ 2 ของภาพที่ 9 ซึ่งค่าสุดท้ายในขั้นตอนนี้คือ P_{ff} ที่ได้มาจากการสุ่มจำนวนแทนที่จะได้มาจากการคำนวณองค์ประกอบแรกของแต่ละอนุภาคดังแสดงไว้ในภาพที่ 8 ซึ่งทำให้ค่าที่ได้ขาดความหลากหลาย ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาจึงใช้ฝูงอนุภาคที่ได้ถูกปรับปรุงในขั้นตอนที่ 4.3 เป็นค่าเริ่มต้นในขั้นตอนนี้

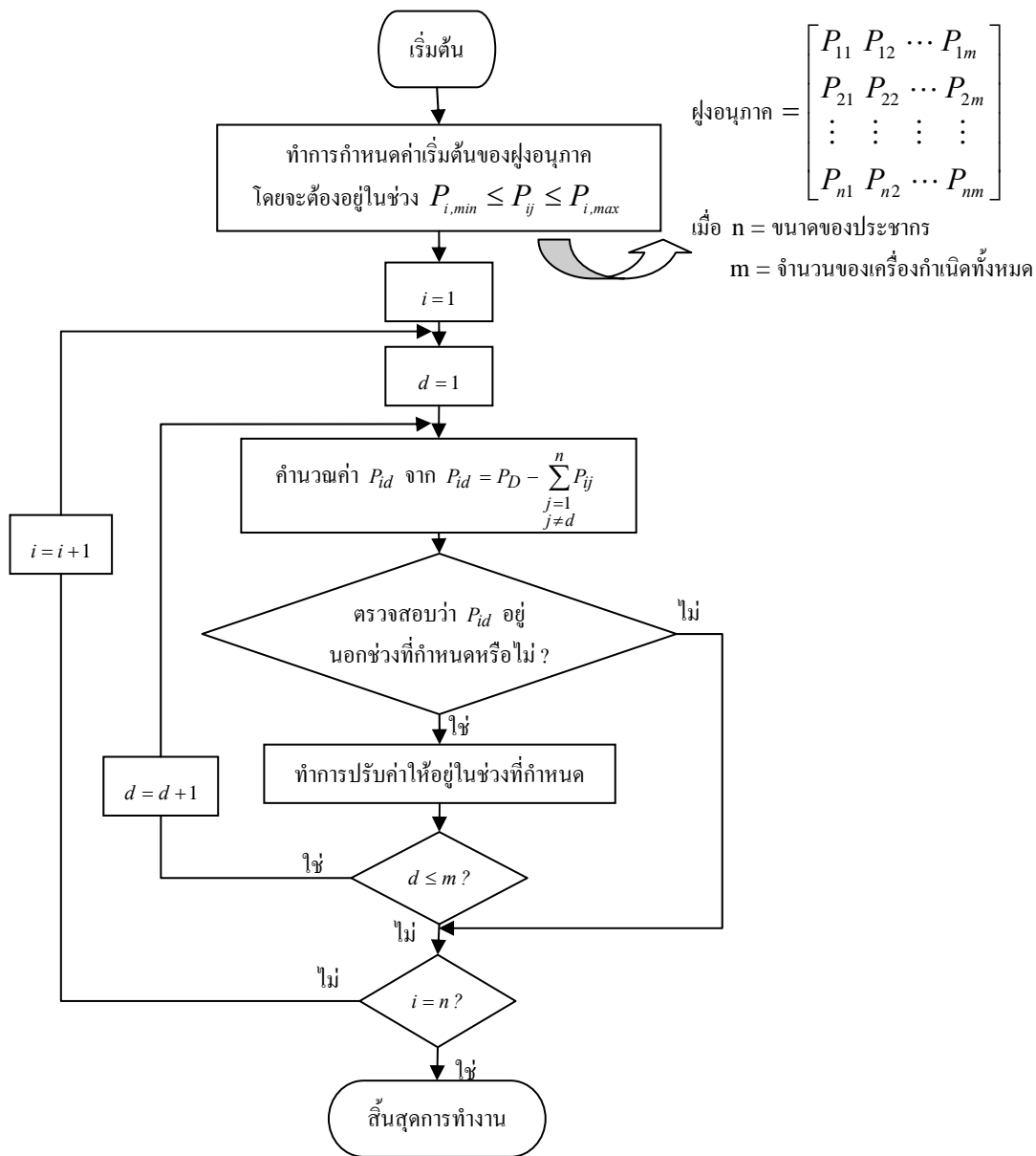
4.5 ทำการประเมินค่าของแต่ละอนุภาคโดยการคำนวณค่าที่เหมาะสมของแต่ละอนุภาคจากสมการ (1)

4.6 ทำการปรับปรุง P_{best} และ G_{best} ซึ่งถ้าค่าที่เหมาะสมปัจจุบัน (current fitness) มีค่าน้อยกว่า P_{best} ก่อนหน้า กำหนดให้ค่าที่เหมาะสมปัจจุบันเป็น P_{best} และให้ค่า P_{best} ที่ดีที่สุดเป็น G_{best} ถ้ามันมีค่าน้อยกว่า G_{best} ก่อนหน้า

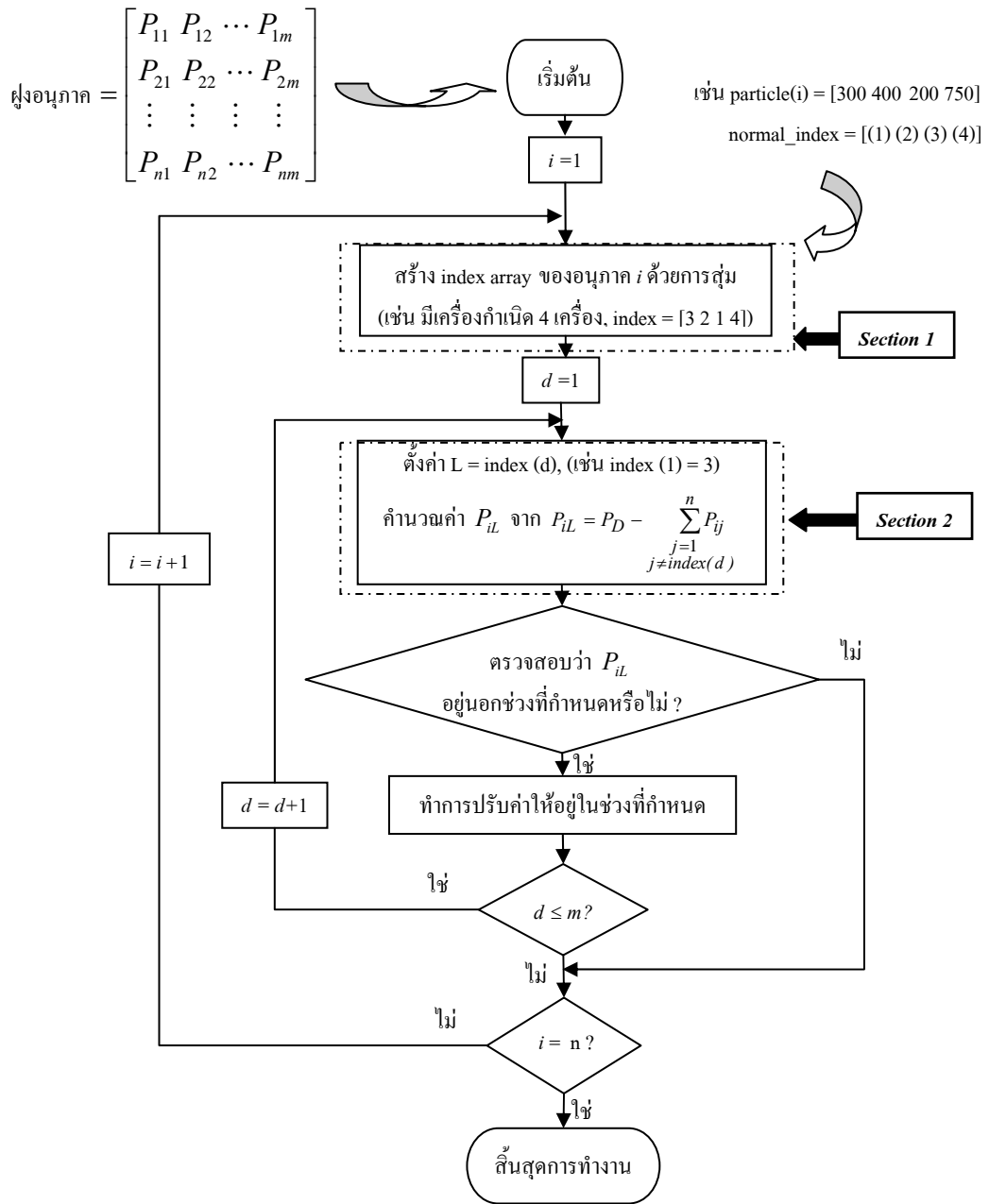
4.7 ถ้าวรอบการทำงานปัจจุบันมากกว่าจำนวนรอบการทำงานสูงสุดให้ทำการหยุดและนำค่า G_{best} ล่าสุดไปเป็นคำตอบสุดท้าย (final solution) ของวิธี PSO ไม่เช่นนั้นให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 4.3

4.8 นำค่า G_{best} ที่เป็นคำตอบสุดท้ายของวิธี PSO มาเป็นค่าเริ่มต้นของวิธี SQP

4.9 นำคำตอบสุดท้ายที่ได้จากวิธี SQP ไปแสดงผลและทำการออกจากโปรแกรม



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นด้วยการเปลี่ยนแปลงวิธีที่ช่วยในการค้นหา



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงแต่ละอนุภาคด้วยการเปลี่ยนแปลงวิธีที่ช่วยในการค้นหา

5. วิธีดำเนินการวิจัยและกรณีศึกษา

งานวิจัยนี้ได้นำวิธี Hybrid PSO-SQP มาใช้กับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองการทำงาน ซึ่งดำเนินการบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Pentium IV, 3 GHz ที่มี 512 MB RAM และทำการทดสอบกับระบบทดสอบ ซึ่งแบ่งเป็น 4 กรณีศึกษาคือ

กรณี 1 ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบสำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง, 10 เครื่อง และ 40 เครื่อง

กรณี 2 ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีผลจากจุดคว่ำสำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง, 10 เครื่อง และ 40 เครื่อง

กรณี 3 ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันสำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง

กรณี 4 ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีทั้งผลจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและผลจากจุดคว่ำสำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง

ซึ่งข้อมูลของระบบทดสอบทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก

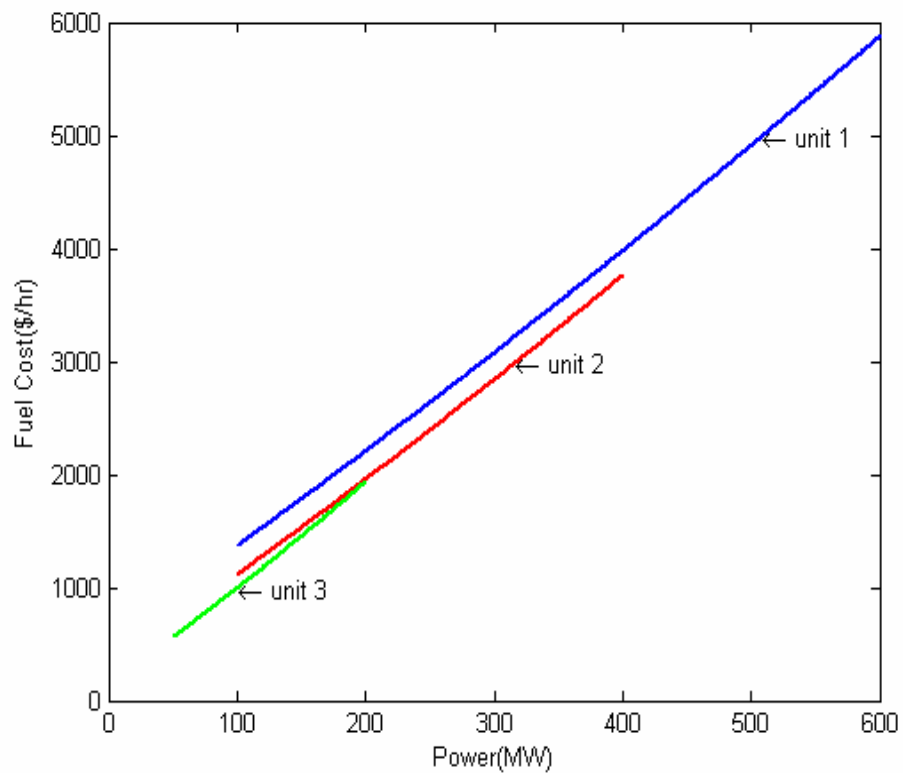
ผลและวิจารณ์

ในส่วนของผลและวิจารณ์นี้ จะแสดงถึงผลที่ได้จากการทดสอบกรณีศึกษาทั้ง 4 กรณี เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวิธี Hybrid PSO-SQP โดยนำมาเปรียบเทียบกับวิธีต่างๆ ที่เคยมีการศึกษามาในอดีตและนำผลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ ประกอบผลการวิจัยทั้งหมดต่อไป

