

การประยุกต์ใช้การค้นหาคความบรรสานในการแก้ปัญหาคการไหล
ของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด

นางสาวน้ำเพชร สิ้นสุพรรณ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

APPLICATION OF HARMONY SEARCH IN OPTIMAL POWER FLOW SOLUTION



Numphetch Sinsuphun

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2011

การประยุกต์ใช้การค้นหาคำความบรรณในการแก้ปัญหาการไหล ของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.ชนัดชัย กุลารวานิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นำเพชร สินสุพรรณ : การประยุกต์ใช้การค้นหาคความบรรสานในการแก้ปัญหาการไหล
ของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (APPLICATION OF HARMONY SEARCH IN
OPTIMAL POWER FLOW SOLUTION) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์, 275 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้การค้นหาคความ
บรรสาน (Harmony Search : HS) การค้นหาคความบรรสานนี้เป็นหนึ่งในวิธีการเมตาฮิวริสติก
ที่ได้รับแรงบัลดาลใจมาจากการเรียบเรียงทำนองเพลงของนักดนตรีที่พัฒนาขึ้นโดยจิม
ในปี ค.ศ. 2001 วิธีการที่นำเสนอถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ
ไม่เชิงเส้นที่เรียกว่า ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด วิธีการนี้ได้รับการทดสอบกับ
ระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE จำนวนทั้งสิ้น 5 ระบบ (ระบบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส
และ 118 บัส) ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (นครราชสีมา 2)
และ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตภาคกลางตอนบนรวมกับภาคตะวันตก
ของประเทศไทย การทดสอบแบ่งออกเป็นการใช้ฟังก์ชันเชื้อเพลิงแบบราบเรียบ
แบบไม่ราบเรียบ และฟังก์ชันกำลังงานสูญเสีย ผลการจำลองได้นำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์
ที่ได้จากวิธีคล้ายนิวตัน (Quasi Newton Methods หรือ BFGS) หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าวิธี
กำหนดการลำดับกำลังสอง (Sequential Quadratic Programming) วิธีจินเนติกอัลกอริทึม
(Genetic Algorithms) วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization)
จากผลการทดสอบพบว่าวิธีการค้นหาคความบรรสานได้รับการยืนยันและยอมรับในด้าน
ประสิทธิภาพการค้นหาคผลเฉลย

NUMPHETCH SINSUPHUN : APPLICATION OF HARMONY SEARCH

IN OPTIMAL POWER FLOW SOLUTION. THESIS ADVISOR :

ASSOC. PROF. THANATCHAI KULWORAWANICHPONG, Ph.D., 275 PP.

HARMONY SEARCH/FUEL COST/OPTIMAL POWER FLOW/

REAL POWER/REACTIVE POWER

This thesis presents optimal power flow solution by using harmony search method. The harmony search method is one of meta-heuristic search methods inspired by the improvisation of musicians developed by Z.W. Geem in 2001. The proposed method is employed in order to solve non-linearly constrained optimization problems, so-called optimal power flow problems. It was challenged with five standard IEEE test systems (6-bus, 14-bus, 30-bus, 57-bus and 118-bus test systems), 115-kV power transmission system of Provincial Electric Authority of Thailand (Nakhon Ratchasima 2), and power transmission system of Electric Generating Authority of Thailand (Combination of Upper Central and Western Regions of Thailand). The tests were divided into smooth, non-smooth fuel-cost cases and power loss minimization case. The comparisons among solutions obtained by quasi newton methods (BFGS) or sequential quadratic programming (SQP), genetic algorithms (GA), particle swarm optimization (PSO) and the proposed method were conducted. As revealed from the simulated results, the effectiveness of the proposed method for solving OPF problems was confirmed and accepted.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลรวรานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณนางสาวสุกิสรา กิมรัมย์ เพื่อนที่ช่วยตรวจทานคำคิดและรูปแบบการจัดพิมพ์เล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ เรียบร้อยสวยงาม

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความหวังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและท้อแท้ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

น้ำเพชร สิ้นสุพรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	4
2 ปรัชสน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ปรัชสน์วรรณกรรม	6
2.2.1 ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal power flow of problem).....	6
2.2.2 วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน (Harmony Search).....	9
2.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด	10
2.4 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า	11
2.4.1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	17
2.5 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน.....	25
2.6 ปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ.....	25
2.7 ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด	26
2.8 สรุป.....	26
3 การไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุด	27
3.1 บทนำ.....	27
3.2 การจ่ายโหลดอย่างประหยัด	27
3.2.1 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยไม่รวมผลการสูญเสีย และไม่รวมขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	28
3.2.2 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมขีดจำกัดของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ไม่รวมผลของการสูญเสีย	29
3.2.3 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมผลของการสูญเสีย	29
3.3 การจัดสรรกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ.....	29
3.4 รูปแบบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุด	30
3.4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	30
3.4.2 เงื่อนไขบังคับสมการ	33
3.4.3 เงื่อนไขบังคับอสมการ	34
3.4.4 วิธีการปรับโทษ	35
3.5 สรุป	35
4 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด.....	37
4.1 บทนำ.....	37
4.2 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีกลัยนิวตัน.....	37
4.3 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม	39
4.4 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีฝูงอนุภาค	42
4.5 สรุป.....	44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	วิธีการค้นหาความบรรสาน.....	45
5.1	บทนำ.....	45
5.2	โครงสร้างของวิธีการค้นหาความบรรสาน	45
5.2.1	ประวัติความเป็นมาของดนตรี.....	45
5.2.2	ยุคของดนตรี.....	46
5.3	การประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาความบรรสาน	53
5.4	ผลการจำลอง	60
5.5	สรุป	70
6	ผลการทดสอบ	71
6.1	บทนำ.....	71
6.2	การเปรียบเทียบค่าต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ (Smooth Quadratic Function)	71
6.2.1	ระบบทดสอบ 6 บั๊ต	72
6.2.2	ระบบทดสอบ 14 บั๊ต	74
6.2.3	ระบบทดสอบ 30 บั๊ต	77
6.2.4	ระบบทดสอบ 57 บั๊ต	80
6.2.5	ระบบทดสอบ 118 บั๊ต	84
6.2.6	การจ่ายโหลดอย่างประหยัคของระบบทดสอบการไฟฟ้า ฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 169 บั๊ต	89
6.3	การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ (Non-Smooth Valve Point Loading Function).....	93
6.3.1	ระบบทดสอบ 6 บั๊ต	94
6.3.2	ระบบทดสอบ 14 บั๊ต	96
6.3.3	ระบบทดสอบ 30 บั๊ต	99
6.4	การเปรียบเทียบค่ากำลังงานสูญเสียในระบบโดยใช้วิธี BFGS PSO GA และ HS.....	102

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.4.1 กรณีที่ 1.....	102
6.4.2 กรณีที่ 2.....	104
6.4.3 กรณีที่ 3.....	107
6.4.4 กรณีที่ 4.....	109
6.4.5 กรณีที่ 5.....	112
6.4.6 กรณีที่ 6.....	115
6.5 สรุป	117
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	119
7.1 สรุป	119
7.2 ข้อเสนอแนะ	130
รายการอ้างอิง	131
ภาคผนวก.....	133
ภาคผนวก ก. MATLAB และ Histogram ของการแจกแจงปกติ.....	133
ภาคผนวก ข. ระบบทดสอบ.....	152
ภาคผนวก ค. ผลการจำลอง.....	232
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	251
ประวัติผู้เขียน	275

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1	เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์วิธีค้นหาความบรรสานกับการหาค่าเหมาะที่สุด 50
5.2	การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาความบรรสาน 60
5.3	ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของแต่ละวิธีให้เหมือนกัน 61
5.4	เปรียบเทียบผลการจำลองของ Bohachevsky's function แต่ละวิธี 63
5.5	เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ Bohachevsky's function แต่ละวิธี 63
5.6	เปรียบเทียบผลการจำลองของ Circle function แต่ละวิธี 65
5.7	เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ Circle function แต่ละวิธี 65
5.8	เปรียบเทียบผลการจำลองของ Quadratic function แต่ละวิธี 67
5.9	เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ Quadratic function แต่ละวิธี 68
5.10	เปรียบเทียบผลการจำลองของ Rosenbrock function แต่ละวิธี 69
5.11	เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ Rosenbrock function แต่ละวิธี 70
6.1	เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 6 บัส 73
6.2	เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 14 บัส 76
6.3	เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 30 บัส 79
6.4	เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 57 บัส 82
6.5	เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 118 บัส 87
6.6	เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส 92
6.7	เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 6 บัส 95
6.8	เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 14 บัส 98
6.9	เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 30 บัส 100
6.10	กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีที่ 1 103
6.11	กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีที่ 2 106
6.12	กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีที่ 3 108
6.13	กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีที่ 4 111
6.14	กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีที่ 5 114

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.15	กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีที่ 6 116
7.1	จำนวนรอบที่ผู้เข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธี..... 122
7.2	สรุปการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตและ กำลังงานสูญเสียของแต่ละวิธี 123
7.3	สรุปการเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตและ กำลังงานสูญเสียของแต่ละวิธี 125
7.4	สรุปการเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตและ กำลังงานสูญเสียของแต่ละวิธี 127
ข.1	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 6 บัส..... 153
ข.2	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 6 บัส..... 153
ข.3	ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ..... 154
ข.4	ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดคว่ำหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ 154
ข.5	ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 6 บัส 154
ข.6	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 14 บัส..... 155
ข.7	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 14 บัส..... 155
ข.8	ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ..... 156
ข.9	ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดคว่ำหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ 157
ข.10	ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 14 บัส 157
ข.11	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 30 บัส..... 158
ข.12	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 30 บัส..... 159
ข.13	ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ..... 161

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.14 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดควาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ	162
ข.15 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 30 บัส	162
ข.16 ข้อมูลบัสดของระบบทดสอบ 57 บัส.....	163
ข.17 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 57 บัส.....	166
ข.18 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 57 บัส โดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ.....	169
ข.19 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 57 บัส	170
ข.20 ข้อมูลบัสดของระบบทดสอบ 118 บัส.....	171
ข.21 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส.....	177
ข.22 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 118 บัส โดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ.....	184
ข.23 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 118 บัส	187
ข.24 ชื่อบัสดของระบบทดสอบ 169 บัส	192
ข.25 ข้อมูลบัสดของระบบทดสอบ 169 บัส.....	200
ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส.....	207
ข.27 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 169 บัส โดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ.....	218
ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส	218
ข.29 ข้อมูลบัสดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2.....	230
ข.30 ข้อมูลสายส่งของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2.....	231
ค.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ของระบบ 6 บัส.....	233
ค.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีการค้นหาความบรรสาน (HS) ของระบบ 6 บัส	233
ค.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ของระบบ 6 บัส	233
ค.4 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 6 บัส.....	233

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ของระบบ 169 บัส.....	234
ค.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีการค้นหาความบรรสาน (HS) ของระบบ 169 บัส.....	234
ค.7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ของระบบ 169 บัส	234
ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส.....	235
ค.9 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ของระบบ 6 บัส.....	246
ค.10 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีการค้นหาความบรรสาน (HS) ของระบบ 6 บัส	247
ค.11 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ของระบบ 6 บัส	247
ค.12 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 6 บัส.....	247
ค.13 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ของกรณีที่ 1	248
ค.14 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีการค้นหาความบรรสาน (HS) ของกรณีที่ 1	248
ค.15 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ของกรณีที่ 1	248
ค.16 ผลการจำลองก่อนการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของกรณีที่ 1	248
ค.17 ผลการจำลองหลังการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของกรณีที่ 1	248
ค.18 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัส.....	250

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น 12
2.2	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล 17
2.3	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน 24
3.1	แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังกรณีไม่พิจารณาการสูญเสียของระบบ 28
3.2	เปรียบเทียบค่าเชื้อเพลิงของสมการกำลังสองกับสมการจุดเปิดควาล์วหลายจุด 32
4.1	แผนผังการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรม 41
4.2	แผนผังการทำงานของวิธีฝูงอนุภาค 43
5.1	เปรียบเทียบระหว่างความบรรสานและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด 49
5.2	แผนผังการทำงานของความบรรสาน 51
5.3	$x \in$ ตัวโน้ตที่สนใจ $= \{C4, E4, C4, G4, C4\}$ 52
5.4	$x + or x -, x \in$ ตัวโน้ตที่สนใจ 52
5.5	$x \in$ ขอบเขตการเล่น $= \{E3, F3, G3, A3, B3, C4, D4, E4, F4, G4, A4, B4, C5, D6, E6, F6, G6, A6, B6, C7\}$ 53
5.6	แผนผังการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด 57
5.7	แผนภาพการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน 58
5.8	กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธี 61
5.9	กราฟคอนทัวร์ 3 มิติของ Bohachevsky's function 62
5.10	กราฟคอนทัวร์ 3 มิติของ Circle function 64
5.11	กราฟคอนทัวร์ 3 มิติของ Quadratic function 67
5.12	กราฟคอนทัวร์ 3 มิติของ Rosenbrock function 69
6.1	ระบบทดสอบ 6 บัส 72
6.2	เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 6 บัส 73
6.3	กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 6 บัส 74
6.4	ระบบทดสอบ 14 บัส 75
6.5	เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 14 บัส 75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.6 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 14 บัส	77
6.7 ระบบทดสอบ 30 บัส	78
6.8 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 30 บัส	79
6.9 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 30 บัส	80
6.10 ระบบทดสอบ 57 บัส	81
6.11 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 57 บัส	82
6.12 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 57 บัส	83
6.13 ระบบทดสอบ 118 บัส	85
6.14 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 118 บัส	86
6.15 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 118 บัส	88
6.16 ระบบทดสอบ 169 บัส (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย).....	90
6.17 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 169 บัส	91
6.18 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 169 บัส	93
6.19 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 6 บัส	94
6.20 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 6 บัส	96
6.21 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 14 บัส	97
6.22 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 14 บัส	99
6.23 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 30 บัส	100
6.24 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 30 บัส	101
6.25 ระบบทดสอบ 9 บัส (115 kV นม.2)	102
6.26 เปรียบเทียบแรงดันบัสทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและ แรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณีที่ 1	103
6.27 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในกรณีที่ 1	104
6.28 เปรียบเทียบแรงดันบัสทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและ แรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณีที่ 2	105
6.29 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในกรณีที่ 2	107

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.30 เปรียบเทียบแรงดันบัลทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและ แรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณีที่ 3	108
6.31 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในกรณีที่ 3	109
6.32 เปรียบเทียบแรงดันบัลทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและ แรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณีที่ 4	110
6.33 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในกรณีที่ 4	112
6.34 เปรียบเทียบแรงดันบัลทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและ แรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณีที่ 5	113
6.35 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในกรณีที่ 5	114
6.36 เปรียบเทียบแรงดันบัลทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและ แรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณีที่ 6	115
6.37 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในกรณีที่ 6	117
7.1 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ของระบบทดสอบ 6 บัสแบบราบเรียบ	121
7.2 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ของระบบทดสอบ 57 บัสแบบราบเรียบ	121
ก.1 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ของระบบทดสอบ 6 บัสแบบไม่ราบเรียบ	145
ก.2 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ของระบบทดสอบ 14 บัสแบบราบเรียบ	146
ก.3 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ของระบบทดสอบ 14 บัสแบบไม่ราบเรียบ	147
ก.4 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ของระบบทดสอบ 30 บัสแบบราบเรียบ	148
ก.5 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ของระบบทดสอบ 30 บัสแบบไม่ราบเรียบ	149

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

ก.6	ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ของระบบทดสอบ 118 บัสแบบราบเรียบ	150
ก.7	ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ของระบบทดสอบ 169 บัสแบบราบเรียบ	151



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$I_{D,k}$	=	โหลดกระแสไฟฟ้าที่บัส k
$P_{cal,k}$	=	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่คำนวณได้ที่บัส k
$P_{mis,max}$	=	ความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟสูงสุดที่ยอมรับได้
P	=	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ
ΔP_k	=	ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่บัส k
Q	=	กำลังไฟฟารีแอกทีฟ
$Q_{cal,k}$	=	กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่คำนวณได้ที่บัส k
$Q_{mis,max}$	=	ความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟารีแอกทีฟสูงสุดที่ยอมรับได้
ΔQ_k	=	ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัส k
$S_{D,k}$	=	กำลังไฟฟ้าที่โหลดที่บัส k
$S_{G,k}$	=	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส k
$S_{sch,k}$	=	กำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดที่บัส k
V_k	=	แรงดันไฟฟ้าที่บัส k
$\Delta V $	=	ผลต่างของขนาดแรงดันที่บัส
$y_{k,i}$	=	แอดมิตแตนซ์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส k และบัส i
$Y_{k,i}$	=	สมาชิกแถวที่ k หลักที่ i ของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
Y_{bus}	=	บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
α	=	ดัชนีระบุตำแหน่งบัสเสริมในสายส่งมีค่าในช่วง 0 – 1.0
$\Delta\delta$	=	ผลต่างของมุมแรงดันที่บัส
$\mathcal{E}_{tol}$	=	ความคลาดเคลื่อนในการหยุด
*	=	ตัวกระทำสังยุคเชิงซ้อน
kV	=	หน่วยกิโลโวลต์ของแรงดันไฟฟ้า
Mvar	=	หน่วยเม็กะวาร์ของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ
MW	=	หน่วยเม็กะวัตต์ของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ
HS	=	Harmony Search
GA	=	Genetic Algorithm

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

PSO	=	Particle Swarm Optimization
SQP	=	Sequential Quadratic Programming
BFGS	=	Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno
KVL	=	Kirchhoff's Voltage Law
OPF	=	Optimal Power Flow



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังประกอบไปด้วยโรงไฟฟ้าจำนวนมาก ซึ่งโรงไฟฟ้าแต่ละโรงมีประสิทธิภาพและต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เนื่องจากการผลิตกำลังงานไฟฟ้าจากต้นกำเนิดพลังงานที่ไม่เหมือนกัน ไม่ว่าจะเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน พลังงานน้ำ โรงไฟฟ้าชีวมวล หรือพลังงานทดแทน เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงหลักการทางเศรษฐศาสตร์โดยเฉพาะการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ซึ่งเป็นการจัดสรรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับระบบให้ผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด โดยใช้ต้นทุนในการผลิตกำลังไฟฟ้าให้ต่ำที่สุด เนื่องจากการผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลด สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคือ ต้นทุน (cost) การผลิตโดยที่แหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าควรตั้งอยู่ใกล้กับกลุ่มโหลดให้มากที่สุดเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำสุด แต่ถ้าแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าอยู่ห่างไกลจากโหลดมากการสูญเสียในระบบสายส่งจะมีค่าสูงทำให้ไม่เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ได้ แต่การสร้างโรงไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมที่มีข้อจำกัดทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์ การลงทุนที่คุ้มค่า สิ่งเหล่านี้ล้วนแล้วแต่เป็นต้นทุนการผลิตทั้งสิ้น เนื่องจากโรงไฟฟ้าแต่ละโรงมีระยะทางห่างจากกลุ่มโหลดแตกต่างกัน ดังนั้นวิธีลดต้นทุนการผลิตอีกวิธีหนึ่งคือการวางแผนการเดินทางเครื่องจักรของโรงไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความต้องการของโหลดทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยให้ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าทั้งหมดต่ำที่สุด นั่นคือการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ในการจ่ายโหลดอย่างประหยัดนี้มีด้วยกัน 2 กรณีคือกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด และกรณีที่โหลดคงที่ แต่ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาในกรณีที่มีการจ่ายโหลดอย่างประหยัดแบบโหลดคงที่

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Power Flow : OPF) เป็นปัญหาทางไฟฟ้ากำลังปัญหาหนึ่งที่ใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน ซึ่งถูกนำเสนอโดยคาร์เพนทีเยร์ (Carpentier, 1962) โดยการศึกษาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดควบคู่ไปกับการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (ชนิดชัย กุลวรรณิขพงษ์, 2551) โดยการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดของต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงหรือ เรียกสั้น ๆ ว่าปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริง (problem of real power : P-problem) โดยพิจารณาการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังให้มีต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุด

ภายใต้ขอบเขตที่จำกัดการจ่ายโหลดอย่างประหยัด เป็นวิธีการจัดสรรกำลังผลิตของระบบอย่างเหมาะสม เพื่อให้มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดและมีกำลังผลิตเพียงพอต่อโหลด โดยทั่วไปอยู่ภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ ในระบบที่นอกเหนือจากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า เช่น พิกัดกำลังของสายส่งกำลังการผลิตส่งผ่านระหว่างบริเวณ (power interchange) อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (ramp rate) นั้น สามารถนำมาพิจารณาไว้ในปัญหาโดยอาจเป็นสมการหรืออสมการเงื่อนไขข้อจำกัดของการจัดสรรกำลังผลิตของหน่วยการผลิตเป็นการวางแผนการผลิตให้กับโรงไฟฟ้าแต่ละโรงโดยหน่วยการผลิตที่มีต้นทุนการผลิตแพงจะได้รับการจัดสรรให้จ่ายโหลดที่ต่ำที่สุดเพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิต เนื่องจากโรงไฟฟ้าแต่ละโรงจะใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกันจึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่างกัน ส่วนตัวแปรควบคุมที่ใช้ได้แก่ กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของหน่วยการผลิตย่อยต่าง ๆ ขนาดแรงดันที่บัสควบคุม ขนาดกำลังไฟฟ้าของตัวชดเชยค่าแท็ปหม้อแปลงหรืออื่น ๆ ต้องถูกปรับไปพร้อมกัน เมื่อทำการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงจากหน่วยผลิตของโรงไฟฟ้าต่าง ๆ แล้วปัญหาสำคัญที่จะพิจารณาต่อมาคือการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าไปยังกลุ่มโหลดผ่านระบบส่งจ่ายของสายส่ง โดยทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบโดยรวมต่ำที่สุด เรียกว่า ปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (problem of reactive power allocation) หรือปัญหาคิว (Q-problem) โดยการควบคุมขนาดแรงดันของบัสควบคุมแรงดันต่าง ๆ ที่กระจายอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าแท็ปหม้อแปลงในระบบ ค่าอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสโหลด เป็นต้น โดยการหาจุดทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบน้อยที่สุด เนื่องจากปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดเป็นปัญหาแบบเปิด ดังนั้นจึงสามารถเลือกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามความต้องการของผู้ที่ทำการวิเคราะห์ เช่น ต้นทุนการผลิต กำลังงานสูญเสีย การกระจายแรงดันในระบบ และความมั่นคงของระบบ เป็นต้น โดยต้องมีการกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขบังคับ (constraint) มาเป็นตัวแปรควบคุม ทั้งที่เป็นเงื่อนไขในรูปของสมการและอสมการแล้วใช้วิธีการปรับโทษ (penalty method) แปลงเงื่อนไขบังคับให้เป็นฟังก์ชันการปรับโทษ (penalty function) แล้วใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการแก้ปัญหา

ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดแบบโหลดคงที่และการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อลดต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้การจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสัน ซึ่งเป็นวิธีที่มีความเร็วในการประมวลผลสูง และมีการลู่ออกของคำตอบดี จำนวนรอบของการคำนวณจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบไฟฟ้า ดังนั้นคำตอบที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือสูง แล้วทำการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งในปัจจุบันมีเทคนิคมากมายในการแก้ปัญหาลoad of กำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด เช่น วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) และกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีล้วนแล้วแต่มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน

ขึ้นอยู่กับนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ แต่ในงานวิจัยนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส และ 118 บัส ระบบทดสอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยของภาคกลางตอนบนและภาคกลางด้านตะวันตกรวม 169 บัส และการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบทดสอบ 9 บัส (115 kV นครราชสีมา 2) ด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน (Harmony Search : HS) เปรียบเทียบกับวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) วิธีคล้ายนิวตัน (Quasi-Newton methods : BFGS)

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดโดยการจ่ายโหลดอย่างประหยัดและการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

1.2.2 เพื่อศึกษาการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบความบรรสาน

1.2.3 เพื่อศึกษาการลดต้นทุนการผลิตโดยการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความต้องการของโหลดและลดกำลังงานสูญเสียในระบบ

1.2.4 เพื่อศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาทำการจำลองคือ ระบบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส 169 บัส (กฟผ.) และ 9 บัส (115 kV นครราชสีมา 2)

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ใช้ฟังก์ชันต้นทุนค่าเชื้อเพลิง (fuel cost) และฟังก์ชันกำลังงานสูญเสียเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุด โดยพิจารณาทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

1.3.2 ประยุกต์ใช้เทคนิคทางด้านคณิตในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด คือวิธีการค้นหาความบรรสาน โดยทำการจำลองกับระบบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส 169 บัส (กฟผ.) และ 9 บัส (115 kV นครราชสีมา 2)

1.3.3 ใช้วิธีการปรับโทษแปลงปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขไปเป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไข

1.3.4 การคำนวณใด ๆ ที่มีความซับซ้อนในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) เป็นเครื่องมือในการคำนวณ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดซึ่งเป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดของต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า และการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อลดกำลังงานสูญเสียในระบบภายใต้เงื่อนไขของสมการและอสมการ

1.4.2 ศึกษาและประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาความบรรสานในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

1.4.3 ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยการนำเทคนิคต่าง ๆ มาใช้ในการแก้ปัญหา เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาความบรรสาน

1.4.4 ศึกษาการจัดสรรกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด โดยใช้ระบบทดสอบขนาด 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส 169 บัส (กฟผ.) และ 9 บัส (115 kV นครราชสีมา 2)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความเข้าใจเกี่ยวกับสมการทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

1.5.2 มีความเข้าใจเกี่ยวกับการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดที่เป็นการจ่ายโหลดอย่างประหยัด และการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด

1.5.3 มีความเข้าใจเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีการค้นหาความบรรสานที่ใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

1.5.4 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยในที่ประชุมทางวิชาการหรือในวารสารวิชาการ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท และ 4 ภาคผนวก ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วย เนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน ปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

บทที่ 3 กล่าวถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด การจ่ายโหลดอย่างประหยัด การจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ รูปแบบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด การแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

บทที่ 4 กล่าวถึงการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีคล้ายนิวตัน วิธีเชิงพันธุกรรม และวิธีฝูงอนุภาค

บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการค้นหาความบรรสาน โครงสร้างของวิธีการค้นหาความบรรสาน การประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาความบรรสาน รวมทั้งการทดสอบประสิทธิภาพของแต่ละวิธี ด้วยสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์

บทที่ 6 กล่าวถึงผลการจำลองการเปรียบเทียบค่าต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด โดยใช้ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ (Smooth Quadratic Function) และฟังก์ชัน ที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ (Non – Smooth Valve Point Loading Function) การเปรียบเทียบค่ากำลังงานสูญเสียในระบบโดยใช้วิธี BFGS PSO GA และ HS

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. MATLAB และ Histogram ของการแจกแจงปกติ

ภาคผนวก ข. รายละเอียดของระบบทดสอบต่าง ๆ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ค. ผลการจำลอง

ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงปรัทัศนัวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยปรัทัศนัวรรณกรรมจะสรุปโดยย่อเกี่ยวกับงานวิจัยของนักวิจัยต่าง ๆ ที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดที่ผ่านมา และจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด ได้แก่ การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน ปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ปรัทัศนัวรรณกรรมนี้จึงเป็นเพียงส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่เคยปรากฏมาก่อนแล้วเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด

2.2 ปรัทัศนัวรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาการประยุกต์ใช้การค้นหาความบรรสานในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยย่อได้

2.2.1 ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุด (Optimal power flow of problem)

Muriithi, M.G. (1996) นำเสนอการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยคำนึงถึงหลักการทางเศรษฐศาสตร์และความน่าเชื่อถือ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาถึงการทำงานและการวางแผนในระบบไฟฟ้า โดยที่ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอ การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดและการหาคำตอบของการจัดสรรกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะได้อาเหมาะสมที่สุดภายใต้การทำงานที่ทำให้คำตอบต่ำที่สุด โดยมีพารามิเตอร์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ภายใต้เงื่อนไขบังคับของระดับแรงดันการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่ง และค่าเทปหม้อแปลงคำตอบที่ได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดทำให้มีความเชื่อถือในทางเศรษฐศาสตร์ คำตอบที่ได้จะใช้เทคนิคแบบไม่เป็นเชิงเส้นในการหาค่าเหมาะที่สุด ได้แก่ ระเบียบวิธีขั้นที่สุด วิธีโปรแกรมกำลังสอง และวิธีโปรเจกเกรเดียน ในบทความนี้จะแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีขั้นที่สุด

ธนดชัย กุลรวานิชพงษ์ (2542) ได้นำเสนอการทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้การตัดสินใจแบบฟัซซี่ ในส่วนแรกทำการเปรียบเทียบกับปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ ส่วนที่สอง

เสนอวิธีการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาต้นทุนการผลิตโดยรวมของระบบส่วนสุดท้ายเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้การตัดสินใจแบบฟัซซี่

Gaing, Z.L. (2005) นำเสนอประสิทธิภาพของวิธีกลุ่มฝูงอนุภาคที่หลากหลาย (MIPSO) สำหรับแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดกับการรวมกันระหว่างการควบคุมตัวแปรแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ความไม่ต่อเนื่องของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นต้นทุนการผลิตในพื้นที่ฐานของวิธีกลุ่มฝูงอนุภาคที่หลากหลาย โดยการกำหนดตัวแปรควบคุมให้เป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องซึ่งประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าจริง ความแตกต่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับจุดเปิดวาล์วที่มีผลกระทบต่อเงื่อนไขบังคับที่พิจารณา โดยทำการจำลองกับระบบทดสอบ 9 บัส และ 26 บัส และเปรียบเทียบกับวิธีสโตคาสติกในเทอมของคำตอบที่มีคุณภาพ คุณสมบัติการลู่เข้า และการคำนวณประสิทธิภาพผลการจำลองที่แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี MIPSO ผลที่ได้จะมีประสิทธิผล

ปรเมศ อิงสุวรรณ และ สมชาติ จิรวิภากร (2551) ได้นำเสนอการจ่ายโหลดอย่างประหยัดซึ่งเป็นการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความต้องการของโหลด โดยมีต้นทุนการผลิตและการจ่ายกำลังไฟฟ้าทั้งหมดต่ำสุด การแก้ปัญหาดังกล่าวเรียกว่า ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงต้องแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI)

Tangpatiphan, K., and Yokoyama, A. (2008) ได้นำเสนอโปรแกรมการวิวัฒนาการร่วมกับโครงข่ายประสาทโดยนำเสนอคำตอบของเสถียรภาพชั่วคราว โดยมีเงื่อนไขบังคับของการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โปรแกรมวิวัฒนาการเป็นการเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดในขณะที่โครงข่ายประสาทคือเครื่องมือปรับปรุงการคำนวณให้มีความเร็ว โดยใช้สมการการแกว่งและมีขอบเขตของมุมโรเตอร์ที่เบี่ยงเบน กับจุดศูนย์รวมของโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มเข้าไปในเงื่อนไข โดยเลือกค่าเชื้อเพลิงต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และใช้ระบบทดสอบ 30 บัส

Fangxing, W.Z., and Tolbert, L.M. (2008) ได้นำเสนอ ปัจจัยหลักของการวางแผนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (RPP) คือการหาค่าเหมาะสมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยพิจารณาดำเนินการที่ตั้งและขนาดอันดับหนึ่ง ความสัมพันธ์ของการชดเชยกำลังไฟฟ้า รวมทั้งความสามารถในการถ่ายโอนและค่าเชื้อเพลิง ซึ่งจะกล่าวในบทความนี้ อันดับสอง RPP คือการบรรยายชั่วคราว ซึ่งต้องใช้เวลาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระบบต้นทุน และการชดเชยกำลังไฟฟ้าอันดับสาม เสถียรภาพของแรงดันภายใต้เงื่อนไขบังคับการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยการติดตั้งตัวแปรสองตัว (TSV) ซึ่ง TSV จะช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณ ซึ่งจะแตกต่างจากเมื่อก่อนที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ค่าเชื้อเพลิงต่ำที่สุด งานวิจัยนี้เสนอการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้นทุนต่ำที่สุดโดยรวมของระบบ จะสังเกตผลที่ได้ของ RPP โดยเฉพาะภายใต้สิ่งแวดล้อม RPP จะมีผลกระทบ

ต่อระบบส่งจ่าย พิจารณาคำนวณของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลการจำลองของ TSV จะเข้าใกล้เกณฑ์มาตรฐาน

Oumarou, I., Jiang, D., and Yijia, C. (2009) ได้นำเสนอการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้วิธีกลุ่มฝูงนกฮูก ซึ่งวิธีนี้จะมีค่าไม่คงที่ตามธรรมชาติ จึงทำให้เกิดข้อบกพร่อง ดังนั้นจึงทำการพัฒนาการคำนวณวิธีนี้ ได้แก่ ทำให้มีความเร็วมากขึ้น ทำให้เข้าสู่จุดคำตอบเร็วขึ้น และทำการเตรียมความพร้อม ซึ่งจะทำให้คำตอบมีคุณภาพสูง โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ หาค่าต่ำที่สุดของค่าเชื้อเพลิง เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันบัส ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และแท็ปหม้อแปลง ให้อยู่ขอบเขตที่ปลอดภัย โดยใช้ระบบทดสอบ 30 บัส

Tangpatipphan, K., and Yokoyama, A. (2009) ได้นำเสนอการปรับปรุงโปรแกรมวิวัฒนาการ สำหรับแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาเสถียรภาพของแรงดันที่มีสถานะคงตัว และมีรูปแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการแลกเปลี่ยนสินค้าที่มีราคาใกล้เคียงกัน ที่เกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ ค่าเชื้อเพลิงและความปลอดภัยของระบบ ขอบเขตเสถียรภาพของแรงดันการวัดตัวเหนี่ยวนำเพื่อนำมาใช้ในการประเมินสถานะคงตัวที่ทำให้แรงดันมีเสถียรภาพ ในบทความนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงโปรแกรมวิวัฒนาการ โดยลอกเลียนแบบความคิดของเทคนิคการครอสโอเวอร์จากรหัสจริงของวิธีเชิงพันธุกรรม ใช้ระบบทดสอบ 30 บัส

Va, P.T., Le, D.L., Vo, N.D., and Tlustý, J. (2010) ได้นำเสนอการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดของการไหลกำลังไฟฟ้า และการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีจุดเปิดวาล์วโดยมีผลในระบบไฟฟ้ากำลัง แล้วทำการแก้ปัญหาด้วยเทคนิคอันชาญฉลาด ในบทความนี้มีพื้นฐานการปรับปรุงฟังก์ชันด้วยค่าพารามิเตอร์ของน้ำหนัก และนำเสนอการปรับปรุงน้ำหนักแบบใหม่โดยใช้วิธีกลุ่มฝูงนกฮูก ในการคำนวณ แล้วทำการประเมินค่าความแม่นยำว่าเข้าสู่จุดคำตอบได้รวดเร็วและมีความเหมาะสม โดยทำการเปรียบเทียบกับ วิธีเชิงพันธุกรรม (GA) วิวัฒนาการการหาอนุพันธ์ (DE) และ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยคอลอนิมด (ACO) โดยใช้ระบบทดสอบ 30 บัส

Leungc, H.C., and Chung, T.S. (2010) ได้นำเสนอวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) แบบใหม่ ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ในระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้การยืดหยุ่นของระบบสายส่งกระแสสลับ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพและทำให้ระบบสามารถปรับตัวได้ง่าย ตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า (UPFC) จะพิจารณาในบทความนี้ ซึ่งจะแตกต่างจากอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า (FACE) อื่น ๆ ตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจะมีความยืดหยุ่นดีและสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และแรงดัน ในกระบวนการหาคำตอบ วิธีเชิงพันธุกรรมจะเชื่อมต่อการไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วทำการเลือกตัวควบคุมที่ทำให้ค่าเชื้อเพลิงโดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ำที่สุด และเก็บรักษาการไหลกำลังไฟฟ้า ภายใต้ขอบเขตที่ปลอดภัย

2.2.2 วิธีหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน (Harmony Search)

Geem, Z.W., Lee, K.S., and Park, Y. (2005) ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความบรรสาน (Harmony Search) ซึ่งเป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการใช้พาหนะในการเดินทาง โดยนำมาเปรียบเทียบกับวิธีที่นิยมใช้ เช่น วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) วิธีวิวัฒนาการ (Evolutionary Programming : EP) เป็นต้น ขั้นตอนวิธีการค้นหาความบรรสานใช้หลักการของกลุ่มนักดนตรีที่พยายามค้นหาความบรรสานที่ดีที่สุด ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการจำลองโครงข่ายของการจราจรประกอบด้วยที่จอดรถประจำทางโรงเรียนและป้ายหยุดรถประจำทาง 10 ที่ กับความต้องการของนักเรียน โดยการหาค่าต่ำสุดของจำนวนรถประจำทางและเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเดินทางภายใต้ข้อจำกัดของเวลา

Geem, Z.W., Lee, K.S., and Tseng, C.L. (2005) ได้นำเสนอการรวบรวมแบบจำลองการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการออกแบบโครงสร้างโดยใช้วิธีทางธรรมชาติแบบใหม่ คือ ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบความบรรสานเปรียบเทียบกับวิธี GA

Geem, Z.W., and William, C.J. (2007) ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้การค้นหาด้วยวิธีการค้นหาความบรรสานในการแก้ปัญหารักษากระบวนนิเวศวิทยา เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อมนุษย์และสัตว์สำหรับการอนุรักษ์สัตว์และสิ่งแวดล้อมมีการกำหนดการหาค่าเหมาะที่สุดแบบค่าสูงสุดเพื่อหาค่าสูงสุดของชนิดสัตว์ภายใต้ข้อจำกัด โดยใช้การค้นหาแบบความบรรสานในการแก้ปัญหา

Pandi, V.R., Panigrahi, B.K., Mallick, M.K., Abraham, A., and Das, S. (2009) นำเสนอการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้วิธีการค้นหาความบรรสาน ในการแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัด โดยการเสนอหลักการง่าย ๆ ที่มีเงื่อนไขบังคับสมการและอสมการของปัญหาการจ่ายกำลังไฟฟ้าในการหาคำตอบเหมาะที่สุด เพื่อแสดงประสิทธิภาพ เสนอวิธีการในการประยุกต์ใช้กับระบบที่เป็นพื้นผิวเดียวและหลายพื้นผิว ของทั้งหมด 4 พื้นผิวมี 16 หน่วย กับบริเวณพื้นที่ที่ไม่มีการทำงาน จะได้ผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้มาจากวิธีอื่น ๆ ซึ่งวิธีค้นหาความบรรสานจะมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ

Kazemi, A., Parizad, A., and Baghaee, H.R. (2009) นำเสนอความปลอดภัยของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถอธิบายได้ว่าความสามารถในการทนต่อสิ่งรบกวนและการส่งผ่านไปยังตัวรับใหม่ที่มีสถานะคงตัว ในบทความนี้ประยุกต์ใช้วิธีค้นหาความบรรสานในการหาค่าเหมาะที่สุดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อความปลอดภัยในระบบไฟฟ้ากำลังประเภทที่สามของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า ในกรณีที่สายส่งเกิดโหลดเกินและแรงดันตก แก้ปัญหาโดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และการชดเชยกำลังไฟฟ้าที่มีการต่อแบบอนุกรมและขนานตามลำดับ นำการชดเชยกำลังไฟฟ้าโดยการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งและแรงดันบัส ทำการจำลองผลด้วยระบบทดสอบ 30 บัส

โดยการแสดงสถานะคงตัวของระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถปรับปรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการหาตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม ผลการจำลองนี้ชี้ให้เห็นการสูญเสียของทั้ง 2 วิธีที่เหมือนกัน และวิธีการค้นหาความบรรสานจะมีความทำงานดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีเชิงพันธุกรรม

Ngonkham, S., and Buasri, P. (2010) นำเสนอการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสานในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในระบบไฟฟ้ากำลังโดยเปลี่ยนเป็นพลังงานลม โดยมี 3 วิธีในการหาค่าเหมาะที่สุด ได้แก่ วิธีเชิงพันธุกรรม (GA) วิธีจุดภายใน (ITP) และวิธีการค้นหาความบรรสาน (HS) ในการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเมื่อระบบเชื่อมต่อและไม่เชื่อมต่อกับพลังงานลม ผลที่ได้วิธีการค้นหาความบรรสานสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีอื่น ๆ โดยเปรียบเทียบกับวิธี GA HS และ ITP สรุปได้ว่าวิธี HS ดีกว่าวิธี GA 3.54% และวิธี ITP 1.4% ดังนั้นจึงสามารถลดต้นทุนการผลิตโดยรวมเมื่อระบบมีการเชื่อมต่อกับพลังงานลม โดยการคำนวณด้วยวิธี HS สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 4.97% ต่อวัน

Parizad, A., Khazali, A., and Kalantar, M. (2010) นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีค้นหาความบรรสาน โดยจะกล่าวถึงแรงดันตก คือความไม่มีเสถียรภาพของโหลดในระบบไฟฟ้า เพราะแรงดันตกจะทำให้เกิดไฟดับ ระบบไฟฟ้ากำลังอยู่บนพื้นฐานโหลดหนัก ซึ่งในอนาคตความต้องการกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ในทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมจะมีความสัมพันธ์กันขอบเขตของโครงสร้างสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าที่มีโหลดหนักจะทำให้เกิดไฟดับซึ่งสามารถควบคุมสายส่งได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า ในบทความนี้ จะใช้วิธีการค้นหาความบรรสานและวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ามี 3 ชนิดคือ TCPAT UPFS และ SVC ทำการแก้ปัญหาโดยการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของการชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบขนาน โดยการนำการชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบอนุกรมและขนานมารวมกัน เพื่อควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในสายส่งและแรงดันบัส

จากการศึกษาทฤษฎีและเนื้อหาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิทยานิพนธ์พบว่าส่วนประกอบของงานวิทยานิพนธ์มีหลายส่วนประกอบกัน ผู้จัดทำงานวิจัยจึงได้แบ่งเนื้อหาของการศึกษาออกเป็นหัวข้อย่อย ๆ ดังต่อไปนี้

2.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุด

การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดเป็นการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้าให้เหมาะสมกับระบบนั้น ๆ โดยที่ผู้ออกแบบต้องการให้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและเพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า โดยทำการเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุน

การผลิตและกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ภายใต้การทำงานที่ปลอดภัย ซึ่งการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดมีความซับซ้อนและมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ดังนั้นระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์อาจจะไม่สามารถค้นหาจุดต่ำสุดโดยรวมของปัญหาได้ ทำให้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เทคนิคชาวลาคเข้ามามีบทบาทแพร่หลายในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เช่น GA PSO และ HS เป็นต้น ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างนาน แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีมีความทันสมัยมากขึ้น จึงทำให้สมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดมีประสิทธิภาพมากขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2.4 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

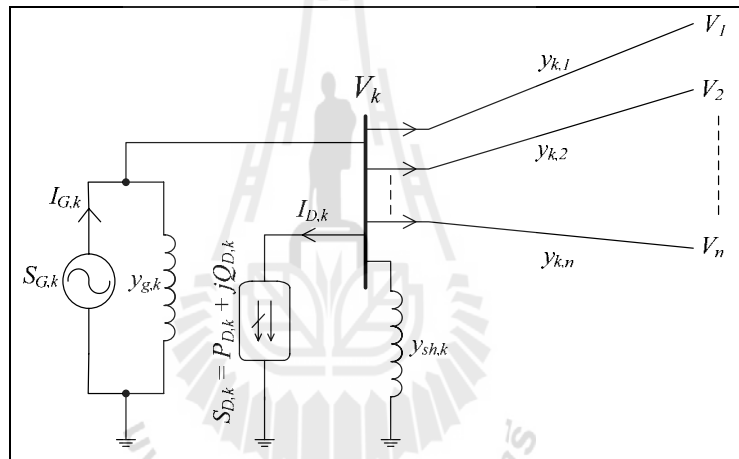
การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเป็นการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของโครงข่ายซึ่งมีความสำคัญต่อการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะแรงดันที่บัสต่าง ๆ กระแสไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับโหลดเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ตลอดจนกำลังงานสูญเสียโดยรวมของระบบ ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องวินิจฉัยเพื่อเลือกจุดการทำงานที่เหมาะสม โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด การทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำสุดจะทำการพิจารณาให้ระบบจ่ายโหลดคงที่ ทำได้โดยการปรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ การเลือกจุดทำงานต้องอาศัยข้อมูลผลเฉลยของแรงดันบัส รวมทั้งโครงสร้างการเชื่อมต่อบัสต่าง ๆ ในรูปเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านสายส่งจะต้องมีอัตราสูงเมื่อเทียบกับขีดจำกัดการทนกระแสไฟฟ้าของสายส่ง ดังนั้นจึงต้องทำการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมรวมทั้งต้องควบคุมกำลังงานสูญเสียในสายส่งไม่ให้มีค่ามากเกินไป เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้ไฟฟ้า

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าในกรณีของระบบส่งจ่าย มีหลักการคำนวณดังนี้ ระบบส่งจ่ายต้องมีความสมดุลมากจึงสามารถคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้ระบบต่อเฟส ผลที่ได้จากการคำนวณจะถือว่ามีความเท่ากันทุกเฟส ซึ่งแตกต่างจากระบบสายป้อนที่ความต้านทานสายส่งจะมีผลของความต้านทานระหว่างเฟสมาเกี่ยวข้องด้วย เนื่องจากระบบสายป้อนบางช่วงอาจมีการเดินสายไปแค่สองเฟสหรืออาจเพียงเฟสใดเฟสหนึ่งเท่านั้น รวมทั้งปริมาณโหลดที่ใช้ในแต่ละเฟส อาจจะมีค่าไม่เท่ากันส่งผลให้กระแสที่ไหลในสายแต่ละเฟสไม่สมดุล แรงดันในแต่ละเฟสของบัสเดียวกันมีค่าไม่เท่ากันทำให้ไม่สามารถคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าได้ด้วยระบบต่อเฟส ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสถูกนำมาใช้แทนระบบต่อเฟส ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นจะได้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันที่บัสต่าง ๆ และกำลังไฟฟ้า

จริงรวมทั้งกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลในสายส่ง ซึ่งการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้ามีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ ซึ่งในที่นี้จะนำเสนอ 2 วิธี (ธนัชชัย กุลวรรณิขพงษ์, 2551) ดังนี้

2.4.1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนบัสทั้งสิ้น n บัส โดยที่กำหนดให้บัสหนึ่ง บัสมีขนาดและมุมของแรงดันมีค่าคงที่ และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการคำนวณซึ่งจะเรียกบัสนี้ว่า บัสอ้างอิง (reference bus) หรือที่รู้จักกันในชื่อ บัสสลैค (slack bus) ทำการคำนวณอาศัยพื้นฐาน การวิเคราะห์แรงดัน โหนดเพื่อสร้างสมการโดยใช้หลักการของ KVL และไม่ต้องทำการคำนวณหา แรงดันที่บัสสลैคทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง $n-1$ บัส เท่านั้น



รูปที่ 2.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยใช้การวิเคราะห์แบบ โหนด (nodal analysis) จะได้สมการสมดุลกระแสที่ โหนด k ใด ๆ ดังสมการที่ 2.1 แล้วทำการแทนค่า $I = yV$ จะได้ค่า ดังสมการที่ 2.2

$$y_{k,1}(V_k - V_1) + y_{k,2}(V_k - V_2) + \dots + y_{k,n}(V_k - V_n) = I_{G,k} - I_{D,k} \quad (2.1)$$

$$I_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}(V_k - V_i) = I_{G,k} - I_{D,k} \quad (2.2)$$

เนื่องจากโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของกำลังงานไฟฟ้าซึ่งจะได้ว่า

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = \left(\frac{S_{G,k} - S_{D,k}}{V_k} \right)^* \quad (2.3)$$

จัดรูปสมการที่ (2.3) ใหม่ จะได้สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส k ใด ๆ ดังสมการที่ (2.4)

$$(V_k)^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = (S_{G,k} - S_{D,k})^* \quad (2.4)$$

โดยที่ $S_{G,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและถูกจ่ายเข้าสู่บัส k
 $S_{D,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่โหลดที่บัส k
 V_k คือ เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่บัส k
 V_i คือ เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่บัส i
 $y_{k,i}$ คือ แอดมิตแตนซ์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส k และบัส i
 $*$ คือ ตัวดำเนินการสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate)

จากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ กำหนดให้

$$S_{sch} = P_{sch} + jQ_{sch} \quad (2.5)$$

$$P_{sch} = P_G - P_D \quad (2.6)$$

$$Q_{sch} = Q_G - Q_D \quad (2.7)$$

$$(V_k)^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = (S_{G,k} - S_{D,k})^* = (S_{sch})^* \quad (2.8)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} (V_k - V_i) = \left(\frac{S_{sch,k}}{V_k} \right)^* = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} \quad (2.9)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} V_k - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} \quad (2.10)$$

จากการคำนวณหาบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$[Y_{bus}] : Y_{k,k} = \sum_{i=1}^n y_{k,i} \text{ และ } Y_{k,i} = -y_{k,i} \quad (2.11)$$

จัดรูปสมการที่ (2.12) โดยใช้ตัวแปรเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ จะได้ว่า

$$Y_{k,k} V_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} \quad (2.12)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i = \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.12) ทำการจัดรูปสมการจะได้สมการปรับปรุงแรงดันที่บัส k ใด ๆ ดังสมการที่ (2.14)

$$V_k = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{(V_k)^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i \right\} \quad (2.14)$$

ด้วยกระบวนการวนรอบเมื่อต้องการคำนวณค่าเฟสเซอร์แรงดันปรับปรุงที่บัส k ใด ๆ ในรอบการคำนวณที่ h ใด ๆ จะได้

$$V_k^{(h)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{\left(V_k^{(h-1)}\right)^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i} V_i^{(h-1)} \right\} \quad (2.15)$$

สมการที่ (2.15) เป็นการปรับปรุงตามระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์ สำหรับระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเดลนั้น จะอาศัยหลักการในรอบการคำนวณใด ๆ โดยดำเนินการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าจากบัสที่ 1 จนถึงบัสที่ n (ไม่รวมบัสอ้างอิง) โดยเรียงลำดับการปรับปรุงจาก 1 ไปจนถึง n ตามลำดับ ดังนั้น การคำนวณในรอบที่ $h+1$ ใด ๆ เมื่อพิจารณาถึงการปรับปรุงแรงดันที่บัส k จะพบว่าแรงดันบัสที่ 1 ถึงบัสที่ $k-1$ ได้รับการปรับปรุงเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นวิธีนี้จะใช้ค่าแรงดันที่ได้รับการปรับปรุงของบัสที่ 1 ถึง $k-1$ (ใช้ค่าการคำนวณรอบที่ $h+1$) ในการคำนวณ ในขณะที่แรงดันบัสของบัสที่ k ถึง n ยังคงเป็นค่าที่ได้จากรอบการคำนวณก่อนหน้า (h) นั่นเอง ดังนั้นจะได้สมการสำหรับการปรับปรุงแรงดันด้วยระเบียบวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเดล ดังสมการที่ (2.16)

$$V_k^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{\left(V_k^{(h)}\right)^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} \right\} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) เป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณนี้จะต้องมีการกำหนดบัสสแล็ก เพื่อใช้เป็นเฟสอ้างอิงของมุมเฟสแรงดันในระบบ ซึ่งที่บัสนี้มีการควบคุมขนาดแรงดันบัสโดยที่ไม่ต้องทำการคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง $n-1$ บัสเท่านั้น

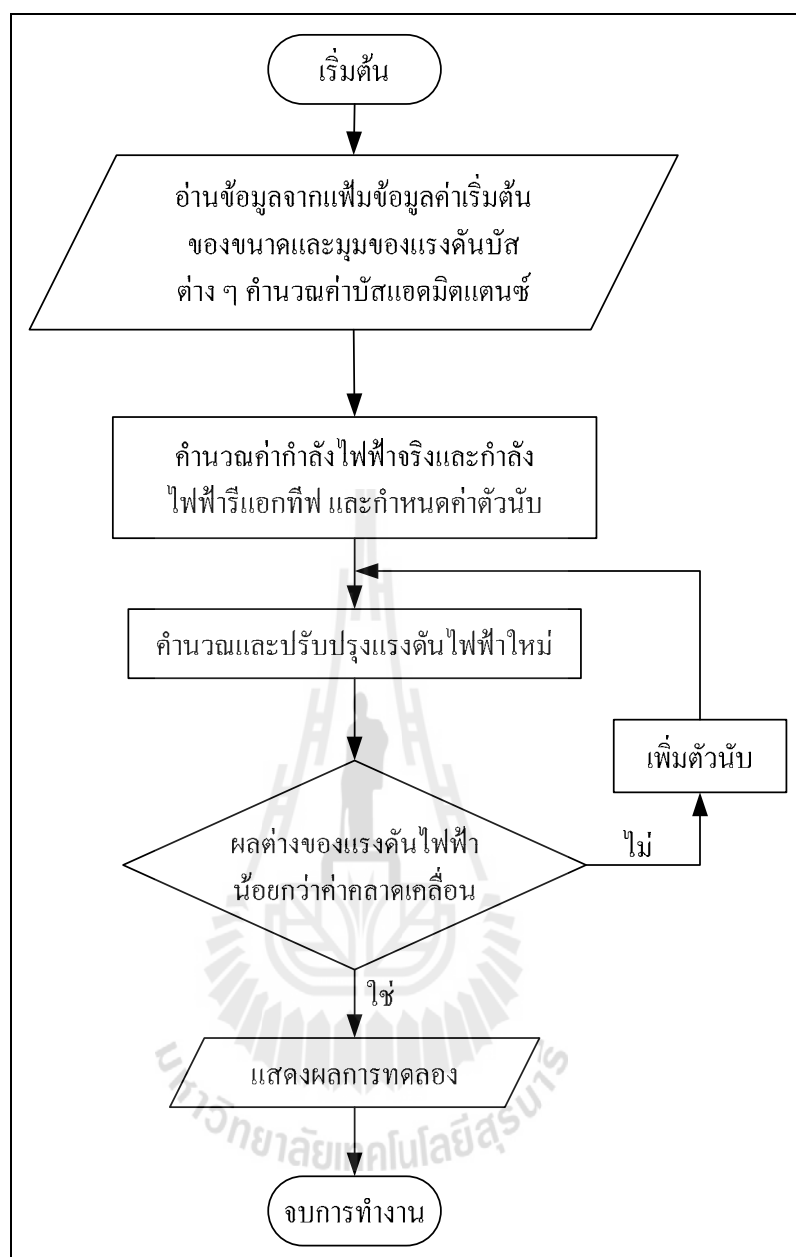
สำหรับปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าจะใช้ตัวประกอบเร่ง α สามารถนำมาใช้ได้กับการคำนวณด้วยวิธีนี้เพื่อเร่งอัตราการลู่เข้าให้มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น สำหรับค่าตัวประกอบเร่ง α ที่เหมาะสมนี้มีค่าประมาณ 1.3 ถึง 1.7 (ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์, 2551) โดยกำหนดให้

$$V_{k,acc}^{(h+1)} = \frac{1}{Y_{k,k}} \left\{ \frac{P_{sch,k} - jQ_{sch,k}}{\left(V_k^{(h)}\right)^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i} V_i^{(h+1)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i} V_i^{(h)} \right\} \quad (2.17)$$

$$V_k^{(h+1)} = V_k^{(h)} + \alpha \left(V_{k,acc}^{(h+1)} - V_k^{(h)} \right) \quad (2.18)$$

ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณในรอบต่อไป เข้าไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งออกจากกระบวนการวนรอบ
 2. ทำการคำนวณค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{bus} ให้อยู่ในรูปของระบบต่อหน่วย (per-unit-system)
 3. คำนวณหาผลต่างของกำลังไฟฟ้าจริง ($P_G - P_D$) และผลต่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ($Q_G - Q_D$) สำหรับบัสโหลด
 4. คำนวณแรงดันไฟฟ้าในรอบที่ $(h+1)$ ที่บัสโหลด k ใด ๆ ($V_k^{(h+1)}$)
 5. คำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า $\Delta|V|$ ถ้า $\Delta|V|$ มีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 4 ใหม่ แต่ถ้า $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ ให้หยุดการทำงานแล้วแสดงผลที่ทำการคำนวณได้
- สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล ได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

2.4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันมีสมรรถนะสูงถ้าผลเฉลยคู่เข้าสู่จุดคำตอบ ซึ่งจะทำให้ใช้จำนวนรอบในการคำนวณน้อย โดยสามารถคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส k ใด ๆ ได้ดังนี้

จากสมการที่ (2.13) สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ โดยกำหนดให้ $S_{sch,k} = P_{sch,k} + jQ_{sch,k}$ จะได้

$$\frac{(S_{sch,k})^*}{(V_k)^*} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i \quad (2.19)$$

$$(S_{sch,k})^* = (V_k)^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i \quad (2.20)$$

สมการที่ (2.20) เป็นสมการของกำลังไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ และเป็นสมการเริ่มต้นในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน กำหนดนิยามดังต่อไปนี้

$$V_k = |V_k| \angle \delta_k = |V_k| e^{j\delta_k} \quad \text{คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส } k \quad (2.21)$$

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad \text{คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส } i \quad (2.22)$$

$$Y_{k,i} = |Y_{k,i}| \angle \theta_{k,i} = |Y_{k,i}| e^{j\theta_{k,i}} \quad \text{คือ สมาชิกแถวที่ } k \text{ หลักที่ } i \text{ ของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.20) เมื่อพิจารณาในรูปพิกัดเชิงขั้ว จะได้ว่า

$$(S_{sch,k})^* = (|V_k| \angle -\delta_k) \sum_{i=1}^n (|Y_{k,i}| \angle \theta_{k,i}) (|V_i| \angle \delta_i) \quad (2.24)$$

$$P_{sch,k} - jQ_{sch,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i}| |V_k| |V_i| \angle (\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.25)$$

โดยที่ $P_{sch,k} = P_{G,k} - P_{D,k}$ และ $Q_{sch,k} = Q_{G,k} - Q_{D,k}$ จะได้ว่า

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i}| |V_k| |V_i| \angle (\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.26)$$

สำหรับเฟสเซอร์แรงดันบั๊สที่เป็นผลเฉลยของระบบสมการนี้ จะทำให้สมการสมดุลอย่างใดก็ตาม ในกระบวนการวนรอบต้องดำเนินการกำหนดค่าเริ่มต้นของเฟสเซอร์แรงดันบั๊ส ซึ่งทำได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การเริ่มต้นแบบราบเรียบ (flat start) โดยการกำหนดให้แรงดันบั๊สเริ่มต้นของทุกบั๊สมีค่า $1.0 \angle 0^\circ$ p.u. (อภิรักษ์ สกกุลพงษ์, 2550) หรือใช้ผลเฉลยแรงดันของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบที่ทำงาน ณ จุดทำงานก่อนหน้านี้ที่จะพิจารณา ถ้าค่าเริ่มต้นเหล่านี้ไม่ใช่ผลเฉลยแรงดันของระบบ จะทำให้สมการดังกล่าวไม่เป็นศูนย์ เกิดความคลาดเคลื่อนของผลรวมกำลังงานไฟฟ้าที่บั๊สขึ้นมา เรียกว่า ความไม่สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า (power mismatches) ซึ่งมีทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนี้

$$\Delta P_k = P_{sch,k} - P_{cal,k} = f_{p,k} \quad (2.27)$$

$$\Delta Q_k = Q_{sch,k} - Q_{cal,k} = f_{q,k} \quad (2.28)$$

$$P_{cal,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i}| V_k V_i \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.29)$$

$$Q_{cal,k} = -\sum_{i=1}^n |Y_{k,i}| V_k V_i \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.30)$$