ผล

กรณี 1

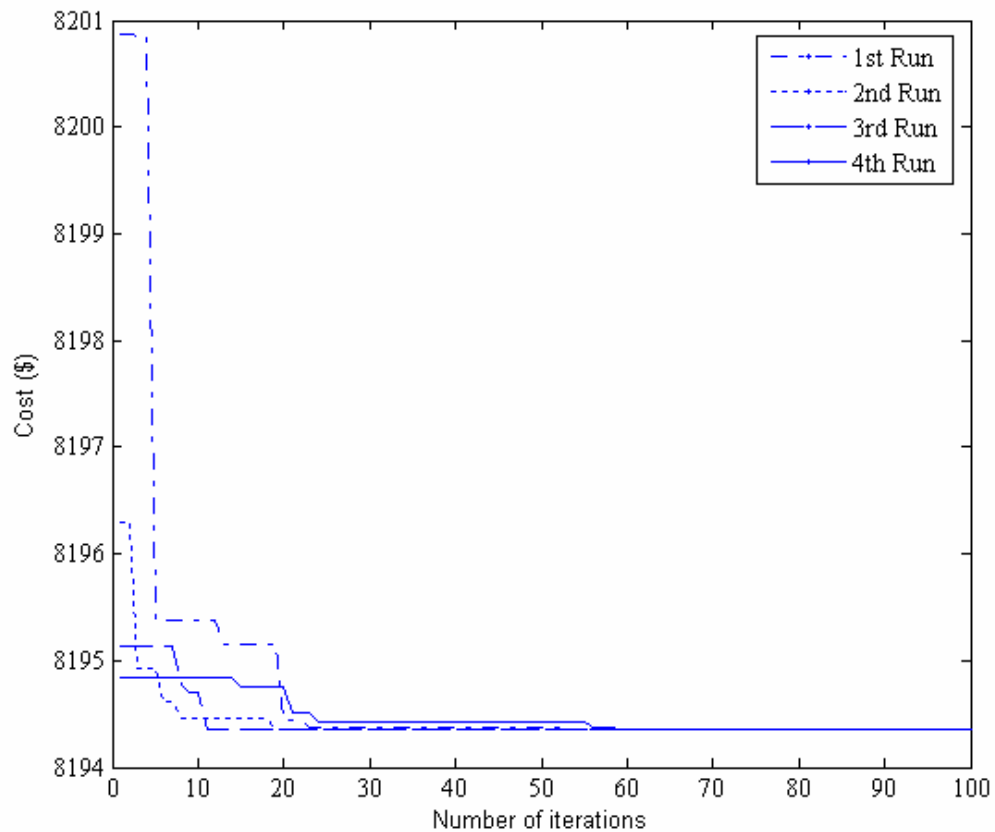
ในกรณีนี้เป็นการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบดังแสดงไว้ในภาพที่ 10 โดยใช้ระบบทดสอบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง, 10 เครื่อง และ 40 เครื่อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ทดสอบกับทั้ง 3 ระบบข้างต้นดังต่อไปนี้คือ ขนาดของประชากรเป็น 10, ค่าน้ำหนักความเฉื่อยเริ่มต้น (w_{max}) เป็น 0.9, ค่าน้ำหนักความเฉื่อยสุดท้าย (w_{min}) เป็น 0.4, ค่าคงที่ความเร่ง (c_1, c_2) เป็น 2, จำนวนรอบการทำงานสูงสุดเป็น 300 และผลการทดสอบกับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง, 10 เครื่อง และ 40 เครื่อง โดยความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบเป็น 850 MW, 2700 MW และ 10500 MW ตามลำดับ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ถึง 3 โดยมีคุณลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบของระบบทดสอบทั้ง 3 ระบบที่มีสถานะเริ่มต้นแตกต่างกันแสดงไว้ในภาพที่ 11 ถึง 13 และผลการเปรียบเทียบระหว่างวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีนิวตัน (Newton Method, NM) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4



ภาพที่ 10 ตัวอย่างฟังก์ชันราคาที่ราบเรียบ

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)
1	393.1698	3916.36267
2	334.6038	3153.84165
3	122.2264	1124.15180
รวม	850.0000	8194.35612
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (s)	0.406	



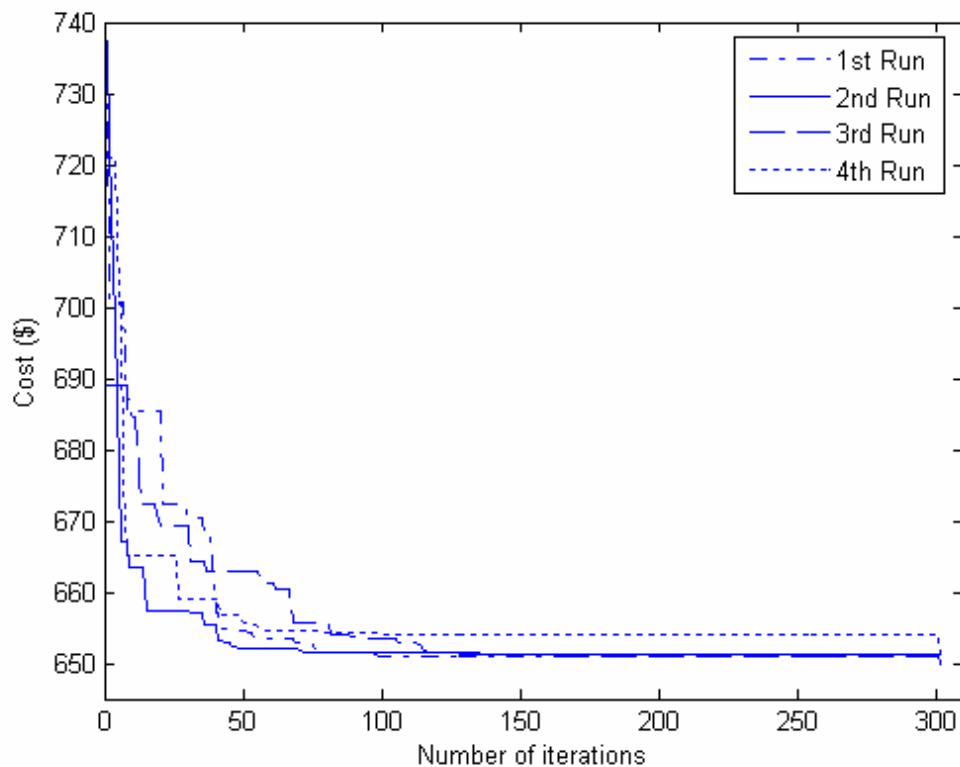
ภาพที่ 11 คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธี Hybrid PSO-SQP ที่มีสถานะเริ่มต้นแตกต่างกัน ในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)
1	214.4548	41.8003
2	215.1715	39.5244
3	290.8230	72.3997
4	265.0000	67.3969
5	292.2679	79.4545

ตารางที่ 2 (ต่อ)

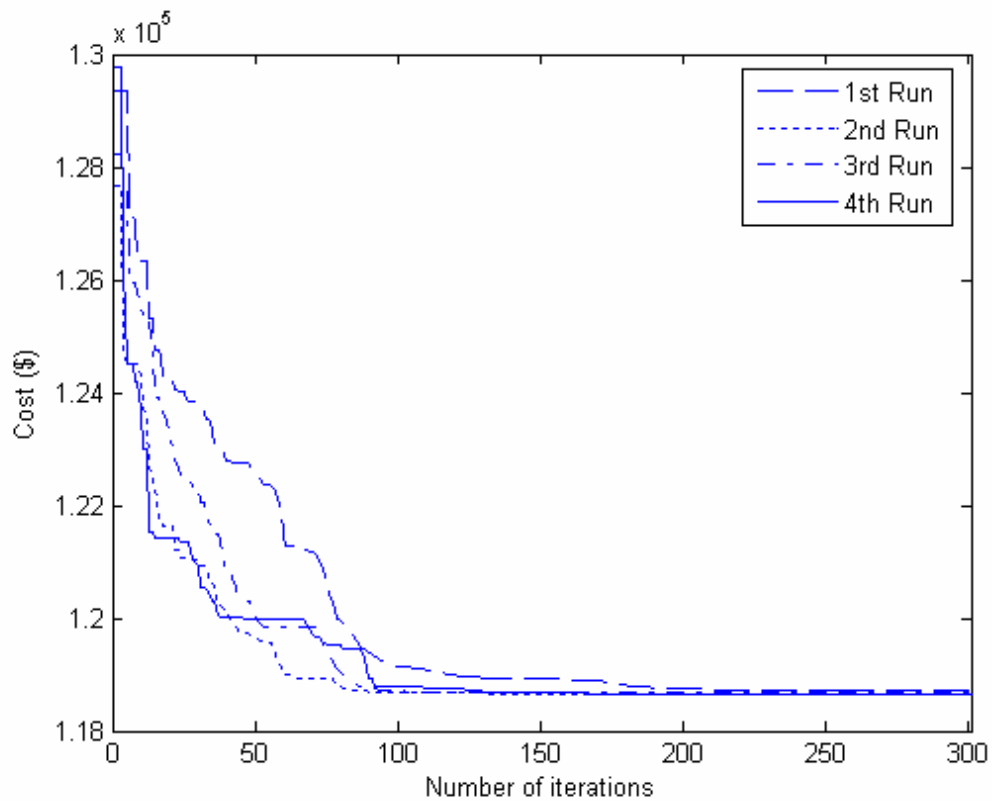
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)
6	212.2331	42.3527
7	301.8610	79.8033
8	265.0000	67.3969
9	354.9763	82.8977
10	288.2125	76.8667
รวม	2700.0000	649.8932
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (s)	2.047	



ภาพที่ 12 คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธี Hybrid PSO-SQP ที่มีสถานะเริ่มต้นแตกต่างกัน
 ในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่า
 เชื้อเพลิงที่ราบเรียบ

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ

เครื่องกำเนิดที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)	เครื่องกำเนิดที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)
1	114.0000	951.5974	21	550.0000	5333.9100
2	114.0000	951.5974	22	550.0000	5333.9100
3	120.0000	1449.9720	23	550.0000	5316.6300
4	190.0000	2263.2920	24	550.0000	5316.6300
5	97.0000	775.1026	25	550.0000	5544.2450
6	140.0000	1573.1620	26	550.0000	5544.2450
7	300.0000	3018.0100	27	10.0000	1140.5240
8	300.0000	2931.7800	28	10.0000	1140.5240
9	300.0000	2951.4600	29	10.0000	1140.5240
10	130.0000	2502.0650	30	97.0000	775.1026
11	94.0000	1893.3054	31	190.0000	1502.3800
12	94.0000	1908.1668	32	190.0000	1502.3800
13	125.0000	2541.6813	33	190.0000	1502.3800
14	271.6727	4717.0083	34	200.0000	1901.8700
15	266.6636	4671.7275	35	200.0000	1844.5800
16	266.6637	4671.7278	36	200.0000	1844.5800
17	500.0000	5415.3500	37	110.0000	1149.0600
18	500.0000	5407.1900	38	110.0000	1149.0600
19	550.0000	5978.1550	39	110.0000	1149.0600
20	550.0000	5978.1350	40	550.0000	5978.1550
กำลังไฟฟ้ารวม (MW) และราคารวม (\$)				10500.0000	118660.2350
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (s)				4.484	



ภาพที่ 13 คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธี Hybrid PSO-SQP ที่มีสถานะเริ่มต้นแตกต่างกัน
ในกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่า
เชื้อเพลิงที่ราบเรียบ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธี NM ในกรณี 1
สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่
ราบเรียบ

ความต้องการ กำลังไฟฟ้า	ราคาต่ำสุดของ วิธี Hybrid PSO-SQP	ราคาต่ำสุดของ วิธีนิวตัน (NM)	จำนวนคำตอบที่มากถึง ยังผลลัพธ์โดยรวม
250	2971.5700	2971.5700	100
300	3387.0950	3387.0950	100
350	3803.7105	3803.7105	100
400	4226.1923	4226.1923	75