ใช้ระเบียบวิธีการวนรอบของนิวตัน-ราฟสัน ประมาณผลเฉลยของระบบสมการใน รอบการคำนวณที่ $k+1$ ใด ๆ จะได้

$$f_{p,k+1} = \Delta P_{k+1} = \Delta P_k + [\nabla f_{p,k}]^T \cdot \Delta X = 0 \quad (2.31)$$

$$\Delta P_k = -[\nabla f_{p,k}]^T \cdot \Delta X \quad (2.32)$$

$$X = [\delta \quad |V|]^T \quad (2.33)$$

$$\Delta P_k = - \left(\frac{\partial f_{p,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial f_{p,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \right) \quad (2.34)$$

เนื่องจาก $P_{sch,k}$ มีค่าคงที่ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{\partial f_{p,k}}{\partial X} = - \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial X} \quad (2.35)$$

$$\Delta P_k = \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2.36)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะได้

$$\Delta Q_k = \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2.37)$$

รวมสมการเพื่อสร้างเมตริกซ์ สำหรับปรับปรุงผลเฉลยแรงดัน ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน
หรือ Mismatches (power) = Jacobian $\times$ Corrections (voltage) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{cal}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{cal}}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$\begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}^{(h)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{- (h)} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(h)} \quad (2.39)$$

ซึ่งสามารถคำนวณสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & J_1 & \vdots & \vdots & \vdots & J_2 & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & J_3 & \vdots & \vdots & \vdots & J_4 & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_1| \\ \Delta |V_2| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

ถ้าให้ข้อที่ q เป็นข้อหลัก จากสมการที่ (2.40) หลักที่ $k = q$ และแถวที่ $k = q$ จะถูกกำจัดออกไปเหลือเมตริกซ์ขนาดเพียง $2(n-1) \times 2(n-1)$ เท่านั้น และสามารถหาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนได้ดังนี้

เมตริกซ์ย่อย J1

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2.42)$$

เมตริกซ์ย่อย J2

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2|Y_{k,k} V_k| \cos(\theta_{k,k}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,i} V_i| \cos(\theta_{k,i} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} = |Y_{k,j} V_k| \cos(\theta_{k,j} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2.44)$$

เมตริกซ์ย่อย J3

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,j} V_k V_i| \cos(\theta_{k,j} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{k,j} V_k V_i| \cos(\theta_{k,j} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2.46)$$

เมตริกซ์ย่อย J4

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} = -2|Y_{k,k} V_k| \sin(\theta_{k,k}) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{k,j} V_i| \sin(\theta_{k,j} - \delta_k + \delta_i) \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_i|} = -|Y_{k,j} V_k| \sin(\theta_{k,j} - \delta_k + \delta_i) \quad i \neq k \quad (2.48)$$

การคำนวณเพื่อปรับปรุงผลเฉลยแรงดันจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power mismatch : $\max(|P_{\text{mis, max}}|, |Q_{\text{mis, max}}|)$) มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ หรือ $(|P_{\text{mis, max}}|, |Q_{\text{mis, max}}|) < \mathcal{E}_{\text{tol}}$

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณในรอบต่อไป
2. คำนวณค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{bus} ให้อยู่ในรูประบบต่อหน่วย (per-unit-system)
3. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) สำหรับบัสโหลด
4. คำนวณหาค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ J1-J4

5. คำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนผกผัน และคำนวณความถูกต้องของแรงดัน $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ ทุกบัส

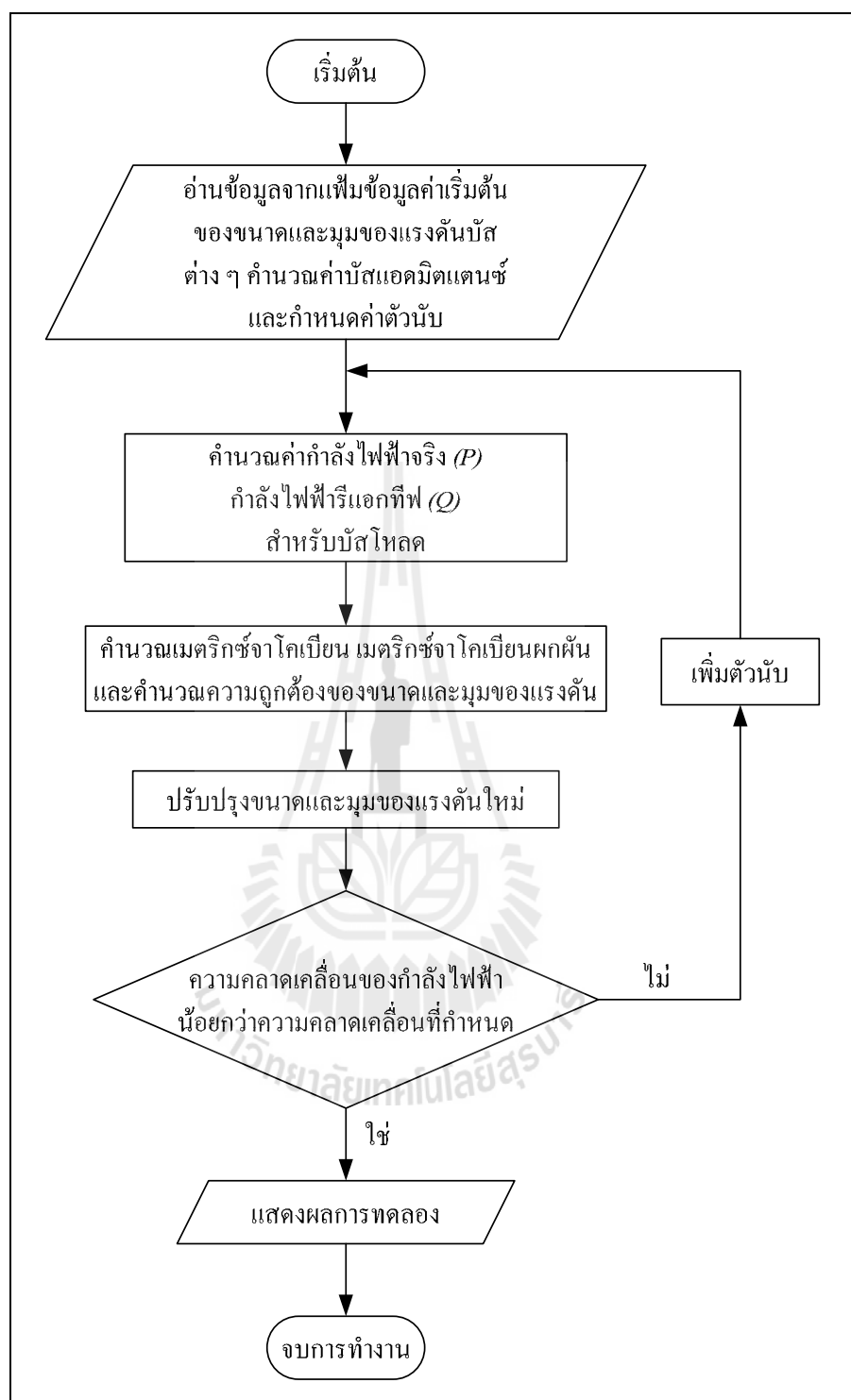
6. คำนวณหาค่า δ และ $|V|$ ค่าใหม่โดยรวม $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ กับค่าเก่า

7. ตรวจสอบค่า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ ถ้ามีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 3 ใหม่ ทำอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าที่ได้จะน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อน

8. ถ้า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้หยุดการทำงาน แล้วแสดงผลที่ทำการคำนวณได้

ซึ่งสามารถอธิบายเป็นอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ด้วย วิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้ดังแผนภาพรูปที่ 2.3





รูปที่ 2.3 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.5 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน

การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน (Harmony) คือการใช้แนวทางของนักดนตรีในการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้การประสานเสียงของเครื่องดนตรีเหมาะสมที่สุด โดยการตัดสินใจจากมาตรฐานหรือระดับความไพเราะของคุณภาพเสียงที่เกิดขึ้น โดยการหาตัวโน้ตที่เหมาะสมกับเครื่องดนตรีแต่ละชนิดเพื่อนำมาเรียบเรียงเสียงของเครื่องดนตรีแต่ละเครื่องที่มีระดับเสียงต่างกันให้สอดคล้องกัน และเกิดความไพเราะ ซึ่งความบรรสานคิดค้นโดย Geem, Z.W. (2001) โดยได้สนใจในการเล่นดนตรี และฝึฝืนที่จะเป็นนักดนตรี ได้แนวคิดจากการแต่งเพลงของนักดนตรี ในการหาตัวโน้ตที่เหมาะสมสำหรับเครื่องดนตรีแต่ละชนิดในการเล่นเป็นวงดนตรีเพื่อให้เกิดความไพเราะ ความบรรสานเป็นการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมอีกวิธีหนึ่ง (Geem, Z.W., 2009) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาความบรรสานในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดโดยใช้กระบวนการเล่นดนตรีประสานเสียงในการค้นหาค่าเหมาะที่สุด

2.6 ปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าไปยังโหลดโดยผ่านระบบโครงข่ายสายส่งกำลังไฟฟ้าให้มีกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุดเนื่องจากในปัจจุบันกลุ่มโหลดที่ต้องการใช้ไฟฟ้าจะอยู่ห่างไกลจากแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าเป็นจำนวนมากดังนั้นปัญหาที่ตามมาคือ การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ซึ่งในกรณีที่โหลดอยู่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ามาก ๆ ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดย่อมมีปัญหาในเรื่องการเกิดกำลังงานสูญเสียในระหว่างการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดทำให้เกิดปัญหาการจ่ายกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ดังนั้นจึงสามารถแก้ปัญหาได้โดยการการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบส่งจ่ายน้อยที่สุด โดยที่แรงดันที่บัสต่าง ๆ ยังอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งสามารถทำได้โดยทำการปรับตัวแปรควบคุมได้แก่ ขนาดแรงดันของบัสควบคุมแรงดันต่าง ๆ ที่กระจายอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าเทปหม้อแปลงในระบบอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสโหลด ภายใต้การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด แล้วทำการเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังสูญเสียในระบบต่ำที่สุด

2.7 ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นการจัดสรรกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ผลิตไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด โดยที่ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด ซึ่งต้นทุนในที่นี้คือค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่นำมาใช้ในการผลิตแต่ละเครื่องรวมกัน ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนการผลิตให้กับระบบผลิต ภายใต้เงื่อนไขบังคับที่เป็นสมการและอสมการดังนี้เงื่อนไขสมการ เช่น กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับความต้องการของโหลด แต่ถ้าเป็นเงื่อนไขอสมการจะเป็นการกำหนดขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการควบคุม เช่น จำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จำกัดค่าของแรงดันบัส จำกัดค่าของหม้อแปลง เป็นต้น ซึ่งปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดนั้นข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าจะหายไปส่งผลต่อปัญหาการรักษาระดับแรงดันการทำงานของระบบ ดังนั้น ปัญหาที่ใช้หลักการสมดุลของกำลังผลิตในรูปของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดนี้จึงพิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง

2.8 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยได้กล่าวถึงการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน ปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดรวมทั้งการจำลองผลระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

การไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด

3.1 บทนำ

การไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดถูกนำเสนอโดย Carpentier (1962) ซึ่งการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยมุ่งเน้นไปในเรื่องต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า (ชนิดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2551) ภายใต้เงื่อนไขบังคับคือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต้องเท่ากับโหลดบวกกำลังงานสูญเสีย ซึ่งกำลังงานสูญเสียนี้เป็นผลมาจากการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่าย การจ่ายโหลดอย่างประหยัดนี้พิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง นิยมเรียกสั้น ๆ ว่า การจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริง เมื่อทำการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงจากหน่วยการผลิตแล้ว ปัญหาที่ต้องคำนึงต่อไปคือ การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดผ่านระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า เนื่องจากหน่วยผลิตกำลังไฟฟ้าอยู่ห่างไกลจากกลุ่มโหลดที่ต้องการใช้ไฟฟ้า โดยทำการควบคุมเพื่อให้มีกำลังงานสูญเสียโดยรวมในระบบต่ำที่สุดและแรงดันที่บัสต่าง ๆ อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ปัญหานี้เรียกว่า การจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

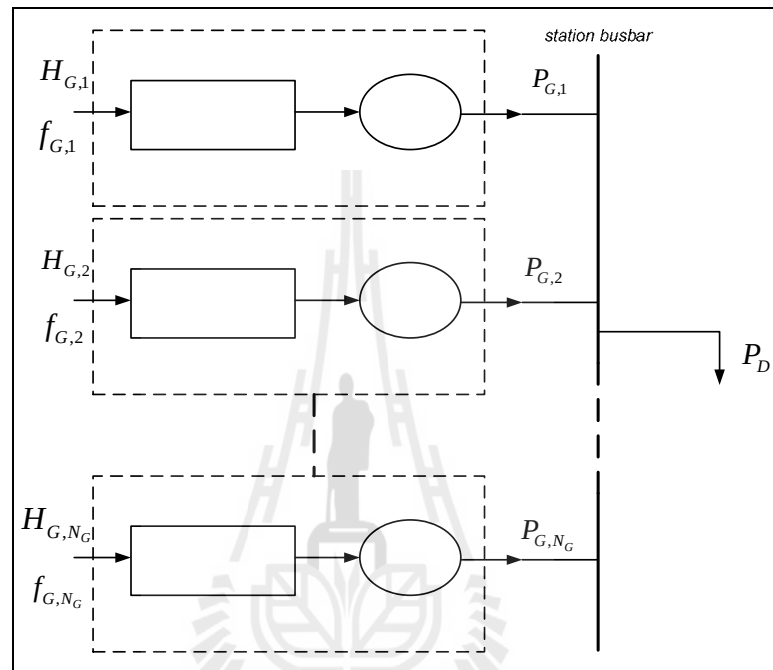
ปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นจึงทำให้เกิดปัญหาซับซ้อนมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นระบบผลิตหรือระบบส่งจ่ายตลอดจนอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้นจึงต้องมีการควบคุมระบบไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดความผิดปกติกับระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการวางแผนการทำงานและควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์และความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า โดยเน้นไปที่การจ่ายโหลดอย่างประหยัดควบคู่ไปกับการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อลดต้นทุนการผลิตและลดกำลังงานสูญเสียในระบบ

3.2 การจ่ายโหลดอย่างประหยัด

การผลิตกำลังไฟฟ้าโดยคำนึงถึงหลักการในทางเศรษฐศาสตร์ หรือเรียกว่าการจ่ายโหลดอย่างประหยัดนั้นมีเป้าหมายคือ ทำให้ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้ามีราคาต่ำที่สุด ในขณะที่โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าเพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้านั้นหาได้จากราคาค่าเชื้อเพลิงรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องที่ทำการผลิตกำลังไฟฟ้า โดยการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีต้นทุนการผลิตโดยรวมต่ำที่สุดภายใต้การทำงานที่ปลอดภัยของระบบ (ชนิดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2542)

3.2.1 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยไม่รวมผลการสูญเสีย และไม่รวมขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดเมื่อไม่มีการพิจารณาการสูญเสียในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังกรณีไม่พิจารณาการสูญเสียของระบบ

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดจะพิจารณาด้านทุนการผลิตโดยรวมของระบบ สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

$$F_T = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) \quad (3.1)$$

ในกรณีที่ ไม่พิจารณาการสูญเสียในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้น ผลรวมกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องเท่ากับผลรวมของโหลดในระบบ ซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับแบบสมการ สามารถจัดรูปแบบของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดได้ดังสมการที่ (3.2)

$$\begin{aligned}
&\text{Minimize} && F_T \\
&\text{Subject to} && \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{N_D} P_{Di} = 0
\end{aligned} \tag{3.2}$$

3.2.2 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ไม่รวมผลของการสูญเสีย

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งเป็นเงื่อนไขของการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ให้สูงเกินค่ากำลังผลิตสูงสุดหรือต่ำกว่าค่ากำลังผลิตต่ำสุด เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า สามารถเขียนได้ดังนี้ $P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}$; $i=1,2,\dots,N_G$ โดยที่ $P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$ คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุดและสูงสุด巴士ที่ i

3.2.3 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมผลของการสูญเสีย

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมผลของการสูญเสียจะใช้ในกรณีที่มีการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบสายส่งที่มีระยะทางไกล หรือโหลดมีค่าไม่สูงมากนัก การสูญเสียในระบบส่งจ่ายจะมีผลกระทบกับระบบมากจนไม่สามารถที่จะละทิ้งค่าการสูญเสียนี้ได้ การคำนวณการสูญเสียในที่นี้จะคำนวณจากการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วย วิธี AC Newton-Raphson power flow โดยตรงเงื่อนไขบังคับแบบสมการของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมผลของการสูญเสียสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.3)

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{N_D} P_{Di} - P_{LOSSES} = 0 \tag{3.3}$$

3.3 การจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟ

การจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟมีผลกระทบต่อการสูญเสียในระบบ ซึ่งเรียกว่า ปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (problem of reactive power allocation หรือ Q-problem) เป็นการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าไปยังโหลดโดยผ่านระบบโครงข่ายสายส่งกำลังไฟฟ้าให้มีกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุด ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่โหลดอยู่ห่างไกลจากแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้า เนื่องจากการสร้างโรงไฟฟ้าเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าต้องคำนึงถึงปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์หลายอย่างประกอบกัน และกลุ่มโหลดที่ต้องการใช้ไฟฟ้าก็มีกระจายอยู่ทั่วไปเป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างโรงไฟฟ้าให้อยู่ใกล้กับกลุ่มโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าได้ทุกกลุ่ม ปัญหาที่ตามมาคือ ปัญหาการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลด ซึ่งจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียใน

ระบบ ผลกระทบต่อมา คือ โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า ทำให้ไม่เกิดความต่อเนื่องในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นในการแก้ปัญหาอีกวิธีหนึ่ง คือการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยที่แรงดันที่บัสต่าง ๆ ยังอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุมขนาดแรงดันของบัสควบคุมแรงดันต่าง ๆ ที่กระจายอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าที่เปลี่ยนแปลงในระบบ อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสโหลด ภายใต้การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด แล้วทำการหาจุดการทำงานที่เหมาะสมกับระบบที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ภายใต้ระบบการทำงานในขอบเขตที่ปลอดภัยและมีเสถียรภาพ

3.4 รูปแบบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

รูปแบบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดต้องมีการกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้สอดคล้องกับปัญหานั้น ๆ โดยมีจุดมุ่งหมาย คือ เลือกจุดทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำสุดภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขบังคับของตัวแปรที่ต้องการปรับปรุงค่าหรือขอบเขตของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถจำแนกเงื่อนไขบังคับได้เป็น 2 ประเภท คือ เงื่อนไขบังคับสมการ (equality constraints) และเงื่อนไขบังคับอสมการ (inequality constraints) โดยปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับมีรูปทั่วไปดังต่อไปนี้

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & f(x) \\ \text{Subject to} & g(x)=0 \text{ คือ เงื่อนไขบังคับสมการ} \\ & h(x)\leq 0 \text{ คือ เงื่อนไขบังคับอสมการ} \end{array}$$

3.4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้

- ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นฟังก์ชันของต้นทุนในการผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบ ผู้ทำการจำลองต้องกำหนดขึ้นมาเอง โดยส่วนมากมีเงื่อนไขบังคับปรากฏอยู่เสมอ การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีหลากหลายรูปแบบ เช่น การออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อให้ใช้วัตถุดิบน้อยที่สุด การออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อให้มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด (พัฒนา พงศ์จริยา, 2545) การออกแบบให้กระบวนการผลิตใช้เวลาในการผลิตน้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากการคำนวณตอนออกแบบหรือจากการทดสอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง โดยฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงดังกล่าวมี 2 แบบดังนี้

- ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ (Smooth Quadratic Function) ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงในรูปสมการกำลังสองนี้ใช้ในการหาจุดค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดที่คำนวณได้ง่ายไม่มีความซับซ้อนมากนัก ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$f_i(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (3.4)$$

โดยสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรูปของสมการเชื้อเพลิงแบบกำลังสองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องได้ดังนี้

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_G} f_i(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) \quad (3.5)$$

- ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ (Non – Smooth Valve Point Loading Function) ปัญหาที่มีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น เช่น กรณีที่หน่วยการผลิตเป็นแบบกังหันไอน้ำหลายวาล์ว (multi-valve steam turbines) ณ จุดที่มีการเปิดวาล์วจะทำให้ใช้พลังงานความร้อนที่มีค่าสูงขึ้นฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงที่เป็นสมการกำลังสองจึงไม่สามารถใช้ในการจำลองได้ ดังนั้น จึงต้องใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงแบบมีจุดเปิดวาล์วหลายจุด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

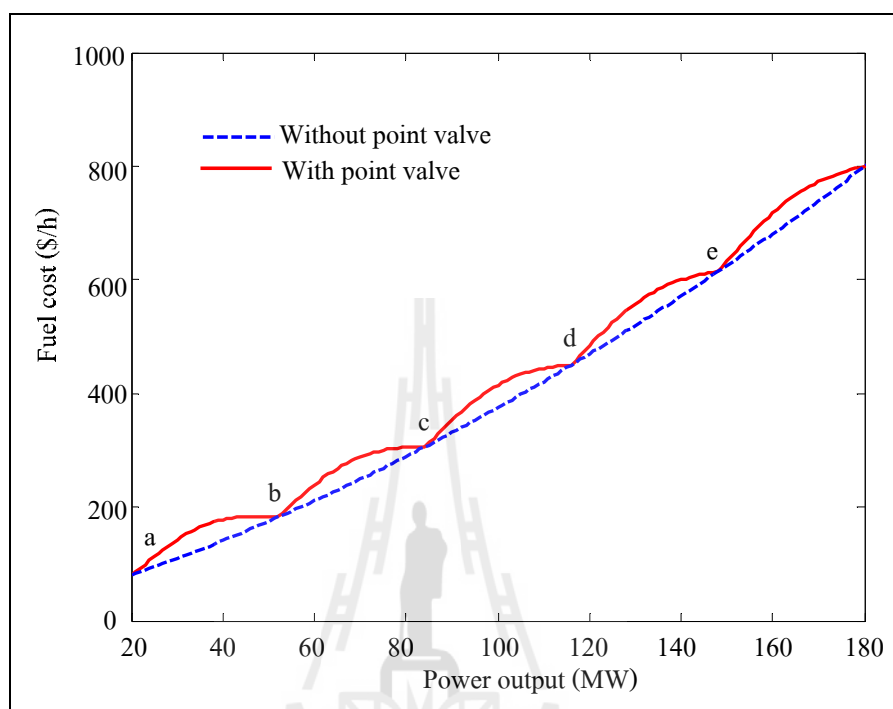
$$f_i(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + |d_i \sin e_i (P_{Gi}^{\min} - P_{Gi})| \quad (3.6)$$

สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรูปของสมการข้างต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องได้ดังนี้

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_G} f_i(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + |d_i \sin e_i (P_{Gi}^{\min} - P_{Gi})|) \quad (3.7)$$

โดยที่	P_{Gi}	คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า i จ่ายเข้าระบบไฟฟ้ากำลัง
	a_i, b_i, c_i, d_i, e_i	คือ สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิง
	N_G	คือ จำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด

ซึ่งสามารถแสดงเป็นรูปกราฟเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบและฟังก์ชันที่มีจุดเปิดควาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบค่าเชื้อเพลิงของสมการกำลังสองกับสมการจุดเปิดควาล์วหลายจุด

จากกราฟรูปที่ 3.2 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงโดยปกติได้มาจากการคำนวณตอนออกแบบหรือจากการทดสอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง เนื่องจากข้อมูลที่ได้มานั้นจะมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงต้องมีการประมาณค่าของข้อมูลให้เป็นกราฟที่มีลักษณะต่อเนื่องและหาอนุพันธ์ได้ง่ายเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้กับระบบไฟฟ้า

- ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟ

การหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้การสูญเสียของระบบไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แรงดันที่มั่นคง ความถี่ บัสอ้างอิง และค่าแท็ปหม้อแปลง จะเป็นตัวแปรควบคุม ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวแปรคงที่ เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้ามีกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุด ซึ่งสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังสมการที่ (3.8)

$$F_{loss} = \sum_{i=1}^{N_l} g_{i,j} \{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad (3.8)$$

โดยที่	F_{loss}	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียในสายส่งทั้งหมด
	N_L	คือ จำนวนสายส่งทั้งหมด
	V_i	คือ ขนาดแรงดันบัสที่ i
	δ_i	คือ มุมแรงดันบัสที่ i
	V_j	คือ ขนาดแรงดันบัสที่ j
	δ_j	คือ มุมแรงดันบัสที่ j
	$g_{i,j}$	คือ ความนำไฟฟ้าจากบัส i ไปยังบัส j

3.4.2 เงื่อนไขบังคับสมการ (Equality Constraint)

สมการข้อจำกัดของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดสะท้อนให้เห็นถึงธรรมชาติของระบบไฟฟ้ากำลังตามสมการการไหลของโหลดคือผลรวมของกำลังไฟฟ้าแต่ละบัสเท่ากับความต้องการของโหลดบวกกับกำลังงานสูญเสียของระบบ ดังนั้น $g(x)$ คือ

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{N_D} P_{Di} - P_{LOSSES} = 0 \quad (3.9)$$

$$(P_{Gi} - P_{Di}) - \sum_{j=1}^{N_B} |Y_{ij} V_i V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (3.10)$$

$$(Q_{Gi} - Q_{Di}) + \sum_{j=1}^{N_B} |Y_{ij} V_i V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (3.11)$$

โดยที่	P_{Gi}	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตที่บัส i
	Q_{Gi}	คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิตที่บัส i
	P_{Di}	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลดต้องการที่บัส i
	Q_{Di}	คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดต้องการที่บัส i
	V_i, δ_i	คือ ขนาดและมุมแรงดันบัสที่ i
	V_j, δ_j	คือ ขนาดและมุมแรงดันบัสที่ j
	Y_{ij}	คือ ขนาดของ Y บัส ระหว่างบัส i ไปบัส j
	θ_{ij}	คือ มุมของ Y บัส ระหว่างบัส i ไปบัส j

N_B คือ จำนวนบัสทั้งหมด
 N_G คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด

3.4.3 เงื่อนไขบังคับอสมการ (Inequality Constraint)

อสมการข้อจำกัดของปัญหาการจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมสะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ขนาดของแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปลี่ยนแท็ปได้ และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลื่อนเฟส ดังนั้น $h(x)$ คือ

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (3.12)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (3.13)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (3.14)$$

$$\delta_i^{\min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{\max} \quad (3.15)$$

$$Q_{comp,i}^{\min} \leq Q_{comp,i} \leq Q_{comp,i}^{\max} \quad (3.16)$$

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad (3.17)$$

โดยที่	$P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$	คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุดและสูงสุด บัสที่ i
	$Q_{Gi}^{\min}, Q_{Gi}^{\max}$	คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่ำสุดและสูงสุด บัสที่ i
	$V_i^{\min}, V_i^{\max}$	คือ ขอบเขตของขนาดแรงดันต่ำสุดและสูงสุด บัสที่ i
	$\delta_i^{\min}, \delta_i^{\max}$	คือ ขอบเขตของมุมแรงดันต่ำสุดและสูงสุด บัสที่ i
	$Q_{comp,i}^{\min}, Q_{comp,i}^{\max}$	คือ ขอบเขตของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุด บัสที่ i
	$T_i^{\min}, T_i^{\max}$	คือ ขอบเขตของแท็ปหม้อแปลงต่ำสุดและสูงสุด บัสที่ i

3.4.4 วิธีการปรับโทษ (Penalty Method)

หลักการของวิธีนี้ คือการแปลงปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ (constraint optimization) ให้เป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ (unconstraint optimization) โดยการแปลงเงื่อนไขบังคับที่เป็นสมการและอสมการเหล่านั้นให้เป็นฟังก์ชันการปรับโทษ โดยอาศัยเทอมของการปรับโทษเป็นตัวปรุงแต่งในการหาค่าของเทอมการปรับโทษ เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับจะต้องเป็นหนึ่งอินพุตเท่านั้น ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P(x) = f(x) + \Omega(x) \quad (3.18)$$

$$\Omega(x) = \rho \{ g^2(x) + [\max(0, h(x))]^2 \} \quad (3.19)$$

โดยที่ $P(x)$ = ฟังก์ชันการปรับโทษ
 $\Omega(x)$ = เทอมของการปรับโทษ
 ρ = ตัวประกอบการปรับโทษ

ถ้าคำตอบสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ $\Omega(x) = 0$ แต่ถ้าคำตอบไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต้องทำการปรับโทษ ซึ่งผลเฉลยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์การปรับโทษ (penalty parameter : ρ) โดยที่ค่าของพจน์การปรับโทษ (ρ) ต้องมีค่าสูง ๆ เพื่อให้คำตอบเข้าสู่จุดคำตอบที่เหมาะสม ดังนั้น การแก้ปัญหาจึงต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์การปรับโทษให้สอดคล้องกับปัญหานั้น ๆ จากนั้นใช้ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาแบบไม่มีเงื่อนไขเพื่อหาคำตอบได้แก่ วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) วิธีคล้ายนิวตัน (Quasi-Newton methods : BFGS) และวิธีการค้นหาความบรรจบกัน (Harmony Search : HS) แล้วดำเนินการปรับค่าพารามิเตอร์การปรับโทษ (ชนิดชัย กุลวรรณิพงษ์, 2550) ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งจุดคำตอบเข้าสู่ค่า ๆ หนึ่ง นั่นก็คือค่าเหมาะที่สุดของปัญหานั้นเอง

3.5 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้ที่กล่าวถึง การไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดคือการวางแผนการทำงานในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยที่ผู้ออกแบบระบบต้องมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังกลุ่มโหลดอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งต้องมีต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสีย

ในระบบต่ำที่สุด ภายใต้การทำงานที่ปลอดภัยในระบบ โดยเป็นการหาจุดทำงานที่เหมาะสมให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ภายใต้เงื่อนไขบังคับทั้งสมการและอสมการ ทำการวางแผนการทำงานในระบบไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความต้องการของโหลดเพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ โดยทำการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แล้วใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 4

การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด

4.1 บทนำ

ในปัจจุบันผู้อุปโภคมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงมากขึ้นจึงทำให้ระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อนสูงมากขึ้น ดังนั้นการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายไปยังโหลดจึงต้องมีการควบคุมระบบไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพและความปลอดภัยต่อผู้ใช้ ซึ่งส่วนใหญ่รูปแบบของปัญหาจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น จึงต้องนำเทคนิคการแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้นมาใช้ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด ซึ่งเป็นการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุดโดยการแทนด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ภายใต้เงื่อนไขบังคับของปัญหา ซึ่งในอดีตนั้นจะใช้หลักการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วจับให้เท่ากับศูนย์ คำตอบที่ได้จึงไม่สามารถรับประกันได้ว่าเป็นจุดต่ำสุดโดยรวม ต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีการหาคำตอบใหม่ ๆ โดยการเลียนแบบธรรมชาติ ซึ่งจะได้คำตอบที่ดีกว่าและเร็วกว่า เนื่องจากความสามารถในการจำลองผลของคอมพิวเตอร์มีความรวดเร็วและสะดวกสบาย ดังนั้นจึงนำการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาความบรรสานซึ่งเป็นการเลียนแบบการประสานเสียงของคนตรีมาใช้ในการแก้ปัญหาเปรียบเทียบกับวิธี BFGS GA และ PSO ดังนี้

4.2 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีคล้ายนิวตัน

(Quasi-Newton methods : BFGS)

วิธีการหาทิศทางกรูเข้าสู่ค่าเหมาะที่สุดมีผลต่อความเร็วในการกรูเข้าสู่คำตอบของปัญหาอย่างมาก วิธีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายวิธีโดยแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่ใช้งาน ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเพียงวิธีคล้ายนิวตัน (Quasi-Newton methods) เท่านั้น (พัฒนา พงศ์จริยา, 2545) วิธีในกลุ่มของวิธีคล้ายนิวตันมีมากมายหลายวิธี แต่ทุกวิธีมีจุดประสงค์เพื่อประมาณค่า $\nabla^2 f(x_k)$ ด้วยเมตริกซ์ B_k ทิศทางการกรูเข้าสู่คำตอบ หาได้จากสมการที่ (4.1)

$$B_k \vec{p}_k = -\nabla f(x_k) \text{ หรือ } \vec{p}_k = -H_k \nabla f(x_k) \quad (4.1)$$

การประมาณค่าของ $\nabla^2 f(x_k)$ เริ่มต้นจาก

$$f''(x_k) \approx \frac{f'(x_k) - f'(x_{k-1})}{x_k - x_{k-1}} \quad (4.2)$$

การประมาณให้เป็นเมตริกซ์ B_k นั้นจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขเซแคนต์ (secant condition) ซึ่งคือ

$$B_k(x_k - x_{k-1}) = \nabla f(x_k) - \nabla f(x_{k-1}) \quad (4.3)$$

เนื่องจากเงื่อนไขนี้ไม่เพียงพอที่จะทำให้ B_k มีเพียงแค่รูปแบบเดียวได้ จึงมีวิธีการหาค่า B_k หลายวิธีในที่นี้จะขอยกตัวอย่างการประมาณหาค่า B_k โดยใช้วิธี BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)

$$B_{k+1} = B_k + \frac{\Delta g_k \Delta g_k^T}{\Delta g_k^T \Delta x_k} - \frac{B_k \Delta x_k \Delta x_k^T B_k}{\Delta x_k^T B_k \Delta x_k} \quad (4.4)$$

การประมาณหาค่า H_k โดยใช้วิธี DFP (Davidon-Fletcher-Powell)

$$H_{k+1} = H_k + \frac{\Delta x_k \Delta x_k^T}{\Delta x_k^T \Delta g_k} - \frac{H_k \Delta g_k \Delta g_k^T H_k}{\Delta g_k^T H_k \Delta g_k} \quad (4.5)$$

โดยที่ $g_k = \nabla f(x_k)$

$$\Delta g_k = g_{k+1} - g_k$$

$$\Delta x_k = x_{k+1} - x_k$$

$$B_k^{-1} = H_k$$

วิธีนี้มีข้อดีคือไม่ต้องหาค่า $\nabla^2 f(x_k)$ หรือ $[\nabla^2 f(x_k)]^{-1}$ ซึ่งใช้เวลานาน โดยวิธีคล้ายกันนี้เป็นวิธีของ fminunc.m ซึ่งเป็นชุดคำสั่งสำเร็จรูปในโปรแกรมแมทแลปที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ

4.3 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms : GA)

วิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีการซึ่งได้รับการพัฒนาโดย Holland และเป็นกระบวนการวิธีหนึ่งสำหรับการหาค่าเหมาะที่สุด ซึ่งมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดแบบดั้งเดิม คือ สามารถแก้ปัญหาในปริภูมิที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuous search space) ได้และไม่จำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหา แต่มีข้อเสียคือ ต้องอาศัยการวนซ้ำคำนวณหลาย ๆ รอบ จึงทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณนาน

วิธีเชิงพันธุกรรมเป็นการเลียนแบบวิวัฒนาการในระดับยีน (ชนิดพืช กุลารวานิชพงษ์, 2550) ทำได้โดยการสร้างกลุ่มประชากรโครโมโซมแทนผลเฉลย โดยการแปลงโครโมโซมให้อยู่ในระบบเลขฐานสอง จากนั้นประชากรในกลุ่มจะแข่งขันกันเพื่อความอยู่รอด โครโมโซมที่ถูกเลือกในแต่ละรุ่นการถ่ายทอด (generation) เท่านั้นที่จะมีสิทธิ์สร้างลูกหลานในรุ่นถัดไป โดยมีหลักการดังนี้ เริ่มจากการสุ่มสร้างประชากรในกลุ่มขึ้น จากนั้นคำนวณค่าความแข็งแรง (fitness) ของประชากรแต่ละตัวจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเปรียบเสมือนกับดัชนีที่ใช้บ่งชี้ถึงความสามารถในการดำรงชีวิตอยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อม จากนั้นทำการเลือกสรรประชากรที่มีความแข็งแรง เพื่อนำมาให้กำเนิดประชากรรุ่นถัดไป การให้กำเนิดประชากรรุ่นใหม่ในกลุ่มจะเกิดจากการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างรุ่นพ่อแม่ที่ได้รับการคัดสรรมาแล้ว โดยอาศัยสมมติฐานที่ว่าเมื่อนำข้อมูลจากรุ่นพ่อแม่ที่มีความแข็งแรงมาผสมกันแล้วย่อมมีโอกาสที่จะได้รุ่นลูกที่มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น ซึ่งคล้ายกับการแลกเปลี่ยนรหัสทางพันธุกรรมของยีน (gene) ของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ จากนั้นนำประชากรรุ่นใหม่ที่เกิดขึ้นไปแทนที่ประชากรเดิมบางตัวหรือทุกตัวในกลุ่ม ทำขั้นตอนเหล่านี้ซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ผลคำตอบที่เป็นค่าเหมาะที่สุด ดังนั้นจึงต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการพื้นฐานก่อนดังนี้

1. การเข้ารหัสโครโมโซม (chromosome encoding)

การเข้ารหัสโครโมโซมเป็นการแปลงเลขฐานสิบให้เป็นเลขฐานสอง ซึ่งใช้หลักการแปลงสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นดิจิทัล โดยการกำหนดให้ตัวแปร x มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง x_{min} ถึง x_{max} แล้วทำการแบ่งช่วงจากจุดขอบทั้งสองเป็น n จุดเท่า ๆ กัน ระยะห่างของข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นส่วน ๆ และสองจุดที่อยู่ติดกันสามารถคำนวณได้จาก $\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{n-1}$ เนื่องจากใช้

เลขฐานสอง จะได้ว่า $n = 2^m$ ดังนั้น $\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{2^m - 1}$ เมื่อ m = จำนวนบิตของชุดข้อมูล

2. การดำเนินการทางสายพันธุ์ (genetic operator)

การดำเนินการทางสายพันธุ์เป็นการนำเอาสตริงโครโมโซมตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไปมากระทำกัน ซึ่งสามารถนำมากระทำกันได้ 2 วิธีดังนี้

- ครอสโอเวอร์ (cross over)

การครอสโอเวอร์เป็นการนำเอาชิ้นส่วนโครโมโซมมาแลกเปลี่ยนกันดังนี้

$$\text{Chrom 1} = 101001101101$$

$$\text{Chrom 2} = 001111100011$$

ซึ่งการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนโครโมโซมด้วยวิธีการครอสโอเวอร์มีหลายรูปแบบ แต่ในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะการครอสโอเวอร์จุดเดียวอย่างง่าย โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ทำการสุ่มตำแหน่งที่เป็นจุดแบ่งของโครโมโซม

$$\text{Chrom1} = \underbrace{10100}_{a_1} - \underbrace{1101101}_{a_2}$$

$$\text{Chrom2} = \underbrace{00111}_{b_1} - \underbrace{1100011}_{b_2}$$

- ทำการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วน Chrom 1 กับ Chrom 2 จะได้ว่า

$$\text{Chrom3} = \underbrace{10100}_{a_1} - \underbrace{1100011}_{b_2} = 101001100011$$

$$\text{Chrom4} = \underbrace{00111}_{b_1} - \underbrace{1101101}_{a_2} = 001111101101$$