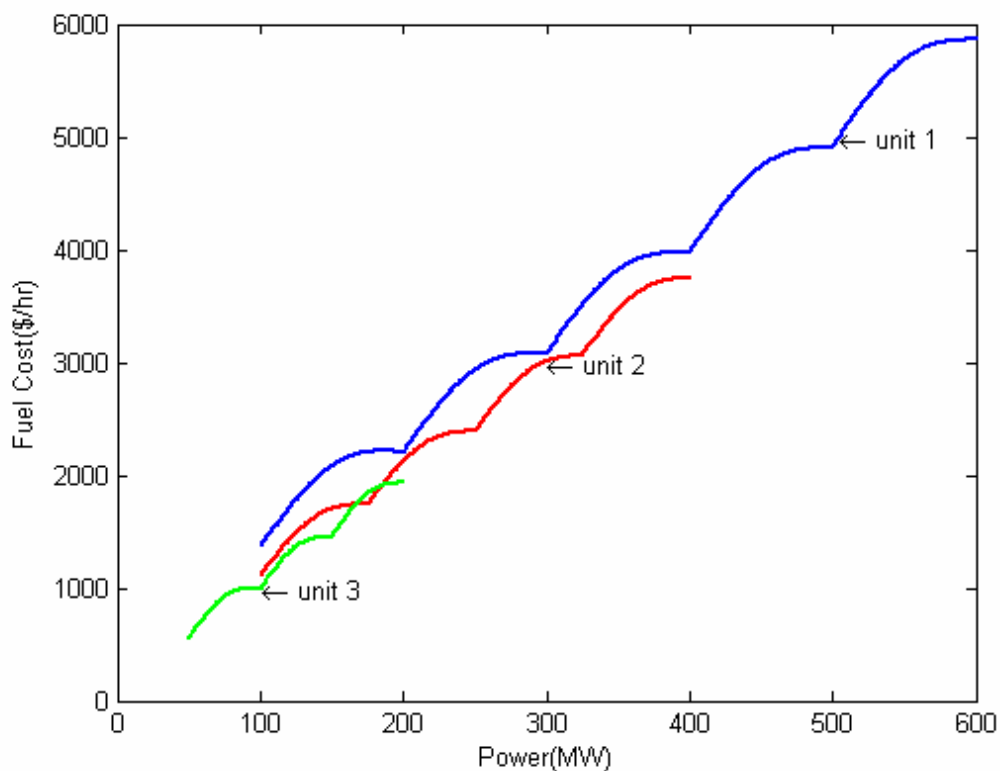
ตารางที่ 4 (ต่อ)

ความต้องการ กำลังไฟฟ้า	ราคาต่ำสุดของ วิธี Hybrid PSO-SQP	ราคาต่ำสุดของ วิธีนิวตัน (NM)	จำนวนคำตอบที่มาถึง ยังผลลัพธ์โดยรวม
500	5082.3304	5082.3304	100
550	5515.9015	5515.9015	100
600	5953.1406	5953.1406	100
650	6394.0477	6394.0477	100
700	6838.6228	6838.6228	100
750	7286.8659	7286.8659	100
800	7738.7770	7738.7770	100
850	8194.3561	8194.3561	100
900	8653.6033	8653.6033	100
950	9116.5184	9116.5184	100
1000	9583.1015	9583.1015	100
1050	10053.6794	10053.6794	100
1100	10529.9209	10529.9209	100
1150	11012.0610	11012.0610	100
1200	11500.5200	11500.5200	100
รวม			1975
คิดเป็นร้อยละ			98.75

กรณี 2

ในกรณีนี้เป็นการแก้ปัญหาค่าใช้จ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำดังแสดงไว้ในภาพที่ 14 โดยใช้ระบบทดสอบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง, 10 เครื่อง และ 40 เครื่อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ทดสอบกับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง และ 10 เครื่อง ดังต่อไปนี้คือ ขนาดของ

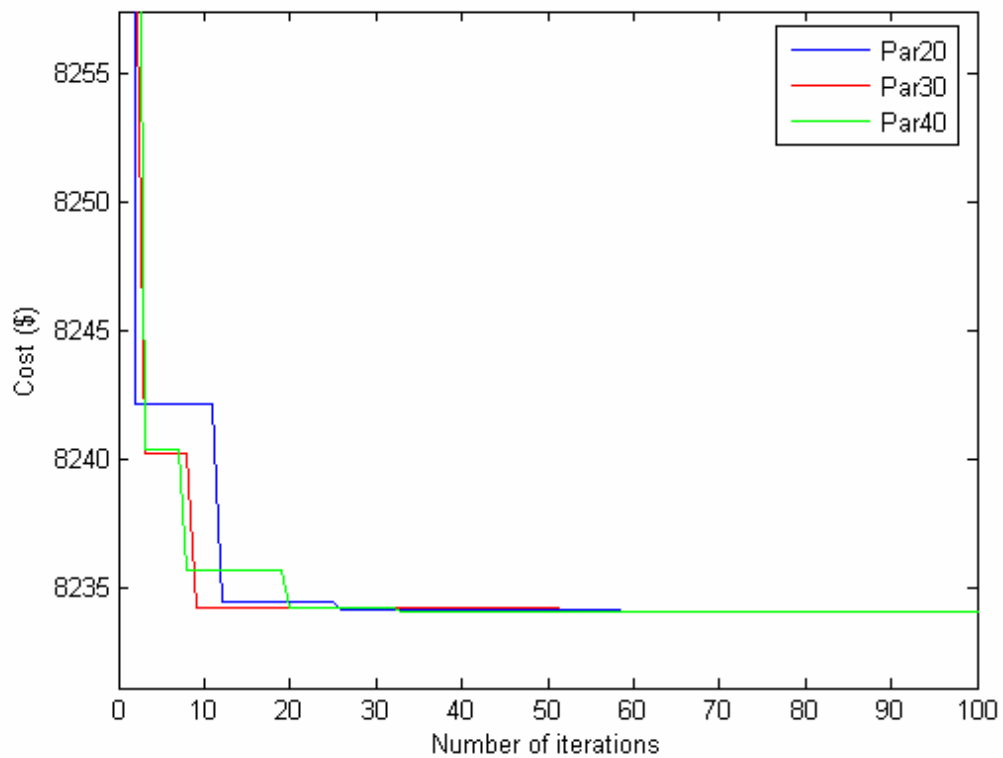
ประชากรเป็น 30, ค่าน้ำหนักความเฉื่อยเริ่มต้น (w_{max}) เป็น 0.9, ค่าน้ำหนักความเฉื่อยสุดท้าย (w_{min}) เป็น 0.4, ค่าคงที่ความเร่ง (c_1, c_2) เป็น 2, จำนวนรอบการทำงานสูงสุดเป็น 300 และการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ทดสอบกับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง เป็นดังต่อไปนี้ คือ ขนาดของประชากรเป็น 60, ค่าน้ำหนักความเฉื่อยเริ่มต้น (w_{max}) เป็น 0.9, ค่าน้ำหนักความเฉื่อยสุดท้าย (w_{min}) เป็น 0.4, ค่าคงที่ความเร่ง (c_1, c_2) เป็น 2, จำนวนรอบการทำงานสูงสุดเป็น 1500 และผลการทดสอบกับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง, 10 เครื่อง และ 40 เครื่อง โดยความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบเป็น 850 MW, 2700 MW และ 10500 MW ตามลำดับ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 ถึง 7 โดยมีคุณลักษณะการหาคำตอบที่ดีที่สุดของระบบทดสอบทั้ง 3 ระบบแสดงไว้ในภาพที่ 15, 17 และ 19 และการกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง ของระบบทดสอบทั้ง 3 ระบบแสดงไว้ในภาพที่ 16, 18 และ 20 และสรุปผลการทดสอบของระบบทั้ง 3 ระบบไว้ในตารางที่ 8 ถึง 10 โดยตารางที่ 8 และ 10 ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง และ 40 เครื่อง ของวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ ที่มีการศึกษามาในอดีต ซึ่งได้แก่ วิธีเจเนติก (Genetic Algorithm, GA) (Walters and Sheble, 1993), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการแบบดั้งเดิม (Classical Evolutionary Programming, CEP) (Sinha *et al.*, 2003), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการแบบเร็ว (Fast Evolutionary Programming, FEP) (Sinha *et al.*, 2003), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการแบบเร็วโดยใช้ค่าน้ำหนักเฉลี่ยของการกลายพันธุ์แบบเกาส์เซียนและคอคชี่ (Fast Evolutionary Programming using the weighted mean of Gaussian and Cauchy mutations, MFEP) (Sinha *et al.*, 2003), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการแบบเร็วที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น (Improved Fast Evolutionary Programming, IFEP) (Sinha *et al.*, 2003), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น (Improved Evolutionary Programming, IEP) (Park *et al.*, 1998), วิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคที่ถูกแก้ไข (Modified Particle Swarm Optimization, MPSO) (Park *et al.*, 2005) และวิธีที่นำเอาวิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาครวมเข้าด้วยกันกับวิธีซีควนเชียลควอตราติกโปรแกรมมิง (PSO-SQP) (Victoire and Jeyakumar, 2004)



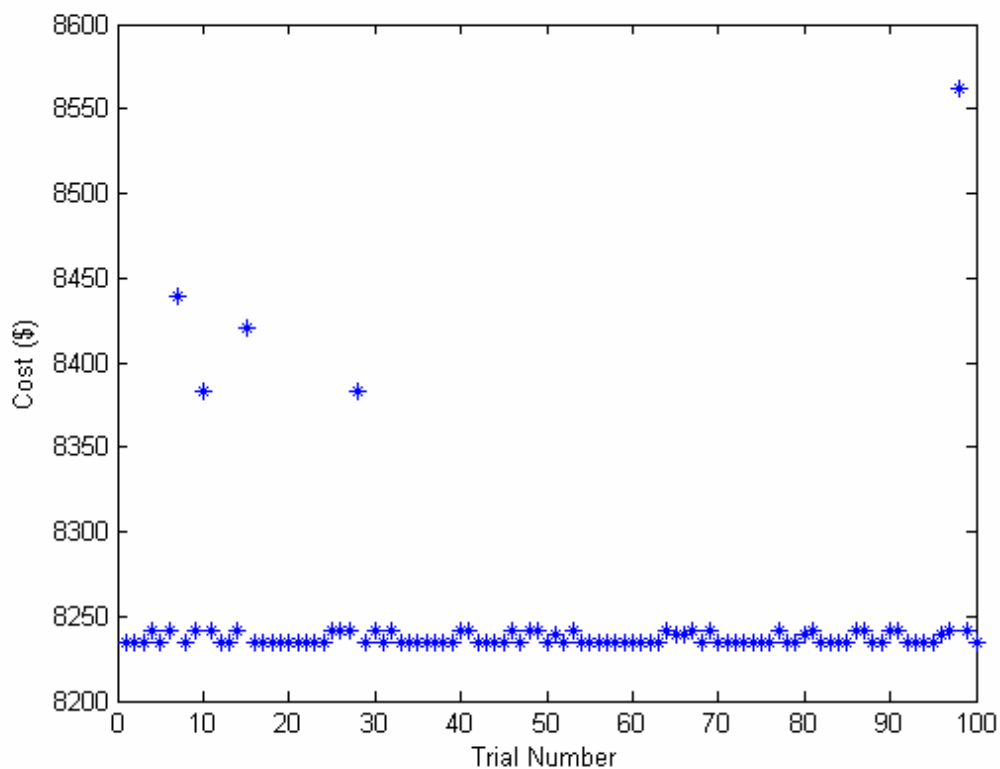
ภาพที่ 14 ตัวอย่างฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)
1	300.2669	3087.5099
2	400.0000	3767.1246
3	149.7331	1379.4372
รวม	850.0000	8234.0717
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (s)	1.203	



ภาพที่ 15 คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธี Hybrid PSO-SQP ที่มีจำนวนของอนุภาคแตกต่างกัน ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ



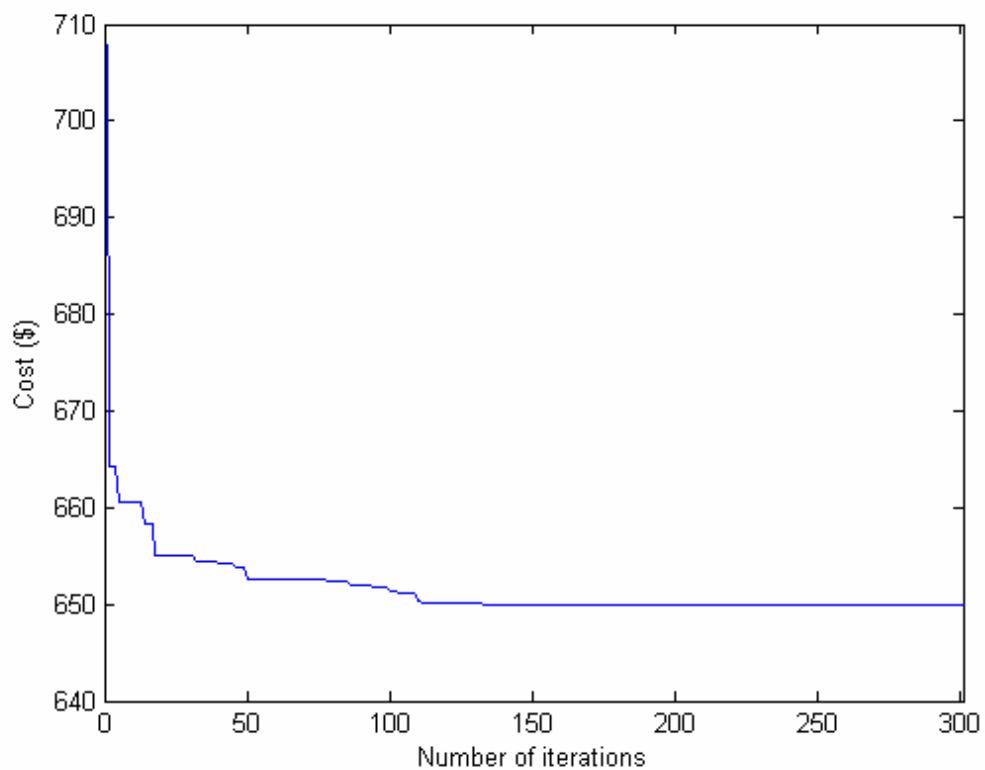
ภาพที่ 16 การกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง ของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดคว่ำ

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดคว่ำ

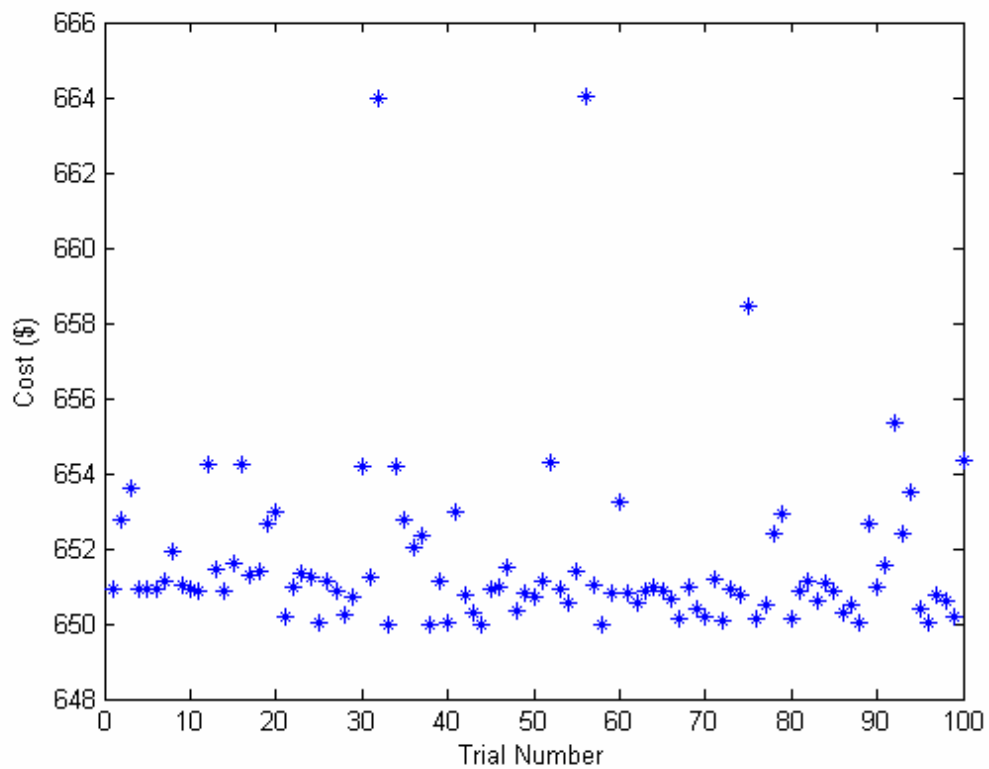
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)
1	214.9003	42.0646
2	215.6206	39.7659
3	291.7653	72.9082
4	265.0000	67.3989
5	293.0151	79.8681
6	212.1880	42.3286

ตารางที่ 6 (ต่อ)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)
7	299.5937	78.5944
8	265.0000	67.3989
9	354.7554	82.7794
10	288.1616	76.8442
รวม	2700.0000	649.9511
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (s)	5.907	



ภาพที่ 17 คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ



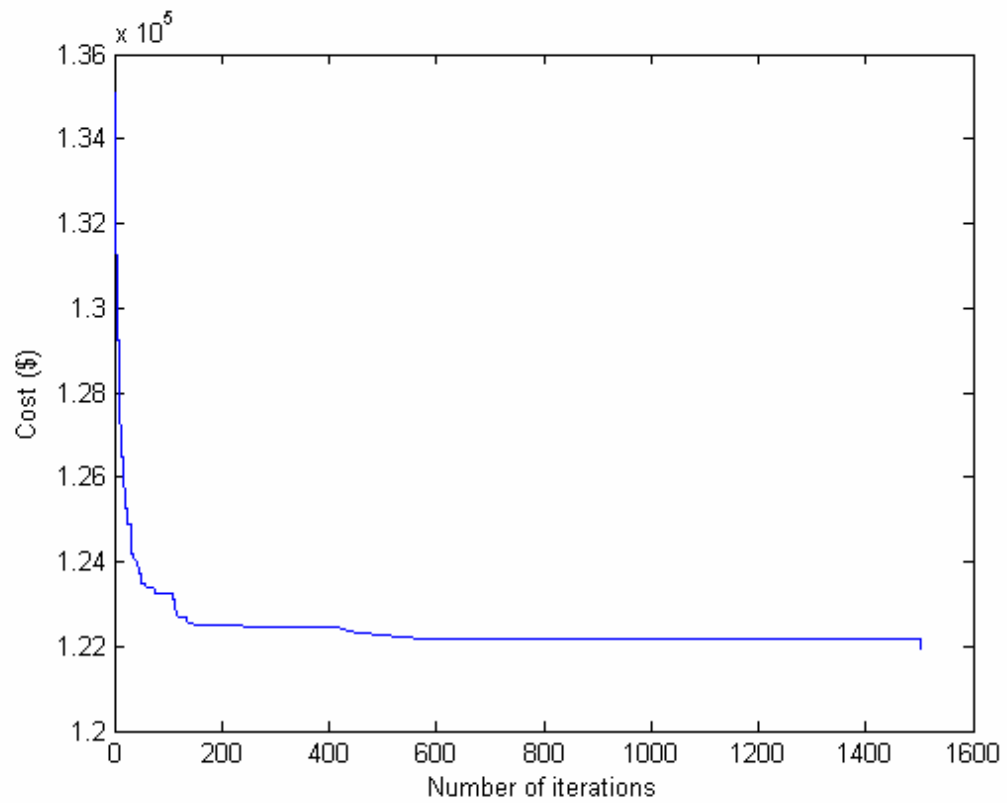
ภาพที่ 18 การกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง ของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดควาล์ว

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดควาล์ว

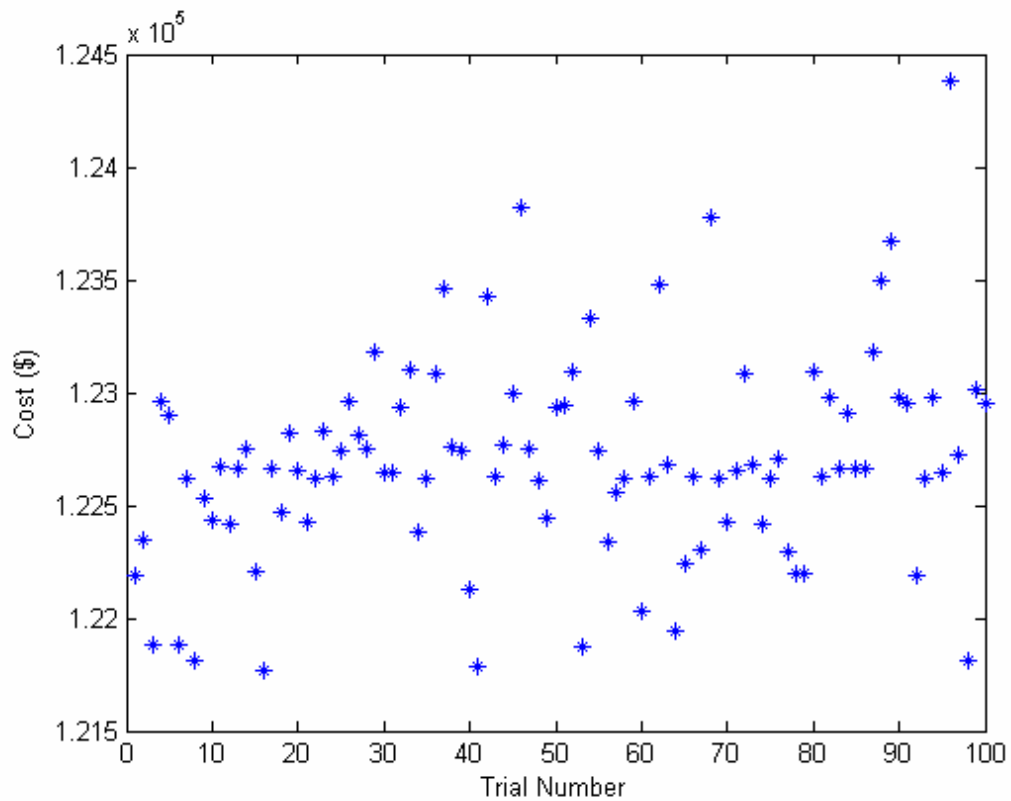
เครื่องกำเนิดที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)	เครื่องกำเนิดที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)
1	114.0000	978.1563	21	523.2758	5071.2924
2	114.0000	978.1563	22	542.8550	5453.1055
3	120.0000	1544.6534	23	523.4034	5059.7201
4	179.7833	2144.6054	24	523.4316	5060.2879
5	97.0000	853.1776	25	523.2887	5275.2798

ตารางที่ 7 (ต่อ)

เครื่องกำเนิดที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)	เครื่องกำเนิดที่	กำลังไฟฟ้า (MW)	ราคา (\$)
6	140.0000	1596.4643	26	523.3388	5276.3068
7	300.0000	3216.4240	27	10.0000	1140.5240
8	300.0000	3052.3095	28	10.0000	1140.5240
9	300.0000	3071.9895	29	10.0000	1140.5240
10	130.0000	2502.0650	30	97.0000	853.1776
11	94.0000	1893.3054	31	190.0000	1643.9913
12	94.0000	1908.1668	32	190.0000	1643.9913
13	125.0000	2541.6813	33	190.0000	1643.9913
14	394.2987	6415.3489	34	200.0000	2101.0170
15	304.5102	5171.1702	35	200.0000	2043.7270
16	394.2862	6436.7586	36	200.0000	2043.7270
17	489.2863	5296.8600	37	110.0000	1220.1661
18	489.3503	5290.2911	38	110.0000	1220.1661
19	511.2767	5540.9274	39	110.0000	1220.1661
20	511.3223	5541.8395	40	511.2927	5541.2181
กำลังไฟฟ้ารวม (MW) และราคารวม (\$)				10500.0000	121767.2544
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (s)				135.359	



ภาพที่ 19 คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ



ภาพที่ 20 การกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง ของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ ที่เคยมีการศึกษามาในอดีตในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำ

วิธี	เวลาเฉลี่ย (s)	เวลาที่ดีที่สุด (s)	ราคาเฉลี่ย (\$)	ราคาที่สูงที่สุด (\$)	ราคาต่ำที่สุด (\$)
GA	16	-	-	-	8237.6
CEP	20.46	18.35	8235.97	8241.83	8234.07
FEP	4.54	3.79	8234.24	8241.78	8234.07
MFEP	8.00	6.31	8234.71	8241.8	8234.08

ตารางที่ 8 (ต่อ)

วิธี	เวลาเฉลี่ย (s)	เวลาที่ดีที่สุด (s)	ราคาเฉลี่ย (\$)	ราคาที่สูงที่สุด (\$)	ราคาที่ดีที่สุด (\$)
IFEP	6.78	6.11	8234.16	8234.54	8234.07
IEP	-	-	-	-	8234.09
MPSO	-	-	-	-	8324.07
PSO-SQP	3.37	-	8234.07	-	8234.07
hybrid PSO-SQP	1.5158	1.1720	8246.5383	8562.4072	8234.0717

ตารางที่ 9 สรุปผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดคว่ำ

วิธี	เวลาเฉลี่ย (s)	เวลาที่ดีที่สุด (s)	ราคาเฉลี่ย (\$)	ราคาที่สูงที่สุด (\$)	ราคาที่ดีที่สุด (\$)
hybrid PSO-SQP	5.9731	4.906	651.6371	664.0351	649.9511

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ ที่เคยมีการศึกษามาในอดีตในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดคว่ำ

วิธี	เวลาเฉลี่ย (s)	เวลาที่ดีที่สุด (s)	ราคาเฉลี่ย (\$)	ราคาที่สูงที่สุด (\$)	ราคาที่ดีที่สุด (\$)
CEP	1956.93	1955.2	124793.48	126902.89	123488.29
FEP	1039.16	1037.9	124119.37	127245.59	122679.71
MFEP	2196.10	2194.7	123489.74	124356.47	122647.57
IFEP	1167.35	1165.70	123382.00	125740.63	122624.35
MPSO	-	-	-	-	122252.26

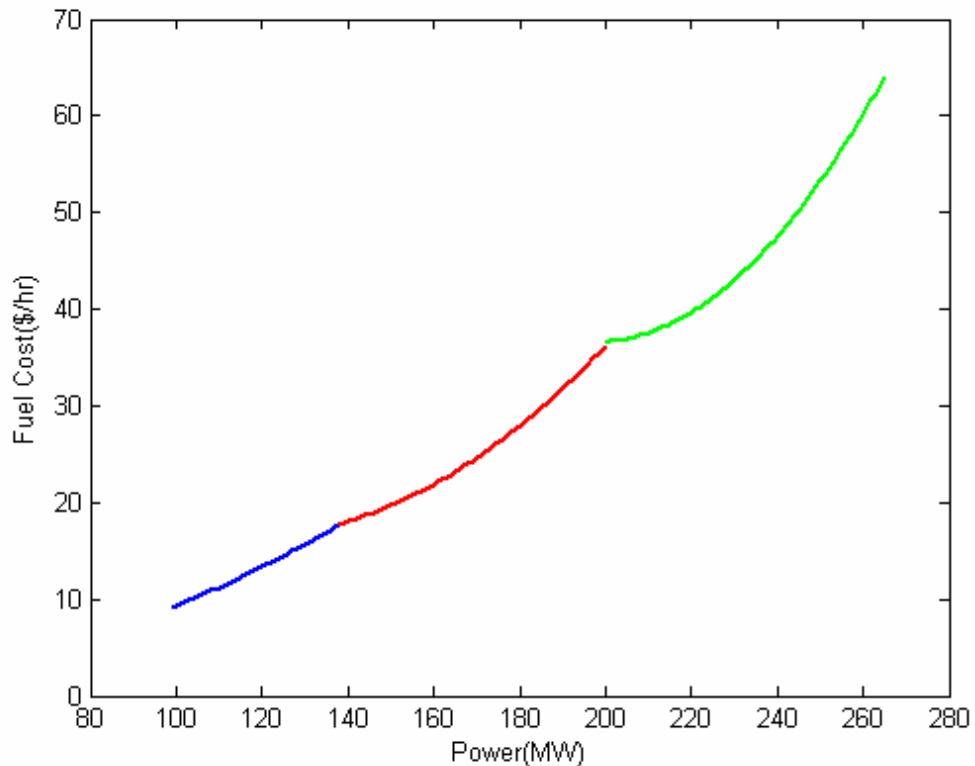
ตารางที่ 10 (ต่อ)

วิธี	เวลาเฉลี่ย (s)	เวลาที่ดีที่สุด (s)	ราคาเฉลี่ย (\$)	ราคาที่สูงที่สุด (\$)	ราคาต่ำที่สุด (\$)
PSO-SQP	733.97	-	122245.25	-	122094.67
hybrid PSO-SQP	135.81829	128.031	122694.8803	124377.2741	121767.2544

กรณี 3

ในกรณีนี้เป็นการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 21 โดยใช้ระบบทดสอบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ทดสอบกับข้างต้นดังต่อไปนี้คือ ขนาดของประชากรเป็น 10, ค่าน้ำหนักความเฉลี่ยเริ่มต้น (w_{max}) เป็น 0.5, ค่าน้ำหนักความเฉลี่ยสุดท้าย (w_{min}) เป็น 0.1, ค่าคงที่ความเร่ง (c_1, c_2) เป็น 2, จำนวนรอบการทำงานสูงสุดเป็น 300 และผลการทดสอบกับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง โดยความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบเป็น 2400 MW, 2500 MW, 2600 MW และ 2700 MW ได้แสดงไว้ในตารางที่ 11 โดยมีคุณลักษณะการหาค่าตอบที่ดีที่สุดและการกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้งของระบบทดสอบดังกล่าวได้แสดงไว้ในภาพที่ 22 และ 23 ตามลำดับ และสรุปผลการทดสอบของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ไว้ในตารางที่ 12 และในตารางที่ 13 ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ของวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ ที่มีการศึกษามาในอดีต ซึ่งได้แก่ วิธีการจัดระบบตามลำดับชั้น (Hierarchical Method, HM) (Lin and Viviani, 1984), วิธีโครงข่ายประสาทฮอปฟิลด์ (Hopfield Neural Network, HNN) (Park *et al.*, 1993), วิธีโครงข่ายประสาทฮอปฟิลด์ซึ่งปรับตัวได้ (Adaptive Hopfield Neural Network, AHNN) (Lee *et al.*, 1993), วิธีกระบวนการวิวัฒนาการที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น (Improved Evolutionary Programming, IEP) (Park *et al.*, 1998), วิธีวิวัฒนาการซึ่งมีความแตกต่างกัน (Differential Evolution, DE) (Perez-Guerrero and Cedeno-Maldonado, 2005), วิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคที่ถูกแก้ไข (Modified Particle Swarm Optimization, MPSO) (Park *et al.*, 2005), วิธีเจเนติกแบบธรรมดาที่มีการปรับตัวคูณ (Conventional Genetic Algorithm with Multiplier Updating, CGA_MU) (Chiang,

2005) และวิธีเจเนติกที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยการปรับตัวคูณ (Improved Genetic Algorithm with Multiplier Updating, IGA_MU) (Chiang, 2005)



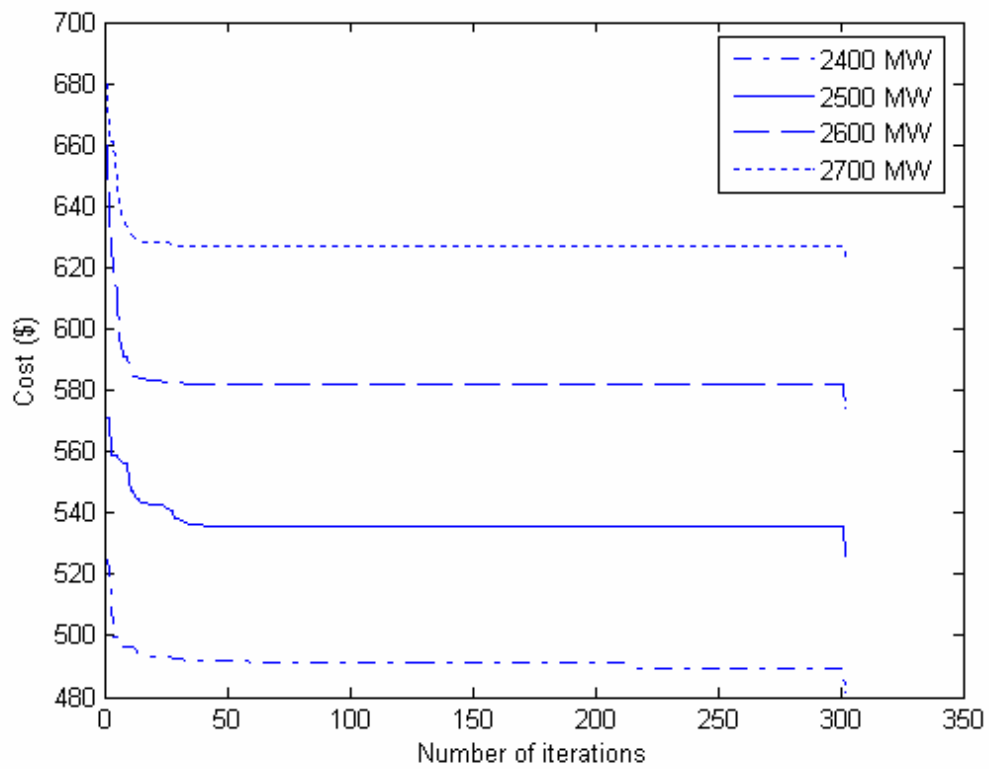
ภาพที่ 21 ตัวอย่างของฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน

ตารางที่ 11 ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน

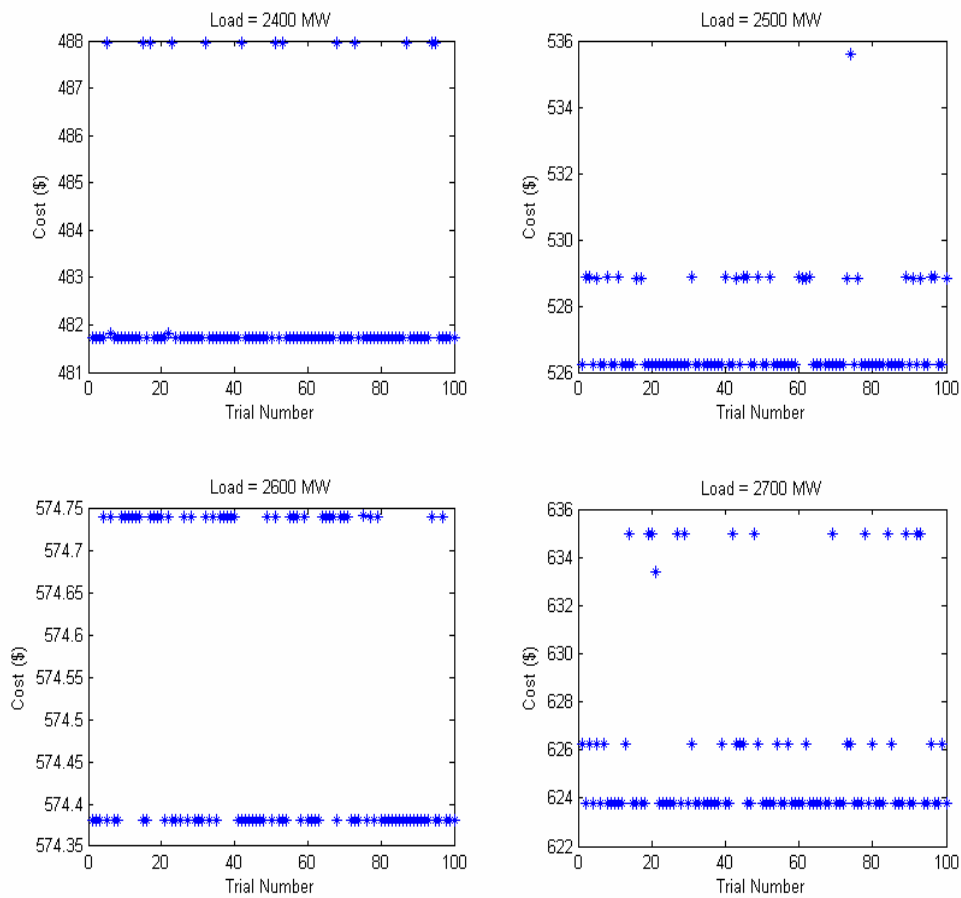
เครื่องกำเนิดที่	2400 MW		2500 MW		2600 MW		2700 MW	
	F	Gen.	F	Gen.	F	Gen.	F	Gen.
1	1	189.7401	2	206.5167	2	216.5151	2	218.2569
2	1	202.3428	1	206.4571	1	210.9072	1	211.6641
3	1	253.8967	1	265.7390	1	278.5460	1	280.7750

ตารางที่ 11 (ต่อ)

เครื่องกำเนิดที่	2400 MW		2500 MW		2600 MW		2700 MW	
	F	Gen.	F	Gen.	F	Gen.	F	Gen.
4	3	233.0455	3	235.9531	3	239.0945	3	239.6325
5	1	241.8301	1	258.0177	1	275.5258	1	278.5101
6	3	233.0454	3	235.9532	3	239.0967	3	239.6324
7	1	253.2743	1	268.8756	1	285.7134	1	288.5389
8	3	233.0454	3	235.9530	3	239.0965	3	239.6324
9	1	320.3773	1	331.4874	1	343.5083	3	428.5227
10	1	239.4023	1	255.0470	1	271.9863	1	274.8347
TP (MW)	2400.0000		2500.0000		2600.0000		2700.0000	
TC (\$)	481.7226		526.2387		574.3807		623.8090	
Time (S)	3.8910		4.047		4.297		3.906	