- การผ่าเหล่า (mutation)

ขั้นตอนนี้จะเปรียบเหมือนการผ่าเหล่าของสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้กับประชากรที่เกิดขึ้นใหม่เท่านั้น โดยทำการปรับเปลี่ยนข้อมูลของบิตสตริงตำแหน่งใด ๆ หรือหลายตำแหน่งเพื่อให้ข้อมูลมีค่าเปลี่ยนไปจากเดิม ทำให้ได้สายพันธุ์ที่มีรหัสเป็นเลขฐานสองแตกต่างไปจากเดิม ดังนี้ คือ $\text{Chrom1} = 101001101101$

ในการปรับเปลี่ยนข้อมูลของบิตสตริง ทำได้โดยการสุ่มตำแหน่งบิตที่จะเกิดการผ่าเหล่า เช่น Chrom1 กำหนดให้เกิดการผ่าเหล่าที่ตำแหน่งบิตที่ 7 นั่นก็คือ รหัสเลขฐานสองที่ตำแหน่งดังกล่าวต้องถูกเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมดังนี้

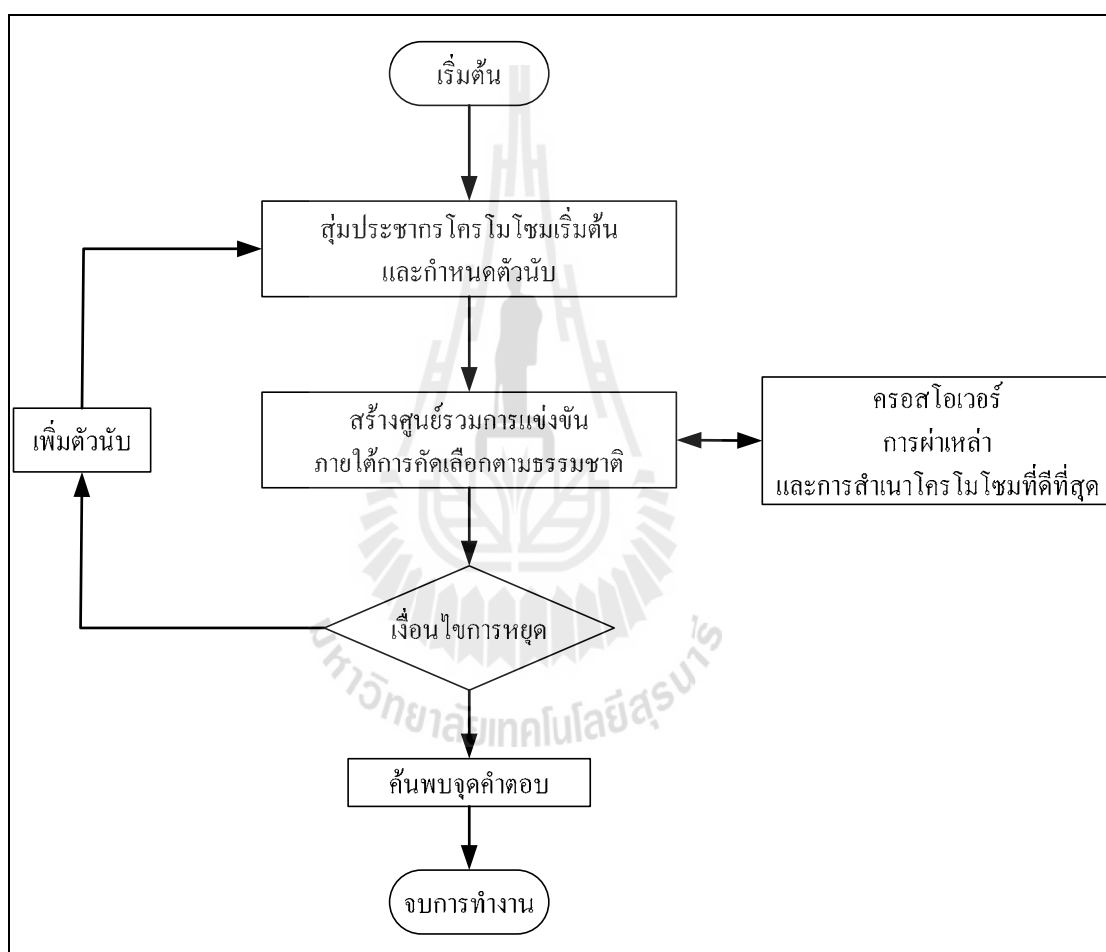
$$\text{Chrom1} = 101001101101$$

$$\text{Chrom2} = 101001001101$$

3. การคัดเลือกสายพันธุ์ (genetic selection)

การเลือกสรร (selection) เป็นขั้นตอนสำหรับเลือกประชากรเพื่อใช้ในการให้กำเนิดประชากรรุ่นถัดไป โดยในขั้นตอนแรกจะต้องหาค่าความแข็งแรง (fitness) ของประชากรแต่ละตัวในกลุ่มจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้นจึงเลือกประชากรเพื่อนำมาใช้ในการกำเนิดรุ่นถัดไป โดยการเลือกสรรแต่ละวิธีจะอยู่ในหลักการที่ว่าประชากรที่มีความแข็งแรงมากกว่าย่อมมีโอกาส

ได้รับการคัดเลือกเพื่อนำไปให้กำเนิดรุ่นถัดไปมากกว่า โดยมีหลักการคัดเลือกสายพันธุ์ คือใช้หลักความน่าจะเป็นมาเป็นตัวช่วย ซึ่งโครโมโซมแต่ละชุดจะมีโอกาสที่จะอยู่รอดสร้างรุ่นถัดไปได้ไม่เท่ากัน โดยจะใช้การวัดค่าความเหมาะสมของการอยู่รอดด้วยค่าความฟิต (fitness value) การคัดเลือกสายพันธุ์ทำได้หลายวิธี เช่น แผนการวงล้อรูเล็ตต์ (roulette-wheel scheme) หรือแผนภาพทัวร์นาเมนต์ (tournament scheme) เป็นต้น ซึ่งวิธีเชิงพันธุกรรมมีขั้นตอนดังแผนภาพรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรม

4.4 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีฝูงอนุภาค

(Particle Swarm Optimization : PSO)

วิธีฝูงอนุภาคเป็นการจำลองโครงสร้างของกลุ่มสิ่งมีชีวิต ได้แก่ ฝูงผึ้ง ฝูงปลา ฝูงนก และอาณานิคมมด เป็นต้น ซึ่งการรวมกลุ่มทางสังคมของสิ่งมีชีวิตเพื่อวัตถุประสงค์บางประการ เช่น การหาอาหารเพื่อการอยู่รอดของกลุ่ม ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยผลักดันให้ประชากรส่วนใหญ่ในกลุ่มหรือสังคมมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกัน โดยมีหลักการดังนี้ ยกตัวอย่าง การล่าเหยื่อของฝูงนก ซึ่งนกหนึ่งตัวนำเสนออนุภาคหนึ่งตัวในการค้นหาเหยื่อ นกทั้งฝูงจะบินไปหาอาหารในทิศทางเดียวกันนกที่อยู่ใกล้แหล่งอาหารมากที่สุด (มีความฟิตดีที่สุด) จะมีระยะห่างของฝูงกับแหล่งอาหารน้อยที่สุด ดังนั้นกลยุทธ์ที่ดีที่สุด คือ นกตัวที่เหลือน้อยต้องเคลื่อนตามนกตัวดังกล่าว การจำลองฝูงอนุภาคจะอาศัยหลักการ กำหนดอนุภาคแทนผลเฉลยพร้อมทั้งทำการประเมินค่าความฟิตคุณสมบัติที่สำคัญในการจำลองการหาอาหารของฝูงนก ได้แก่ เวกเตอร์ความเร็ว (particle's velocity) ของอนุภาคแต่ละตัวใช้เป็นตัวกำหนดทิศทางในการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค อนุภาคทุกตัวในฝูงจะต้องทำการปรับทิศทางให้สอดคล้องกับอนุภาคตัวที่มีค่าความฟิตดีที่สุด ซึ่งจะช่วยให้ฝูงอนุภาคมีทิศทางการเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าเหมาะที่สุด (ชนิดชัย กุลรวานิชพงษ์, 2550)

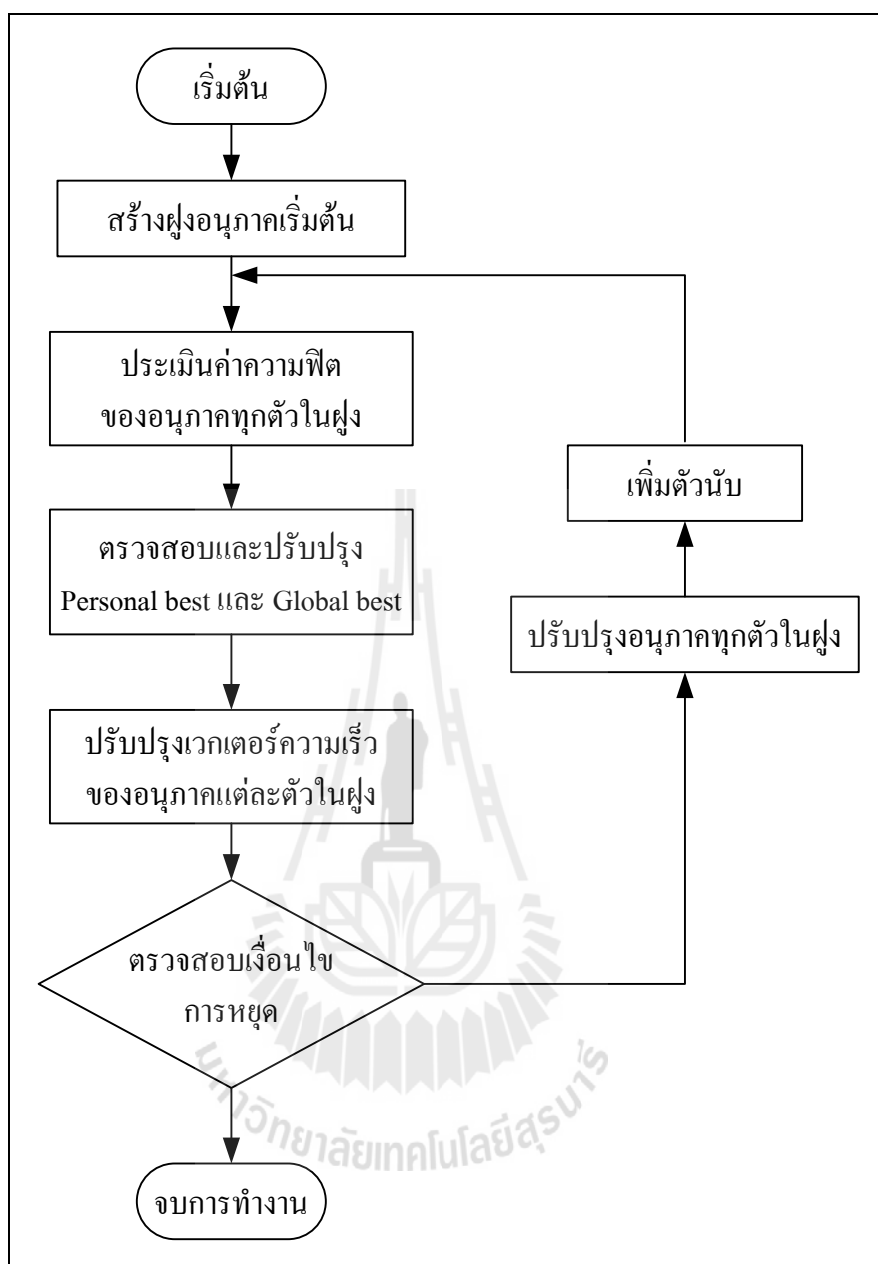
กำหนดให้ฝูงอนุภาคที่พิจารณาประกอบด้วยอนุภาคทั้งหมด n ตัว อนุภาคแต่ละตัวจะได้รับการปรับปรุงระหว่างกระบวนการวนรอบโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + v_i^{(k+1)} \quad (4.6)$$

$$v_i^{(k+1)} = v_i^{(k)} + \alpha_i(x_i^{lbest} - x_i^{(k)}) + \beta_i(x_i^{gbest} - x_i^{(k)}) \quad (4.7)$$

โดยที่ $x_i^{(k)}$ = อนุภาคผลเฉลยตัวที่ i ในการคำนวณรอบที่ k
 $v_i^{(k)}$ = เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคตัวที่ i ในการคำนวณรอบที่ k
 α_i, β_i = ตัวเลขสุ่มแบบสม่ำเสมอ (Uniform random) ในช่วง $[0,1]$
 x_i^{lbest} = ค่าตอบที่ดีที่สุดในอนุภาคตัวที่ i ค้นพบ (Personal best)
 x^{gbest} = ค่าตอบที่ดีที่สุดในฝูงอนุภาคค้นพบ (Global best)

โดยสามารถเขียนเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนผังการทำงานของวิธีฝูงอนุภาค

4.5 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดซึ่งเป็นการเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมกับระบบทดสอบนั้น ๆ โดยการแปลงรูปแบบปัญหาให้เป็นปัญหาค่าต่ำสุด โดยแทนด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ภายใต้เงื่อนไขบังคับของระบบที่นำมาทดสอบ แล้วทำการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี BFGS GA และ PSO โดยเปรียบเทียบกับวิธี HS ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหาที่ต้องการหาค่าเหมาะที่สุดว่าเหมาะสมกับวิธีไหน แล้วดูสมรรถนะของแต่ละวิธีที่ใช้ในการหาค่าเหมาะที่สุดเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาความบรรสาน ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป



บทที่ 5

วิธีการค้นหาความบรรสาน

5.1 บทนำ

การหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้เทคนิคปัญหาประติมากรรม เป็นการจำลองรูปแบบการคำนวณตามปรากฏการณ์ธรรมชาติ ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้กับการหาค่าเหมาะที่สุดที่มีความซับซ้อนที่เป็นปัญหาแบบมัลติโมดอล (multimodal problem) โดยมีจุดต่ำสุดหลายจุดในปริภูมิค้นหา และมีความไม่เป็นเชิงเส้น การค้นหาผลเฉลยจากปริภูมิ (search space) ขนาดใหญ่แบบนี้ทำได้ยาก (ปรเมศ อิงสุวรรณ และ สมชาติ จิรวิภากร, 2551) ดังนั้นจึงมีการนำเทคนิคปัญหาประติมากรรม หรือเทคนิคอันชาญฉลาดมาใช้ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดกันอย่างแพร่หลาย ถึงแม้ว่าเทคนิคเหล่านี้จะใช้เวลาในการหาคำตอบนาน แต่ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีทันสมัยอย่างคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น ทำให้การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยเทคนิคปัญหาประติมากรรมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งเทคนิคทางปัญหาประติมากรรมมีหลายวิธี เช่น วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) การอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing : SA) อาณาจักรมด (Ant Colony Optimization : ACO) กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) และ การค้นหาความบรรสาน (Harmony Search : HS) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการค้นหาความบรรสาน (Harmony Search) มาใช้ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดซึ่งเป็นวิธีใหม่และยังไม่ค่อยใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งวิธีนี้ใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างเร็วและมีขั้นตอนวิธีน้อย

5.2 โครงสร้างของวิธีการค้นหาความบรรสาน

โครงสร้างของวิธีการค้นหาความบรรสานเป็นการเลียนแบบธรรมชาติของเครื่องดนตรีซึ่งประกอบด้วยประวัติความเป็นมาดังนี้

5.2.1 ประวัติความเป็นมาของดนตรี

ความเป็นมาของดนตรีตั้งแต่สมัยโบราณนั้นดนตรีเป็นศิลปะของการใช้เสียง ซึ่งถ้าไม่มีการจดบันทึกไว้เสียงเหล่านั้นย่อมสูญหายไปอย่างแน่นอน และเนื่องจากการจดบันทึกทางดนตรีนับได้ว่าไม่เคยมีมาก่อน การรู้จักใช้อักษรหรือสัญลักษณ์อื่น ๆ เพิ่งจะมีปรากฏและเริ่มนิยมใช้กันในสมัยเริ่มต้นของยุคกลาง อยู่ในช่วงระหว่างคริสต์ศตวรรษที่ 5-6 และการบันทึกนั้น

มีแต่เพียงเครื่องหมายแสดง “ระดับของเสียง” และ “จังหวะ” คนตรีเกิดขึ้นมาในโลกพร้อม ๆ กับมนุษย์เราในยุคแรก ๆ มนุษย์ยังอาศัยอยู่ในป่า ในถ้ำ แม้แต่ในโพรงไม้ก็รู้จักการร้องรำทำเพลงตามธรรมชาติ เช่น รู้จักการปรบมือ เคาะหิน เคาะไม้ เป่าปาก เป็นต้น พร้อมกันนั้นได้มีการเปล่งเสียงร้องออกมาด้วย การร้องรำทำเพลงของมนุษย์ ในยุคนั้นทำไปเพื่ออ้อนวอนพระเจ้า เพื่อช่วยให้ตนพ้นภัย บันดาลความสุขความเจริญต่าง ๆ ให้แก่ตน หรือเพื่อเป็นการบูชาแสดงความขอบคุณพระเจ้าที่บันดาลให้ตนมีความสุขความสบาย โลกได้ผ่านมาหลายยุคหลายสมัย คนตรีมีการวิวัฒนาการไปตามความเจริญของยุคสมัยและความคิดสร้างสรรค์ของมนุษย์ เครื่องดนตรีในสมัยเริ่มแรกที่เคยใช้ก็ได้วิวัฒนาการมาเป็นขั้น ๆ กลายเป็นเครื่องดนตรี ดิด สี ดี เป่า ที่เราเห็นกันอยู่ในปัจจุบัน เพลงที่เคยร้องเพื่ออ้อนวอนพระเจ้าจึงกลายมาเป็นเพลงสวดทางศาสนาและเพลงร้องโดยทั่ว ๆ ไป เป็นต้น ในระยะแรกนั้น คนตรีมีอยู่เพียงเสียงเดียวและแนวเดียวเท่านั้นเรียกว่า ทำนอง ไม่มีความบรรสาน เมื่อเวลาผ่านไปหลายคริสต์ศตวรรษ จนถึงคริสต์ศตวรรษที่ 12 มนุษย์เราจึงเริ่มรู้จักการนำเครื่องดนตรีชนิดต่าง ๆ มาผสมผสานกันจนเกิดเป็นความบรรสาน

5.2.2 ยุคของคนตรี

ยุคแรก (polyphonic period) เริ่มตั้งแต่ ปี ค.ศ.1200 ถึง ค.ศ.1650 จะเรียกกันว่า ยุคโพลิโฟนิค ได้มีการพัฒนาขึ้นเรื่อย ๆ จนมีแบบฉบับและมีหลักในการเรียนวิชาคนตรีมีโรงเรียนสอนคนตรี ยุคนี้จะเริ่มมีวงดนตรีเกิดขึ้นมากพอสมควร วงดนตรียุคนี้ส่วนมากจะเล่นในโบสถ์หรือตามบ้านเจ้านาย เป็นต้น

ยุคบาโรก (baroque period) เริ่มตั้งแต่ ปี ค.ศ.1650 ถึง ค.ศ.1750 เพลงในยุคนี้ค่อนข้างเป็นแบบแผนเน้นรูปแบบในการแต่ง เช่น แคนตาตา (เพลงศาสนา) ทอคคาตา เฟอร์ลิด์ และ ฟิวก์ อินเวนชัน คอนแชร์โต เป็นต้น คีตกวีที่สำคัญได้แก่