ภาพที่ 22 คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน



ภาพที่ 23 การกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง ของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน

ตารางที่ 12 สรุปผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน

ความต้องการกำลังไฟฟารวม (MW)	เวลาเฉลี่ย (s)	เวลาที่ต่ำที่สุด (s)	ราคาเฉลี่ย (\\$)	ราคาที่สูงที่สุด (\\$)	ราคาที่ต่ำที่สุด (\\$)
2400	3.7964	3.4070	482.5357	487.9647	481.7226

ตารางที่ 12 (ต่อ)

ความต้องการกำลังไฟฟารวม (MW)	เวลา เฉลี่ย (s)	เวลาที่ดี่ ที่สุด (s)	ราคา เฉลี่ย (\$)	ราคาที่สูง ที่สุด (\$)	ราคาที่ย่ำ ที่สุด (\$)
2500	3.8106	3.3910	527.0094	535.5997	526.2387
2600	3.8648	3.3750	574.5251	574.7418	574.3807
2700	3.8795	3.2970	625.8470	634.9853	623.8090

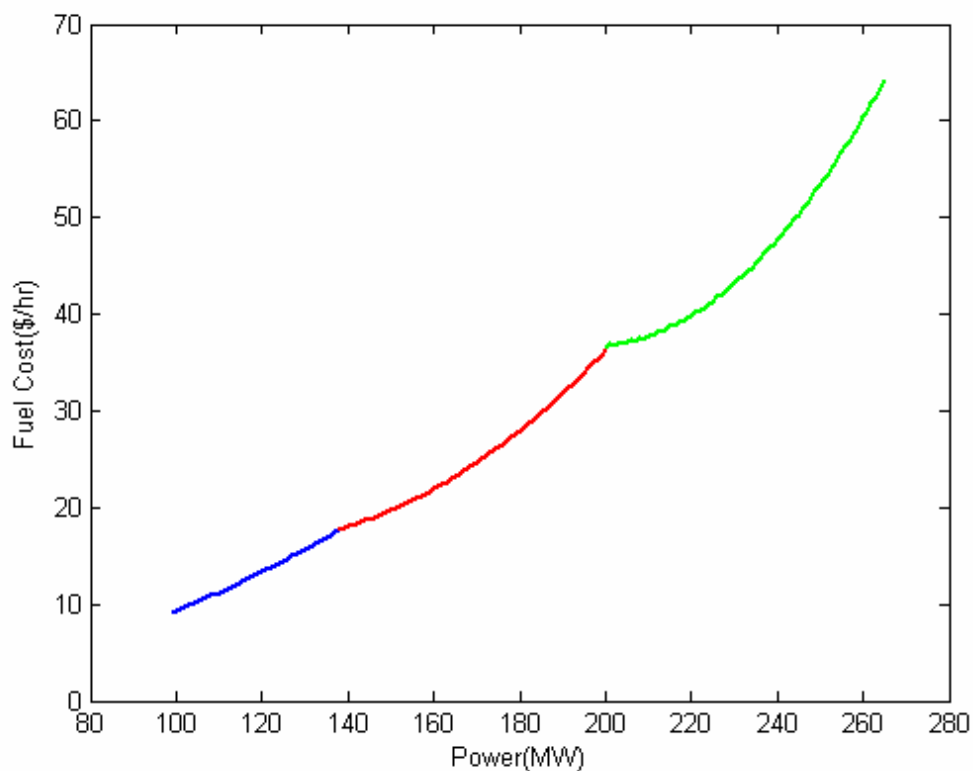
ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ ที่เคยมีการศึกษามาในอดีตในกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน

วิธี	ราคาที่ย่ำที่สุด (\$) ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าต่างๆ			
	2400 MW	2500 MW	2600 MW	2700 MW
HM*	488.50	526.70	574.03	625.18
HNN*	487.87	526.13	574.26	626.12
AHNN	481.70	526.23	574.37	626.24
IEP	481.779	526.304	574.473	623.851
DE	481.7	526.2	574.4	623.8
MPSO	481.723	526.239	574.381	623.809
CGA_MU	-	-	-	623.8095
IGA_MU	-	-	-	623.8093
Hybrid PSO-SQP	481.7226	526.2387	574.3807	623.8090

หมายเหตุ * ไม่สมบรูณ์ตามเงื่อนไขของการผลิตกำลังไฟฟ้าให้สมดุลกับความต้องการ

กรณี 4

ในกรณีนี้เป็นการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำวาล์ว ดังแสดงไว้ในภาพที่ 24 โดยใช้ระบบทดสอบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ทดสอบกับข้างต้นดังต่อไปนี้คือ ขนาดของประชากรเป็น 30, ค่าน้ำหนักความเฉื่อยเริ่มต้น (w_{max}) เป็น 0.5, ค่าน้ำหนักความเฉื่อยสุดท้าย (w_{min}) เป็น 0.1, ค่าคงที่ความเร่ง (c_1, c_2) เป็น 2, จำนวนรอบการทำงานสูงสุดเป็น 300 และผลการทดสอบกับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง โดยความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบเป็น 2700 MW ได้แสดงไว้ในตารางที่ 14 โดยมีคุณลักษณะการหาคำตอบที่ดีที่สุดและการกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้งของระบบทดสอบดังกล่าวได้แสดงไว้ในภาพที่ 25 และ 26 ตามลำดับ และสรุปผลการทดสอบของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ไว้ในตารางที่ 15 ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ของวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ ที่มีการศึกษาในอดีต ซึ่งได้แก่ วิธีเจเนติกแบบธรรมดาที่มีการปรับตัวคูณ (Conventional Genetic Algorithm with Multiplier Updating, CGA_MU) (Chiang, 2005) และวิธีเจเนติกที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยการปรับตัวคูณ (Improved Genetic Algorithm with Multiplier Updating, IGA_MU) (Chiang, 2005)



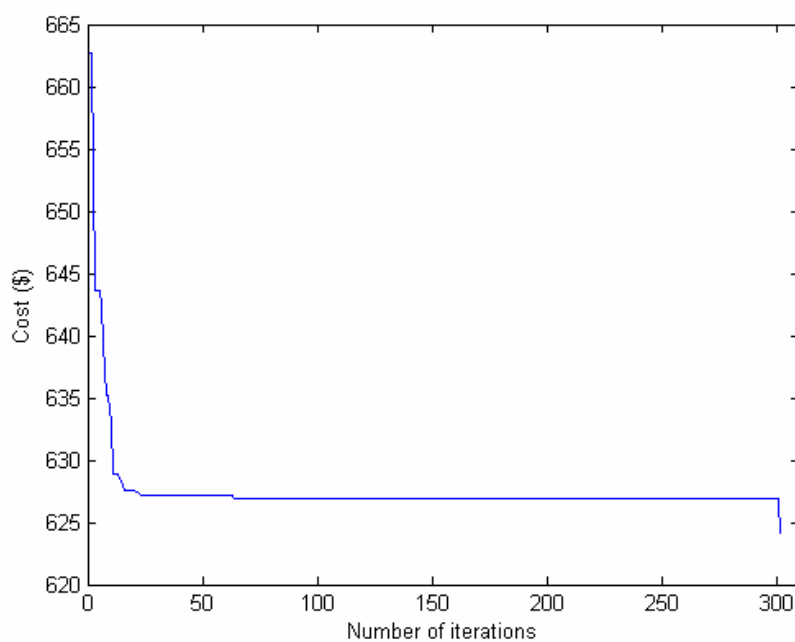
ภาพที่ 24 ตัวอย่างของฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดควาล์ว

ตารางที่ 14 ผลการคำนวณของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 4 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดควาล์ว

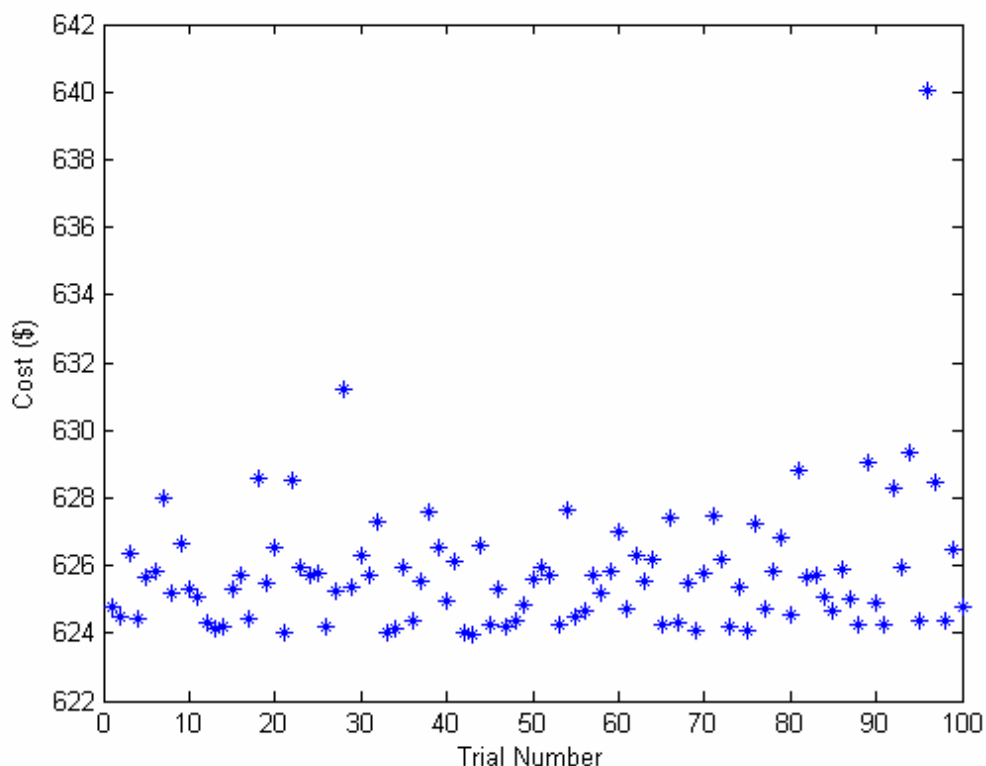
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่	วิธี Hybrid PSO_SQP	
	ชนิดของเชื้อเพลิง	กำลังไฟฟ้า (MW)
1	2	222.6986
2	1	211.7117
3	1	278.6385
4	3	241.3863
5	1	276.4596

ตารางที่ 14 (ต่อ)

เครื่องกำเนิดที่	วิธี Hybrid PSO_SQP	
	ชนิดของเชื้อเพลิง	กำลังไฟฟ้า (MW)
6	3	240.7144
7	1	291.8349
8	3	237.2208
9	3	428.2305
10	1	271.1048
กำลังไฟฟ้ารวม (MW)	2700.0000	
ราคารวม (\$)	623.9872	
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (s)	10.875	



ภาพที่ 25 คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 4 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบ เนื่องมาจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดควอด์



ภาพที่ 26 การกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง ของวิธี Hybrid PSO-SQP ในกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำ

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีต่างๆ ที่เคยมีการศึกษามาในอดีตในกรณี 4 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำ

วิธี	เวลาเฉลี่ย (s)	เวลาที่ดีที่สุด (s)	ราคาเฉลี่ย (\$)	ราคาที่สูงที่สุด (\$)	ราคาต่ำที่สุด (\$)
CGA_MU	26.6400	25.6500	627.6087	633.8652	624.7193
IGA_MU	7.3200	7.1400	625.8692	630.8705	624.5178
Hybrid PSO-SQP	10.4208	8.4840	625.8032	640.0163	623.9872

วิจารณ์

1. สำหรับฟังก์ชันราคาที่ยอมรับในกรณี 1 วิธี Hybrid PSO-SQP สามารถคำนวณการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องให้เพียงพอต่อความต้องการของระบบที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 ถึง 3 โดยไม่เกินขีดจำกัดของกำลังการผลิต
2. จากภาพที่ 11 ถึง 13 คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของวิธี Hybrid PSO-SQP มีลักษณะแตกต่างกันเมื่อสถานะเริ่มต้นแตกต่างกัน
3. จำนวนครั้งของการพบผลลัพธ์โดยรวมของวิธี Hybrid PSO-SQP ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบเป็น 250 MW ถึง 1200 MW โดยทำการเพิ่มทีละ 50 MW ซึ่งในแต่ละความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบได้ทำการทดสอบจำนวน 100 ครั้ง โดยเปรียบเทียบวิธี Hybrid PSO-SQP กับวิธีนิวตัน (NM) ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธี Hybrid PSO-SQP มีความเป็นไปได้สูงในการพบผลลัพธ์โดยรวมที่มีค่าเหมือนกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีนิวตัน (NM) ในทุกๆ ความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบ ซึ่งมีการทดสอบรวมทั้งหมด 2000 ครั้ง วิธีดังกล่าวสามารถพบผลลัพธ์โดยรวม 1975 ครั้ง ดังนั้นวิธีดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้ที่จะพบผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยรวมเป็นร้อยละ 98.75
4. สำหรับฟังก์ชันราคาที่ไม่ยอมรับเนื่องมาจากผลของจุดวาบวักในกรณี 2 วิธี Hybrid PSO-SQP สามารถคำนวณการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องให้เพียงพอต่อความต้องการของระบบที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5 ถึง 7 โดยไม่เกินขีดจำกัดของกำลังการผลิต
5. จากภาพที่ 15 เมื่อจำนวนอนุภาคในกลุ่มประชากรมีจำนวนมากขึ้นทำให้วิธี Hybrid PSO-SQP มีความสามารถในการลู่เข้าหาคำตอบได้เร็วยิ่งขึ้น
6. จากภาพที่ 17 และ 19 คุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของวิธี Hybrid PSO-SQP มีลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องจากขนาดของระบบที่ใช้ทดสอบ โดยที่ระบบทดสอบที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยจำนวนรอบในการทำงานที่น้อยกว่า

7. จากภาพที่ 16, 18 และ 20 การกระจายของคำตอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อระบบที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดใหญ่มากยิ่งขึ้นจะทำให้การกระจายของคำตอบมีมากขึ้น และเนื่องมาจากผลกระทบจากจุดคว่ำที่มีต่อฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงทำให้วิธี Hybrid PSO-SQP พบค่าคำตอบต่ำสุดเฉพาะที่อยู่หลายค่า ซึ่งปริมาณค่าคำตอบต่ำสุดเฉพาะที่นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของระบบที่ใช้ในการทดสอบ

8. จากตารางที่ 8 และ 10 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง และ 40 เครื่อง ที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของจุดคว่ำนั้น ได้มีการศึกษากับวิธีต่างๆ มาในอดีต เมื่อนำผลการทดสอบของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ที่ได้จากวิธี Hybrid PSO-SQP มาเปรียบเทียบกับวิธีเหล่านั้นจะเห็นได้ว่าวิธี Hybrid PSO-SQP สามารถพบผลลัพธ์โดยรวม (ราคาที่ต่ำที่สุด) ได้เช่นเดียวกับวิธี CEP, FEP, IFEP, MPSO และ PSO-SQP โดยที่วิธี Hybrid PSO-SQP ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และเมื่อนำผลการทดสอบของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ที่ได้จากวิธี Hybrid PSO-SQP มาเปรียบเทียบกับวิธีต่างๆ เหล่านั้นจะเห็นได้ว่าวิธี Hybrid PSO-SQP สามารถพบผลลัพธ์โดยรวม (ราคาที่ต่ำที่สุด) ที่มีค่าน้อยกว่าวิธีที่มีการศึกษามาในอดีต ซึ่งจะทำให้ทราบว่าผลลัพธ์โดยรวมที่ได้จากการทดสอบกับระบบดังกล่าว อาจจะไม่ใช่อผลลัพธ์โดยรวมที่แท้จริง

9. จากตารางที่ 8 ถึง 10 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับขนาดของระบบทดสอบ

10. สำหรับฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันในกรณี 3 วิธี Hybrid PSO-SQP สามารถคำนวณการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องให้เพียงพอต่อความต้องการของระบบที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 11 โดยไม่เกินขีดจำกัดของกำลังการผลิต

11. จากตารางที่ 13 จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากวิธี Hybrid PSO-SQP มีผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธี HM (ยกเว้นกรณีที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบเป็น 2600 MW), HNN และ IEP ในกรณีที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบเป็น 2700 MW ซึ่งผลที่ได้จากวิธี Hybrid PSO-SQP มีผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธี AHNN, CGA_MU และ IGA_MU และผลที่ได้จากวิธี Hybrid PSO-SQP มีผลลัพธ์เหมือนกับวิธี MPSO

12. สำหรับฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องมาจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำในกรณี 4 วิธี Hybrid PSO-SQP สามารถคำนวณการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องให้เพียงพอต่อความต้องการของระบบที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 14 โดยไม่เกินขีดจำกัดของกำลังการผลิต

13. จากตารางที่ 15 ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธี Hybrid PSO-SQP มีราคาเฉลี่ยและราคาต่ำที่สุดดีกว่าวิธี CGA_MU และ IGA_MU โดยที่เวลาที่ใช้ในการคำนวณมากกว่าวิธี IGA_MU เล็กน้อย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำ โดยใช่วิธี Hybrid PSO-SQP ในการแก้ปัญหา ซึ่งวิธี Hybrid PSO-SQP เป็นวิธีที่เกิดจากการรวมกันของวิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ (SQP) โดยวิธี Hybrid PSO-SQP นี้จะใช้วิธี PSO เป็นวิธีหาค่าที่เหมาะสมหลัก ในการหาบริเวณที่เหมาะสมที่สุด โดยรวมและใช้วิธี SQP ในการปรับค่าตอบที่ได้จากวิธี PSO ให้เป็นที่น่าพอใจเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนสุดท้าย และเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวิธี Hybrid PSO-SQP ต่อการแก้ปัญหาดังกล่าว จึงนำมาทดสอบกับระบบต่างๆ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กรณี โดยกรณี 1 และ 2 ทำการทดสอบกับ 3 ระบบที่แตกต่างกันประกอบไปด้วยระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง, 10 เครื่อง และ 40 เครื่อง ซึ่งกรณี 1 เป็นระบบที่ฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบ ส่วนกรณี 2 เป็นระบบที่ฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดคว่ำ และในกรณี 3 และ 4 ได้นำเฉพาะระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง มาทำการทดสอบ โดยกรณี 3 เป็นระบบที่ฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและกรณี 4 เป็นระบบที่ฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบทั้ง 4 กรณี แสดงให้เห็นว่าวิธี Hybrid PSO-SQP สามารถคำนวณการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องให้เพียงพอต่อความต้องการของระบบที่ใช้ในการทดสอบและไม่เกินขีดจำกัดของกำลังการผลิต ซึ่งทำให้ทราบว่าลักษณะรูปร่างของฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงไม่มีผลต่อการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของวิธี Hybrid PSO-SQP และวิธี Hybrid PSO-SQP มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 98.75 ในการพบผลลัพธ์โดยรวมสำหรับการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบ

สำหรับการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากผลของจุดคว่ำ วิธี Hybrid PSO-SQP สามารถพบผลลัพธ์โดยรวมได้เช่นเดียวกับวิธี CEP, FEP, IFEP, MPSO และ PSO-SQP สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง และ

สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง วิธี Hybrid PSO-SQP สามารถพบผลลัพธ์ที่ดูเหมือนจะเป็นผลลัพธ์โดยรวมที่ดีกว่าวิธีที่เคยมีการศึกษามาในอดีต

สำหรับการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบ เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงเชิงเฟล็งอย่างกะทันหัน วิธี Hybrid PSO-SQP มีผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธี HM (ยกเว้นกรณีที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบเป็น 2600 MW), HNN และ IEP โดยที่วิธี Hybrid PSO-SQP มีผลลัพธ์ที่เหมือนกันกับวิธี MPSO

และสำหรับการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบที่มีฟังก์ชันราคาที่ไม่ราบเรียบเนื่องจากทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงเชิงเฟล็งอย่างกะทันหันและจากจุดคว่ำ วิธี Hybrid PSO-SQP มีผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธี CGA_MU และ IGA_MU และผลที่ได้จากการทดสอบทำให้ทราบว่าขนาดของระบบที่ใช้ในการทดสอบและจำนวนของอนุภาคในกลุ่มประชากรมีผลต่อคุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบ, การกระจายของคำตอบและระยะเวลาในการคำนวณ

จากผลการทดสอบที่ได้ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าวิธี Hybrid PSO-SQP เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้ระยะเวลาในการคำนวณต่ำในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด โดยที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยไม่คำนึงถึงลักษณะรูปร่างของฟังก์ชันราคาที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมต่ำที่สุด

ข้อเสนอแนะ

การนำวิธี Hybrid PSO-SQP ไปใช้ในการแก้ปัญหาแบบอื่นๆ นั้นจะต้องทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าน้ำหนักความเฉื่อย, ค่าคงที่ความเร่ง, ขนาดประชากรและจำนวนรอบการทำงานสูงสุด ให้เหมาะสมกับปัญหา เพื่อให้วิธี Hybrid PSO-SQP มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบได้ดียิ่งขึ้น

ในอนาคตสามารถนำวิธี Hybrid PSO-SQP ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดแบบพลวัตที่มีเงื่อนไขขีดจำกัดของสายส่ง (transmission limits), เงื่อนไขขีดจำกัดของแรงดัน (voltage limits), เงื่อนไขความต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองของระบบ (spinning reserves), ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ramp rate), บริเวณการทำงานที่ถูกห้าม (prohibited operating zones) ฯลฯ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Attaviriyanupap, Pathom, Hiroyuki Kita, Eiichi Tanaka and Jun Hasegawa. 2002. A Hybrid EP and SQP for Dynamic Economic Dispatch with Nonsmooth Fuel Cost Function. **IEEE Trans. on Power Systems.** 17 (2): 411-416.
- Chiang, Chao-Lung. 2005. Improved Genetic Algorithm for Power Economic Dispatch of Units with Valve-Point Effects and Multiple Fuels. **IEEE Trans. on Power Systems.** 20 (4): 1690-1699.
- Eberhart, Russell C. and Yuhui Shi. 2001. Particle Swarm Optimization: Developments, Application and Resources. **IEEE.** : 81-86.
- Kennedy, J. and R. Eberhart. 1995. Particle Swarm Optimization. **Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks.** 4: 1942-1948.
- Lee, Kwang Y., Arthit Sode-Yome and June Ho Park. 1998. Adaptive Hopfield Neural Networks for Economic Load Dispatch. **IEEE Trans. on Power Systems.** 13 (2): 519-526.
- Lin, C. E. and G. L. Viviani. 1984. Hierarchical Economic Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Function. **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems.** 103 (6): 1170-1175.
- Nash, Stephen G. and Ariela Sofer. 1996. **Linear and Nonlinear Programming.** international edition. The McGraw-Hill Companies, Inc., Singapore.
- Park, Jong-Bae, Ki-Song Lee, Joong-Rin Shin and Kwang Y. Lee. 2005. A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Nonsmooth Cost Functions. **IEEE Trans. on Power Systems.** 20 (1): 34-42.