Handel นักแต่งเพลงเอกชาวเยอรมันที่ย้ายไปอยู่ที่อังกฤษ ท่านได้แต่งเพลงไว้มากมาย ที่สำคัญได้แก่ เพลงสวด เพลงศาสนาต่าง ๆ และเพลงที่ใช้ในพิธีกรรม

Bach นักแต่งเพลงเอกชาวเยอรมัน ผู้สร้างผลงานไว้มากมาย เพลงประเภทคีย์บอร์ดของ Bach เป็นผลงานชิ้นสำคัญที่นักเปียโนทุกคนต้องฝึกฝนได้แก่ เฟอร์ลิด์และ ฟิวก์ อินเวนชัน 2 ส่วน อินเวนชัน 3 ส่วน (ซินโฟเนีย ต่อมาเป็นแนวทางของการวางรูปแบบซิมโฟนี) เพลงของ Bach นั้นเป็นแบบฝึกหัดที่ดีมากและจะฝึกฝนเทคนิคของผู้เล่นได้ดี (เพลงของ Bach ได้สาบสูญไปจน Mendelssohn ได้มาค้นพบแล้วเรียบเรียงขึ้นเป็นต้นฉบับอีกครั้ง)

ยุคคลาสสิก (classical period) เริ่มตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1750 ถึง ค.ศ. 1820 เพลงของยุคนี้ค่อนข้างเป็นแบบแผน และได้รับการพัฒนาจากยุคบาโรก เช่น เพลงประเภท ซิมโฟนี โซนาตา โซนาตিনา แพนดาเซีย เซอระเนด และ คอนแชร์โต Mozart นักแต่งเพลงเอกชาวออสเตรีย

ผู้แต่งเพลงไว้มากมาย ลักษณะเพลงของโมสาร์ทค่อนข้างสดใส และสนุกสนาน ฟังง่าย เป็นที่นิยมเล่นกันอย่างมาก เพลงเปียโนที่สำคัญ ได้แก่ โซนาตา คอนแชร์โต

Hydn ท่านเป็นเพื่อนรักกับโมสาร์ทซึ่งได้ชื่อว่าเป็นราชาแห่งซิมโฟนีเพราะท่านแต่งซิมโฟนีไว้มากมาย และท่านเป็นผู้ที่วางรูปแบบมาตรฐานของวงออเคสตราที่ใช้มาจนถึงปัจจุบัน

Beethoven นักแต่งเพลงเอกชาวเยอรมัน ช่วงแรกของชีวิตท่านได้แต่งเพลงแบบคลาสสิก แต่ช่วงท้ายท่านได้แต่งเพลงแนวโรแมนติก เพลงที่สำคัญของท่านได้แก่ โซนาตาเปียโนคอนแชร์โตทั้ง 5 ซิมโฟนีทั้ง 9 และเพลงต่าง ๆ ที่ทรงคุณค่าอย่างมาก

ยุคโรแมนติก (romantic period) เริ่มตั้งแต่ ปี ค.ศ.1820 ถึง ค.ศ.1900 เพลงของยุคนี้จะแสดงให้เห็นภาพชัดเจน และไม่มุ่งเน้นถึงแบบแผนกฎเกณฑ์อะไรมากนัก นักแต่งเพลงที่สำคัญได้แก่ Schubert นักแต่งเพลงชาวเยอรมัน ท่านแต่งเพลงที่มีคุณค่าไว้มากมาย ได้แก่ ซิมโฟนีต่าง ๆ โซนาตา และเพลงร้องที่มีความไพเราะ

Chopin นักแต่งเพลงเอกชาวโปแลนด์ ท่านเป็นนักเปียโนเอกที่เก่งมาก แต่งเพลงเปียโนที่หวานซึ่งไว้มากมาย เนื่องจากท่านเป็นคนรักชาติมาก จึงได้แต่งเพลงที่แฝงสำเนียงโปลเอาไว้ด้วย และเพลงอื่น ๆ ที่มีความไพเราะของท่าน เช่น วอลทซ์ มะเซอคะ เฟรลลิด์ แพนตาเซียเอทูด (เพลงฝึกหัด) น็อกเทิร์น เป็นต้น

Liszt นักแต่งเพลงเอกชาวฮังการี ท่านเป็นผู้ที่ให้ความอุปการะแก่นักแต่งเพลงต่าง ๆ มากมาย เช่น ตอนที่โชแปงอพยพมาฝรั่งเศสใหม่ ๆ ท่านได้ทำให้โชแปงแจ้งเกิดและท่านก็เป็นผู้รับรองต่อศาลให้ โรเบิร์ต-คลารา ชูมานน์ ได้แต่งงาน และยังเป็นผู้อุปการะวากเนอร์อีกด้วย ท่านได้แต่งเพลงต่าง ๆ ไว้มากมายและได้วางรูปแบบเพลงใหม่ ๆ เช่น กรีนินซ์ซิมโฟนิค และท่านได้แต่งเพลงที่เป็นเพลงสมัยใหม่ เพลงที่สำคัญได้แก่ โซนาตา น็อกเทิร์นแรพโซดี เอทูด วอลทซ์ คอนแชร์โต นักแต่งเพลงที่สำคัญอื่น ๆ ยังมีอีก เช่น Brahms and Schumann เป็นต้น

ยุคใหม่ (modern period) เริ่มตั้งแต่ ปี ค.ศ.1900 ถึง ปัจจุบัน เพลงยุคนี้มีหลายประเภท ได้แก่ ประเภทอิมเพรสชัน ที่นำความประทับใจให้แก่ผู้ฟัง เพลงยุคนี้เน้นถึงความเป็นจริง ถ่ายทอดออกมาชัดเจน บางทีอาจมีการประชดประชันสังคม นักแต่งเพลงที่สำคัญได้แก่

Debussy ผู้แต่งบทเพลงอิมเพรสชันไว้มากมาย เช่น เพลงแสงจันทร์ (clair de lune) ทะเล (la mer)

Ravel ผู้แต่งเพลงนางพรายน้ำ (on dien) และท่านได้นำผลงานแสดงรูปภาพของมุสซอกกีมาทำเป็นเวอร์ชันออเคสตราได้อย่างสวยงาม

Tchaikovsky ผู้แต่งเปียโนคอนแชร์โตที่ไพเราะสวยงามที่สุดบทหนึ่งให้แก่โลก และยังมีผลงานบัลเลต์อีกมากมาย เช่น นัทแครคเคอะ (the nutcracker) สวอน เล็ค (swan lake)

Rachmaninov ผู้ที่แต่งเพลงเปียโนอันสง่างามให้ความรู้สึกขรึมปนหวาน และเศร้าไว้อย่างมากมาย

องค์ประกอบของดนตรีของมนุษย์ทุกชาติทุกภาษา ต่างมีเอกลักษณ์ของตนเอง ซึ่งได้รับการถ่ายทอดจากคนรุ่นหนึ่งสู่คนอีกรุ่นหนึ่ง ได้รับการพัฒนาเปลี่ยนแปลงไปตามสังคม วัฒนธรรมของชาตินั้น ๆ ดนตรีของชาติใดจะมีความไพเราะ งดงามอย่างไร ธรรมชาติของดนตรี จะต้องมียุคประกอบที่สำคัญอย่างน้อย 4 ประการ ดังนี้

1. เสียงดนตรี (tone) เป็นเสียงที่มีการนำมาเรียบเรียงจัดระบบให้ได้สัดส่วน มีความกลมกลืนกัน ไม่ว่าจะเป็นเสียงที่เกิดจากธรรมชาติหรือมนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้น เช่น เสียงลม เสียงฝน เสียงระเบิดหรือเสียงเครื่องดนตรี ถ้าไม่มีการนำมาจัดเรียบเรียงให้ไพเราะสวยงามแล้วไม่ถือว่าเป็นเสียงดนตรีโดยทั่วไปเสียงดนตรีจะเกิดจากเสียงของเครื่องดนตรี และเสียงร้องเพลงของมนุษย์ เสียงของดนตรีจะมีความไพเราะน่าฟังเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับทักษะการเรียบเรียงเสียงประสานของศิลปินทางด้านดนตรี

2. ทำนอง (melody) หมายถึง เสียงต่ำ เสียงสูง เสียงสั้น เสียงยาว เสียงทุ้มของดนตรีหรือบทเพลงทำนองของดนตรี หรือทำนองของบทเพลงแต่ละเพลงนั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความประสงค์ของผู้ประพันธ์เพลงว่าต้องการที่จะให้บทเพลงนั้น ๆ มีทำนองเป็นไปในรูปแบบใด เช่น ทำนองที่ฟังแล้วเศร้าสร้อย โหยหวน คึกคัก เข้มแข็ง เป็นต้น

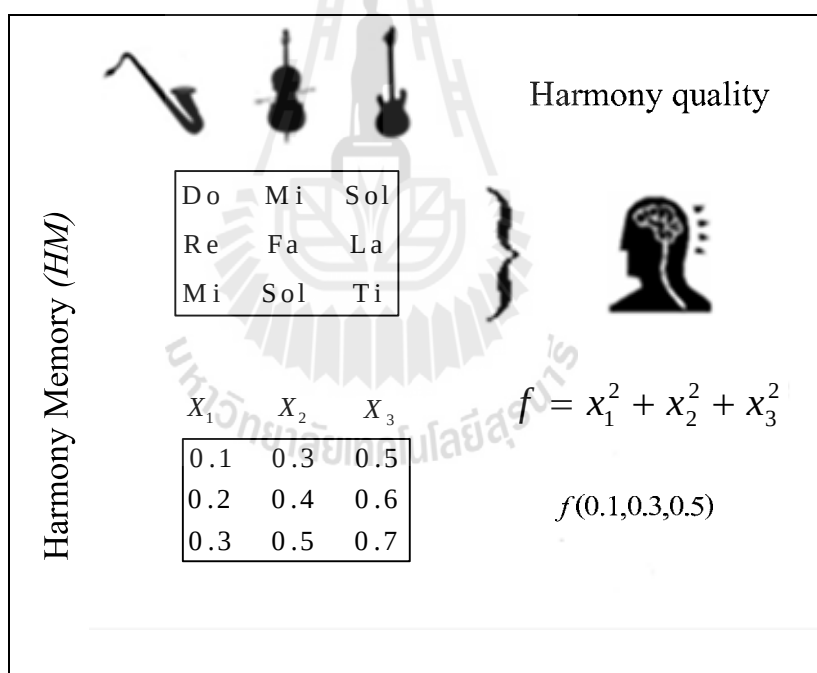
3. จังหวะ (rhythm) หมายถึง การเคลื่อนไหวของทำนองเพลง อาจกำหนดไว้เป็นช้าหรือเร็วต่าง ๆ กัน เช่น เพลงจังหวะช้า เพลงจังหวะเร็ว ซึ่งจังหวะจะบอกถึงลีลา อารมณ์ของบทเพลงนั้น ๆ ในทางดนตรี การกำหนดความสั้นยาวของเสียงที่มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการร้องเพลงหรือเล่นดนตรีจะต้องมีจังหวะเป็นเกณฑ์ ถ้าร้องเพลงหรือเล่นดนตรีไม่ตรงจังหวะจะไม่มีไพเราะเท่าที่ควร ในกรณีที่ร้องเพลงหรือเล่นดนตรีหลายคนในเพลงเดียวกัน และต้องการร้องเพลงหรือเล่นดนตรีพร้อมกัน ต้องใช้จังหวะเป็นตัวกำกับเพื่อที่จะให้การร้องเพลงหรือการเล่นดนตรีออกมาในลักษณะที่พร้อมเพรียงกัน และผสมกลมกลืนกันอย่างเหมาะสม

4. ความบรรสาน (harmony) หมายถึง การเรียบเรียงนำเสียงของเครื่องดนตรีแต่ละเครื่องและเสียงร้องเพลงของมนุษย์ที่มีระดับเสียงต่างกัน เปล่งเสียงออกมาพร้อมกัน โดยเสียงที่เปล่งออกมานั้นจะต้องผสมผสานกลมกลืนกัน มีสัดส่วนน้ำหนักความดัง เบา ของเครื่องดนตรีแต่ละเครื่องรวมทั้งเสียงร้องที่ฟังแล้วผสมกลมกลืน เกิดความไพเราะงดงามของเสียง ความบรรสาน

จะต้องบรรสานกับแนวทำนองหลักหรือแนวทำนองนำของบทเพลงนั้น ๆ ได้อย่างผสมผสานกลมกลืนกันและสอดคล้องกันได้อย่างดี

ความบรรสาน (harmony) เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ทำให้ดนตรีมีความไพเราะและเกิดความสมบูรณ์ ความบรรสาน คือ ตัวโน้ตดนตรี โด เร มี ฟา ซอล โดยมีหลักการคือหาตัวโน้ตที่เหมาะสมกับเครื่องดนตรีแต่ละชนิดเพื่อนำมาเรียบเรียงเสียงของเครื่องดนตรีแต่ละเครื่องที่มีระดับเสียงต่างกันให้สอดคล้องกัน และเกิดความไพเราะ ความบรรสานคิดค้นโดย Geem, Z.W. (2001) โดย สนใจในการเล่นดนตรี และฝึกฝนที่จะเป็นนักดนตรี ได้แนวคิดจากการแต่งเพลงของนักดนตรี ในการหาตัวโน้ตที่เหมาะสมสำหรับเครื่องดนตรีแต่ละชนิดในการเล่นเป็นวงดนตรีเพื่อให้เกิดความไพเราะ

ความบรรสานเป็นการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นวิธีที่ใหม่ โดยใช้กระบวนการเล่นดนตรีประสานเสียงในการค้นหาคำที่เหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบระหว่างความบรรสานและการหาคำที่เหมาะสมที่สุด

ซึ่งวิธีค้นหาความบรรสานเป็นการหาคำที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (global optimum) ซึ่งจะได้คำตอบที่เป็นจุดต่ำที่สุด การจำลองความบรรสานของเครื่องดนตรี (Geem, Z.W., Lee, K.S., and Park, Y., 2005) ใช้หลักการหาตัวโน้ตที่เหมาะสมสำหรับเครื่องดนตรีแต่ละชนิด ในการเล่น

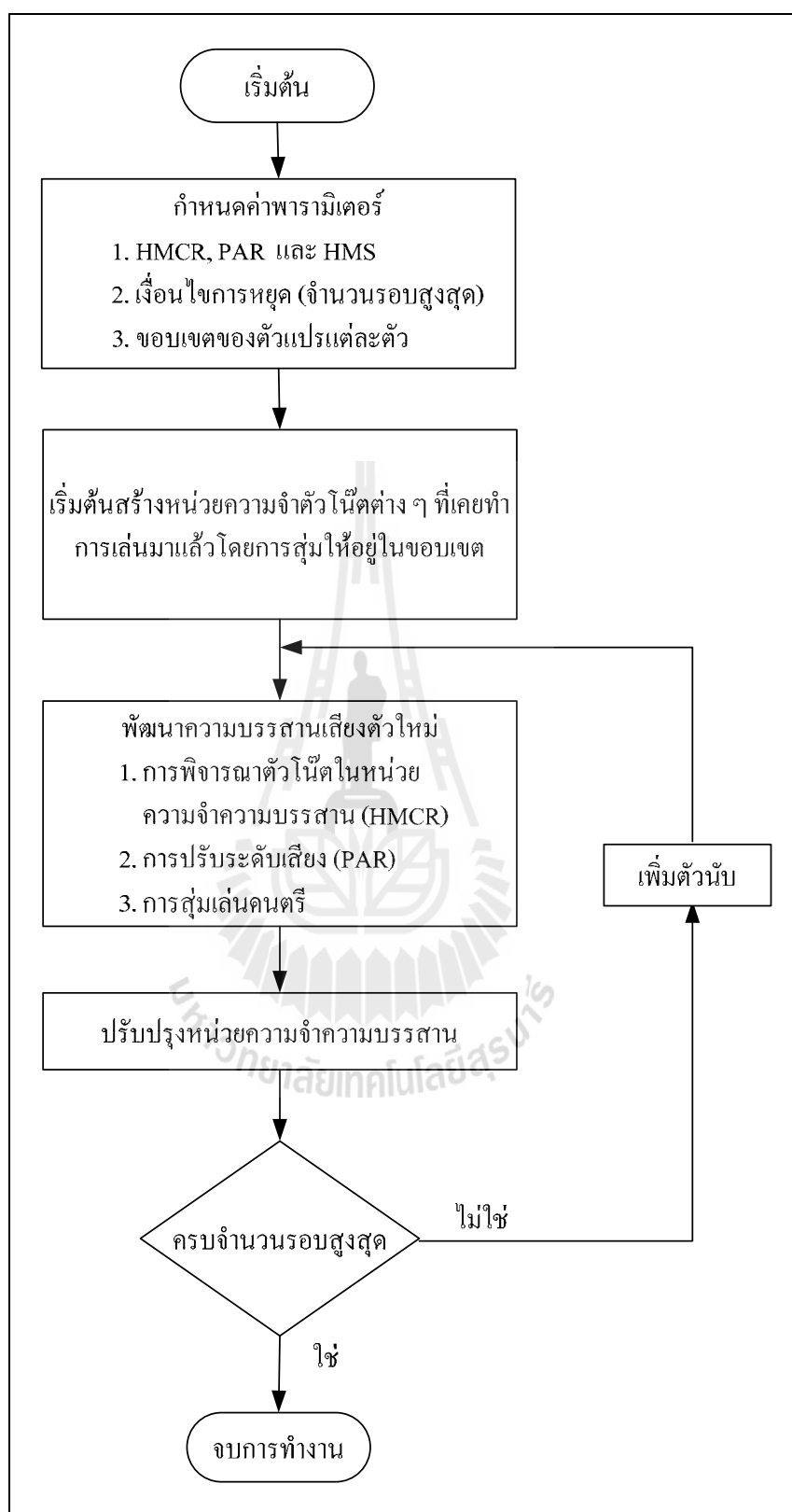
เป็นวงดนตรี โดยสามารถเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของวิธีค้นหาความบรรสานกับการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์วิธีค้นหาความบรรสานกับการหาค่าเหมาะที่สุด

วิธีค้นหาความบรรสาน	การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด	ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด
เครื่องดนตรี	ตัวแปรตัดสินใจ (ค่าที่ต้องการทราบ)	ค่า P_G, Q_G, V, Q_C, T ที่เหมาะสมที่สุด
ขอบเขตระดับเสียง	ขอบเขตตัวแปร	$A_{min} = [P_G^{min}, Q_G^{min}, V_i^{min}, Q_C^{min}, T_i^{min}]$ $A_{max} = [P_G^{max}, Q_G^{max}, V_i^{max}, Q_C^{max}, T_i^{max}]$
การประสานเสียง	นำตัวแปรตัดสินใจที่ได้แทน ลงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์	นำค่า P_G แทนลงในฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิง
ความไพเราะ	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่ำที่สุด	ต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด
การฝึกซ้อม	จำนวนรอบ	จำนวนรอบสูงสุดที่ตั้ง ไว้ใน การค้นหาคำตอบ
ตัวโน้ตที่ได้จาก ประสบการณ์ ในการเล่นดนตรี	เมตริกซ์ของค่า คำตอบที่ต้องการหา	เมตริกซ์ของค่า P_G, Q_G, V, Q_C, T

ขั้นตอนวิธีของความบรรสานสามารถแบ่งขั้นตอนออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. สร้างหน่วยความจำความบรรสาน (Harmony Memory)
2. พัฒนาความบรรสานตัวใหม่
 - พิจารณาจากหน่วยความจำความบรรสาน
 - ปรับระดับเสียง
 - สุ่มเล่นดนตรี
3. ปรับปรุงหน่วยความจำความบรรสาน