- Park, J. H., Y. S. Kim, I. K. Eom and K. Y. Lee. 1993. Economic Load Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Function using Hopfield Neural Network. **IEEE Trans. on Power Systems.** 8 (3): 1030-1038.
- Perez-Guerrero, Raul E. and Jose R. Cedenio-Maldonado. 2005. Economic Power Dispatch with Non-Smooth Cost Functions Using Differential Evolution. **IEEE.** : 183-190.
- Sinha, Nidul and B. Purkayastha. 2004. PSO Embedded Evolutionary Programming Technique for Non-convex Economic Load Dispatch. **IEEE.**
- Sinha, Nidul, R. Chakrabarti and P. K. Chattopadhyay. Evolutionary. 2003. Programming Techniques for Economic Load Dispatch. **IEEE Trans. on Evolutionary Computation.** 7 (1): 83-94.
- Sriyanyong, P., Y. H. Song and P. J. Turner. 2007. Particle Swarm Optimisation for Operational Planning: Unit Commitment and Economic Dispatch, pp. 313-347. *In* K. P. Dahal, K. C. Tan and P. I. Cowling, eds. **Evolutionary Scheduling**, Springer, New York.
- Victoire, T. Aruldoss Albert and A. Ebenezer Jeyakumar. 2004. Hybrid PSO–SQP for Economic Dispatch with Valve-Point Effect. **Electric Power System Research.** 71: 51-59.
- Wood, Allen J. and Bruce F. Wollenberg. 1996. **Power Generation, Operation, and Control.** second edition. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Walters, David C. and Gerald B. Sheble. 1993. Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading. **IEEE Trans. on Power Systems.** 8 (3): 1325-1332.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ

Unit	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)	a_i	b_i	c_i
1	100	600	561	7.92	0.001562
2	100	400	310	7.85	0.00194
3	50	200	78	7.97	0.00482

ตารางผนวกที่ 2 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ

Unit	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)	a_i	b_i	c_i
1	100	250	.2697e2	-.3975e0	.2176e-2
2	50	230	.1184e3	-.1269e1	.4194e-2
3	200	500	.3979e2	-.3116e0	.1457e-2
4	99	265	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2
5	190	490	.1392e2	-.8733e-1	.1066e-2
6	85	265	.5285e2	-.6348e0	.2758e-2
7	200	500	.1893e2	-.1325e0	.1107e-2
8	99	265	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2
9	130	440	.8853e2	-.5675e0	.1554e-2
10	200	490	.1397e2	-.9938e-1	.1102e-2

ตารางผนวกที่ 3 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 1 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่ราบเรียบ

Unit	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)	a_i	b_i	c_i
1	36	114	94.705	6.73	0.0069
2	36	114	94.705	6.73	0.0069
3	60	120	309.54	7.07	0.02028
4	80	190	369.03	8.18	0.00942
5	47	97	148.89	5.35	0.0114
6	68	140	222.33	8.05	0.01142
7	110	300	287.71	8.03	0.00357
8	135	300	391.98	6.99	0.00492
9	135	300	455.76	6.6	0.00573
10	130	300	722.82	12.9	0.00605
11	94	375	635.2	12.9	0.00515
12	94	375	654.69	12.8	0.00569
13	125	500	913.4	12.5	0.00421
14	125	500	1760.4	8.84	0.00752
15	125	500	1728.3	9.15	0.00708
16	125	500	1728.3	9.15	0.00708
17	220	500	647.85	7.97	0.00313
18	220	500	649.69	7.95	0.00313
19	242	550	647.83	7.97	0.00313
20	242	550	647.81	7.97	0.00313
21	254	550	785.96	6.63	0.00298
22	254	550	785.96	6.63	0.00298
23	254	550	794.53	6.66	0.00284
24	254	550	794.53	6.66	0.00284
25	254	550	801.32	7.1	0.00277

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

Unit	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)	a_i	b_i	c_i
26	254	550	801.32	7.1	0.00277
27	10	150	1055.1	3.33	0.52124
28	10	150	1055.1	3.33	0.52124
29	10	150	1055.1	3.33	0.52124
30	47	97	148.89	5.35	0.0114
31	60	190	222.92	6.43	0.0016
32	60	190	222.92	6.43	0.0016
33	60	190	222.92	6.43	0.0016
34	90	200	107.87	8.95	0.0001
35	90	200	116.58	8.62	0.0001
36	90	200	116.58	8.62	0.0001
37	25	110	307.45	5.88	0.0161
38	25	110	307.45	5.88	0.0161
39	25	110	307.45	5.88	0.0161
40	242	550	647.83	7.97	0.00313

ตารางผนวกที่ 4 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีผลจากจุดคว่ำ

Unit	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)	a_i	b_i	c_i	e_i	f_i
1	100	600	561	7.92	0.001562	300	0.0315
2	100	400	310	7.85	0.00194	200	0.042
3	50	200	78	7.97	0.00482	150	0.063

ที่มา: Walters and Sheble (1993)

ตารางผนวกที่ 5 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีผลจากจุดคว่ำ

Unit	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)	a_i	b_i	c_i	e_i	f_i
1	100	250	.2697e2	-.3975e0	.2176e-2	.2697e-1	-.3975e1
2	50	230	.1184e3	-.1269e1	.4194e-2	.1184e0	-.1269e2
3	200	500	.3979e2	-.3116e0	.1457e-2	-.3979e-1	-.3116e1
4	99	265	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2	.1983e-2	-.3114e0
5	190	490	.1392e2	-.8733e-1	.1066e-2	.1392e-1	-.8733e0
6	85	265	.5285e2	-.6348e0	.2758e-2	.5285e-1	-.6348e1
7	200	500	.1893e2	-.1325e0	.1107e-2	.1893e-1	-.1325e1
8	99	265	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2	.1983e-2	-.3114e0
9	130	440	.8853e2	-.5675e0	.1554e-2	.8853e-1	-.5675e1
10	200	490	.1397e2	-.9938e-1	.1102e-2	.1397e-1	-.9938e0

ตารางผนวกที่ 6 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 2 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 40 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีผลจากจุดคว่ำ

Unit	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)	a_i	b_i	c_i	e_i	f_i
1	36	114	94.705	6.73	0.0069	100	0.084
2	36	114	94.705	6.73	0.0069	100	0.084
3	60	120	309.54	7.07	0.02028	100	0.084
4	80	190	369.03	8.18	0.00942	150	0.063
5	47	97	148.89	5.35	0.0114	120	0.077
6	68	140	222.33	8.05	0.01142	100	0.084
7	110	300	287.71	8.03	0.00357	200	0.042
8	135	300	391.98	6.99	0.00492	200	0.042
9	135	300	455.76	6.6	0.00573	200	0.042
10	130	300	722.82	12.9	0.00605	200	0.042

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Unit	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)	a_i	b_i	c_i	e_i	f_i
11	94	375	635.2	12.9	0.00515	200	0.042
12	94	375	654.69	12.8	0.00569	200	0.042
13	125	500	913.4	12.5	0.00421	300	0.035
14	125	500	1760.4	8.84	0.00752	300	0.035
15	125	500	1728.3	9.15	0.00708	300	0.035
16	125	500	1728.3	9.15	0.00708	300	0.035
17	220	500	647.85	7.97	0.00313	300	0.035
18	220	500	649.69	7.95	0.00313	300	0.035
19	242	550	647.83	7.97	0.00313	300	0.035
20	242	550	647.81	7.97	0.00313	300	0.035
21	254	550	785.96	6.63	0.00298	300	0.035
22	254	550	785.96	6.63	0.00298	300	0.035
23	254	550	794.53	6.66	0.00284	300	0.035
24	254	550	794.53	6.66	0.00284	300	0.035
25	254	550	801.32	7.1	0.00277	300	0.035
26	254	550	801.32	7.1	0.00277	300	0.035
27	10	150	1055.1	3.33	0.52124	120	0.077
28	10	150	1055.1	3.33	0.52124	120	0.077
29	10	150	1055.1	3.33	0.52124	120	0.077
30	47	97	148.89	5.35	0.0114	120	0.077
31	60	190	222.92	6.43	0.0016	150	0.063
32	60	190	222.92	6.43	0.0016	150	0.063
33	60	190	222.92	6.43	0.0016	150	0.063
34	90	200	107.87	8.95	0.0001	200	0.042
35	90	200	116.58	8.62	0.0001	200	0.042
36	90	200	116.58	8.62	0.0001	200	0.042

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Unit	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)	a_i	b_i	c_i	e_i	f_i
37	25	110	307.45	5.88	0.0161	80	0.098
38	25	110	307.45	5.88	0.0161	80	0.098
39	25	110	307.45	5.88	0.0161	80	0.098
40	242	550	647.83	7.97	0.00313	300	0.035

ที่มา: Sinha *et al.* (2003); Park *et al.* (2005)

ตารางผนวกที่ 7 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 3 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหัน

Unit	Generation				Fuel type	Cost coefficients		
	Min F ₁	P ₁ F ₂	P ₂ F ₃	Max		a_i	b_i	c_i
1	100	196		250	1	.2697e2	-.3975e0	.2176e-2
		1	2		2	.2113e2	-.3059e0	.1861e-2
2	50	114	157	230	1	.1184e3	-.1269e1	.4194e-2
		2	3	1	2	.1865e1	-.3988e-1	.1138e-2
					3	.1365e2	-.1980e0	.1620e-2
3	200	332	388	500	1	.3979e2	-.3116e0	.1457e-2
		1	3	2	2	-.5914e2	.4864e0	.1176e-4
					3	-.2875e1	.3389e-1	.8035e-3
4	99	138	200	265	1	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2
		1	2	3	2	.5285e2	-.6348e0	.2758e-2
					3	.2668e3	-.2338e1	.5935e-2

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Unit	Generation				Fuel type	Cost coefficients		
	Min	P ₁	P ₂	Max		a _i	b _i	c _i
	F ₁	F ₂	F ₃					
5	190	338	407	490	1	.1392e2	-.8733e-1	.1066e-2
	1	2	3		2	.9976e2	-.5206e0	.1597e-2
					3	-.5399e2	.4462e0	.1498e-3
6	85	138	200	265	1	.5285e2	-.6348e0	.2758e-2
	2	1	3		2	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2
					3	.2668e3	-.2338e1	.5935e-2
7	200	331	391	500	1	.1893e2	-.1325e0	.1107e-2
	1	2	3		2	.4377e2	-.2267e0	.1165e-2
					3	-.4335e2	.3559e0	.2454e-3
8	99	138	200	265	1	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2
	1	2	3		2	.5285e2	-.6348e0	.2758e-2
					3	.2668e3	-.2338e1	.5935e-2
9	130	213	370	440	1	.8853e2	-.5675e0	.1554e-2
	3	1	3		2	.1530e2	-.4514e-1	.7033e-2
					3	.1423e2	-.1817e-1	.6121e-3
10	200	362	407	490	1	.1397e2	-.9938e-1	.1102e-2
	1	3	2		2	-.6113e2	.5084e0	.4164e-4
					3	.4671e2	-.2024e0	.1137e-2

ที่มา: Lin and Viviani (1984)

ตารางผนวกที่ 8 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณี 4 สำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง ซึ่งมีฟังก์ชันราคาค่าเชื้อเพลิงที่มีทั้งผลจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงอย่างกะทันหันและผลจากจุดคว่ำ

U	Generation				F	Cost coefficients				
	Min F ₁	P ₁ F ₂	P ₂ F ₃	Max		a _i	b _i	c _i	e _i	f _i
1	100	196	250	1	.2697e2	-.3975e0	.2176e-2	.2697e-1	-.3975e1	
		1			2	.2113e2	-.3059e0	.1861e-2	.2113e-1	-.3059e1
2	50	114	157	230	1	.1184e3	-.1269e1	.4194e-2	.1184e0	-.1269e2
		2	3	1	2	.1865e1	-.3988e-1	.1138e-2	.1865e-2	-.3988e0
					3	.1365e2	-.1980e0	.1620e-2	.1365e-1	-.1980e1
3	200	332	388	500	1	.3979e2	-.3116e0	.1457e-2	-.3979e-1	-.3116e1
		1	3	2	2	-.5914e2	.4864e0	.1176e-4	-.5914e-1	.4864e1
					3	-.2875e1	.3389e-1	.8035e-3	-.2876e-2	.3389e0
4	99	138	200	265	1	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2	.1983e-2	-.3114e0
		1	2	3	2	.5285e2	-.6348e0	.2758e-2	.5285e-1	-.6348e1
					3	.2668e3	-.2338e1	.5935e-2	.2668e0	-.2338e2
5	190	338	407	490	1	.1392e2	-.8733e-1	.1066e-2	.1392e-1	-.8733e0
		1	2	3	2	.9976e2	-.5206e0	.1597e-2	.9976e-1	-.5206e1
					3	-.5399e2	.4462e0	.1498e-3	-.5399e-1	.4462e1
6	85	138	200	265	1	.5285e2	-.6348e0	.2758e-2	.5285e-1	-.6348e1
		2	1	3	2	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2	.1983e-2	-.3114e0
					3	.2668e3	-.2338e1	.5935e-2	.2668e0	-.2338e2
7	200	331	391	500	1	.1893e2	-.1325e0	.1107e-2	.1893e-1	-.1325e1
		1	2	3	2	.4377e2	-.2267e0	.1165e-2	.4377e-1	-.2267e1
					3	-.4335e2	.3559e0	.2454e-3	-.4335e-1	.3559e1
8	99	138	200	265	1	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2	.1983e-2	-.3114e0
		1	2	3	2	.5285e2	-.6348e0	.2758e-2	.5285e-1	-.6348e1
					3	.2668e3	-.2338e1	.5935e-2	.2668e0	-.2338e2
9	130	213	370	440	1	.8853e2	-.5675e0	.1554e-2	.8853e-1	-.5675e1
		3	1	3	2	.1530e2	-.4514e-1	.7033e-2	.1423e-1	-.1817e0
					3	.1423e2	-.1817e-1	.6121e-3	.1423e-1	-.1817e0
10	200	362	407	490	1	.1397e2	-.9938e-1	.1102e-2	.1397e-1	-.9938e0
		1	3	2	2	-.6113e2	.5084e0	.4164e-4	-.6113e-1	.5084e1
					3	.4671e2	-.2024e0	.1137e-2	-.4671e-1	-.2024e1

ที่มา: Chiang (2005)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาววิลาสินี ศึกษาการ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 19 ธันวาคม 2526
สถานที่เกิด	อุดรธานี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 2 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-