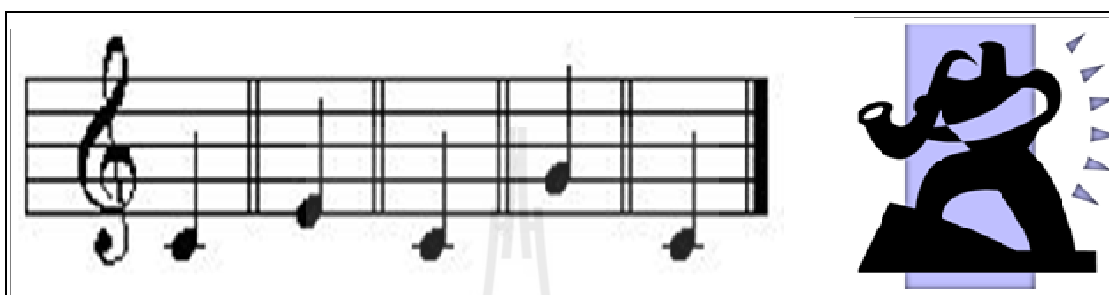


รูปที่ 5.2 แผนผังการทำงานของความบรรสาน

การสร้างขนาดของหน่วยความจำความบรรสาน (Harmony Memory Size : HMS) คือ จำตัวโน้ตต่าง ๆ ที่เคยทำการเล่นมาแล้ว

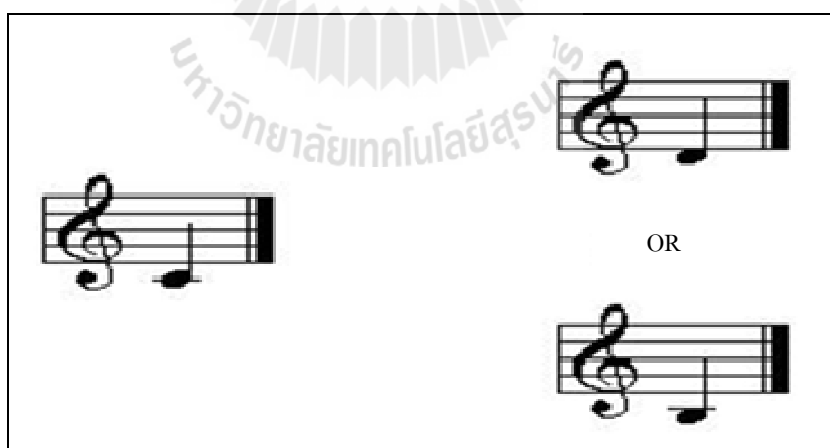
การพัฒนาความบรรสานตัวใหม่มีขั้นตอนดังนี้

1. พิจารณาตัวโน้ตต่าง ๆ ที่เคยทำการเล่นมาแล้ว (Harmony Memory Consideration Rate : HMCR)



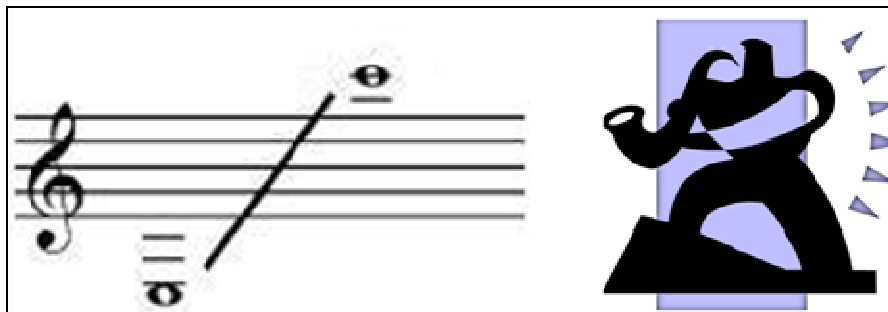
$$\text{รูปที่ 5.3 } x \in \text{ตัวโน้ตที่สนใจ} = \{C4, E4, C4, G4, C4\}$$

2. ปรับระดับเสียง (Pitch Adjustment Rate : PAR)



$$\text{รูปที่ 5.4 } x + \text{or } x -, x \in \text{ตัวโน้ตที่สนใจ}$$

3. สุ่มเล่นดนตรี (random playing)



รูปที่ 5.5 $x \in$ ขอบเขตการเล่น $= \{E3, F3, G3, A3, B3, C4, D4, E4, F4, G4, A4, B4, C5, D6, E6, F6, G6, A6, B6, C7\}$

ทำการเปรียบเทียบ ถ้าความบรรสานตัวใหม่ดีกว่าตัวที่แย่ที่สุดในหน่วยความจำ ความบรรสานจะแทนความบรรสานตัวใหม่ลงในตัวนั้น เมื่อครบกำหนดตามจำนวนความบรรสาน และจำนวนรอบแล้วจะหยุดการทำงาน และเลือกตัวที่ดีที่สุดของทุกความบรรสานมาเป็นคำตอบ

5.3 การประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาความบรรสาน

วิธีความบรรสาน (harmony) คือการใช้แนวทางของนักดนตรีในการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้ การประสานเสียงของเครื่องดนตรีเหมาะสมที่สุด โดยการตัดสินใจจากมาตรฐานหรือระดับความ ไพเราะของคุณภาพเสียงที่เกิดขึ้น (ภาสกร อังกุลานนท์ และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2552) โดยการหาตัวโน้ตที่เหมาะสมกับเครื่องดนตรีแต่ละชนิดเพื่อนำมาเรียบเรียงเสียงของเครื่องดนตรีแต่ละ เครื่องที่มีระดับเสียงต่างกันให้สอดคล้องกัน และเกิดความไพเราะ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้ วิธีการค้นหาความบรรสานในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด และการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสีย ในระบบต่ำที่สุด ซึ่งใช้กระบวนการเล่นดนตรีประสานเสียงในการค้นหาค่าเหมาะที่สุด โดยมีขั้นตอนวิธีของความบรรสานแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรควบคุมดังนี้

1. ขอบเขตของคำตอบ x_i^L และ x_i^U โดยที่ $x_i^L \leq x_i \leq x_i^U$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, N$ เมื่อ N คือ จำนวนตัวแปร

2. กำหนดจำนวนของขนาดหน่วยความจำความบรรสาน (Harmony Memory Size : HMS) ในตอนเริ่มต้น ซึ่งจะมีค่าดังนี้ คือ $10 \leq HMS \leq 100$

3. กำหนดอัตราการพิจารณาหน่วยความจำความบรรสาน (Harmony Memory Consideration Rate : HMCR) $0 \leq HMCR \leq 1$

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} x_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\} \text{ with probability } HMCR \\ x_i \in X_i \text{ with probability } (1-HMCR) \end{cases}$$

4. กำหนดอัตราการปรับระดับเสียง (Pitch Adjustment Rate : PAR) $0 \leq PAR \leq 1$

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} \text{Yes with probability } PAR \\ \text{No with probability } (1-PAR) \end{cases}$$

5. ระยะห่างของตัวโน้ตในหน่วยความจำความบรรสาน

$$b = \frac{(x_U - x_L)}{1000} \quad (5.1)$$

6. กำหนดจำนวนรอบสูงสุด

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างหน่วยความจำความบรรสาน (Harmony Memory : HM) ได้จากสมการที่ (5.2) สำหรับจำตัวโน้ตต่าง ๆ ที่เคยทำการเล่นมาแล้ว โดยการสุ่มให้อยู่ในช่วงขอบเขตที่กำหนด ซึ่งจะได้หน่วยความจำความบรรสานดังสมการที่ (5.3) แล้วทำการประเมินค่าความฟิตจากสมการที่ (5.4) โดยการนำค่า HM มาแทนในฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$HM(j,:) = x_L + (x_U - x_L) \times rand(1, N) \quad (5.2)$$

จะได้หน่วยความจำความบรรสานดังนี้

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$F(j) = f(HM(j,:)) \quad (5.4)$$

เมื่อ $j = 1, 2, 3 \dots, HMS$
 N = จำนวนของตัวแปร
 $Rand$ = การสุ่ม

ขั้นตอนที่ 3 พัฒนาความบรรสานตัวใหม่ดังนี้

1. พิจารณหน่วยความจำความบรรสาน (HMCR) โดยการสุ่มเลือกในหน่วยความจำความบรรสาน (HM) $rand \sim U(0,1)$ เมื่อ $U(0,1)$ คือ การสุ่มค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้า $U(0,1) \leq HMCR$ พิจารณาจากหน่วยความจำความบรรสาน

$$x_{new}(i) = HM(ceil(rand \times HMS), i) \quad (5.5)$$

2. ปรับระดับเสียง (PAR) โดย $\pm b(i)$ ถ้า $U(0,1) \leq PAR$ ทำการปรับระดับเสียง

$$x_{new}(i) = x_{new}(i) + (2 \times rand - 1) \times b(i) \quad (5.6)$$

3. สุ่มเล่นดนตรีโดยให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด

$$x_{new}(i) = x_L(i) + rand \times \{x_U(i) - x_L(i)\} \quad (5.7)$$

ขั้นตอนที่ 4 ปรับปรุงหน่วยความจำความบรรสานทำการเปรียบเทียบ ถ้าตัวโน้ตตัวใหม่

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_N)$ คือว่าตัวที่แย่ที่สุดในหน่วยความจำความบรรสาน (HM) ก็จะแทนตัวโน้ตตัวใหม่ลงในตัวนั้นโดยใช้สมการที่ (5.7) นำค่าตัวโน้ตตัวใหม่ (x_{new}) ที่ได้แทนลงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังสมการที่ (5.8)

$$f_{new} = f(x_{new}) \quad (5.8)$$

จากนั้นหาค่าตัวโน้ตที่แย่ที่สุดในหน่วยความจำความบรรสานเพื่อแทนลงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังสมการที่ (5.9)

$$[f_{worst}, idx_{worst}] = \max (F) \quad (5.9)$$

ทำการเปรียบเทียบฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากตัวโน้ตตัวใหม่กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้มาจากหน่วยความจำความบรรสานดังนี้

$$\text{if } f_{new} < f_{worst}$$

$$HM (idx_{worst}, :) = x_{new}$$

$$F (idx_{worst}) = f_{new}$$

end

ถ้าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากตัวโน้ตตัวใหม่น้อยกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้มาจากหน่วยความจำความบรรสาน นำตัวโน้ตตัวใหม่แทนลงในตัวโน้ตตัวที่แย่ที่สุดที่อยู่ในหน่วยความจำความบรรสาน

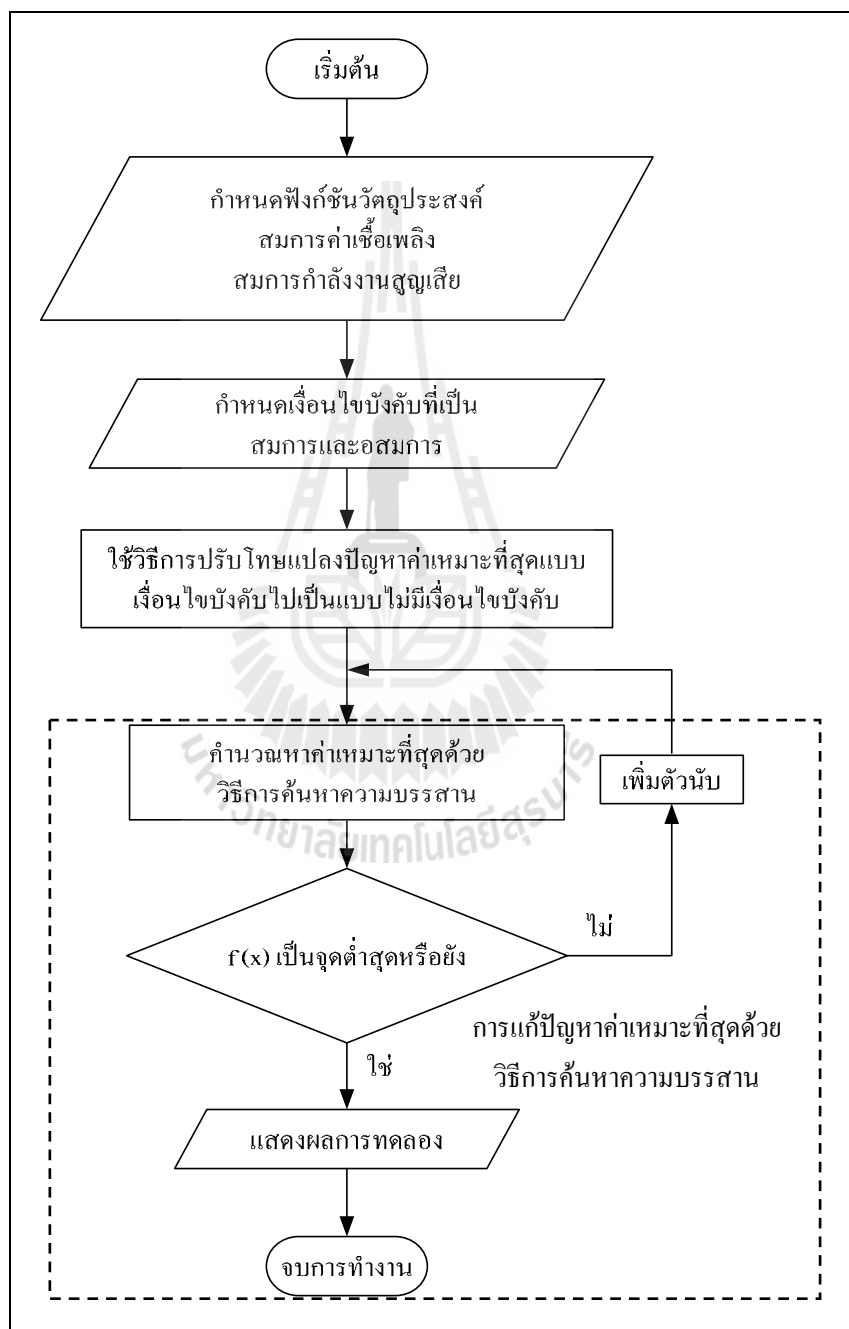
ขั้นตอนที่ 5 เมื่อครบจำนวนรอบสูงสุด ก็จะทำการเลือกค่าต่ำสุดที่อยู่ในหน่วยความจำความบรรสาน (HM) มาเป็นจุดคำตอบดังสมการต่อไปนี้

$$[f_{best}, idx_{best}] = \min (F) \quad (5.10)$$

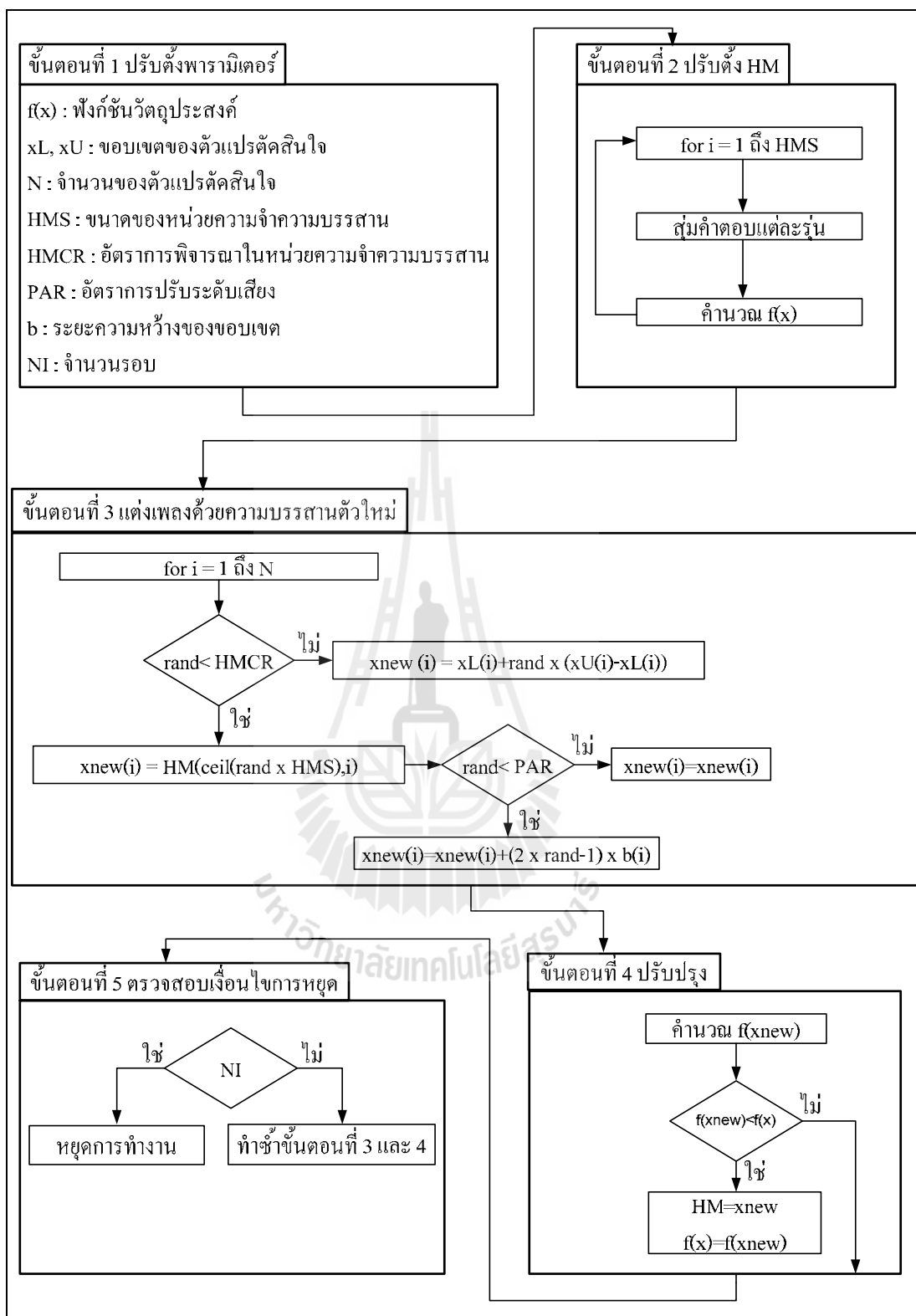
$$x_{best} = HM (idx_{best}, :) \quad (5.11)$$

ดังนั้นจะได้ค่าตัวโน้ตที่เหมาะสมสำหรับเครื่องดนตรีแต่ละชนิด (x_{best}) ก็เปรียบเสมือนค่าที่เหมาะสมที่สุด และนำเครื่องดนตรีแต่ละชนิดมาเล่นประสานเสียงกันเพื่อให้เกิดความไพเราะ (f_{best}) เปรียบเสมือนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่ำที่สุด

ในวิทยานิพนธ์นี้ จะประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาความบรรสานในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยมีเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียในระบบ ภายใต้การทำงานของระบบไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง ซึ่งทำให้ระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ รวมทั้งปลอดภัยต่อผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งแสดงแผนผังการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมของระบบ ได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แผนผังการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม



รูปที่ 5.7 แผนภาพการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน

จากรูปที่ 5.6 และ 5.7 เป็นกระบวนการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีค้นหาความบรรสาน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ระบบฐานข้อมูล (system data) ที่ใช้ในโปรแกรมการคำนวณ ซึ่งเป็นการรับค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาศึกษาประกอบด้วยข้อมูลดังนี้

- busdata : เป็นข้อมูลของแต่ละบัสประกอบด้วย แรงดันบัส มุมของแรงดันบัส กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โหลดของกำลังไฟฟ้าจริง และโหลดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

- ldata : เป็นข้อมูลของสายส่งแต่ละเส้นที่เชื่อมโยงไปยังบัส ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลการเชื่อมโยงระหว่างบัส i ไปยัง บัส j ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่งแต่ละเส้น แอดมิตแตนซ์ครึงสาย ค่าแท็ปหม้อแปลง และพิกัดสูงสุดของสายส่ง

- MVABase : ค่าฐานของกำลังไฟฟ้าปรากฏ
- KVbase : ค่าฐานของแรงดันไฟฟ้า
- Qlimite : ค่าสูงสุดและต่ำสุดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้
- n_PV : จำนวนบัสที่เป็นบัสควบคุม
- Vsch : แรงดันบัส

2. ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 1 โปรแกรมทำการเก็บข้อมูลของระบบทดสอบไว้ใน system data

ขั้นตอนที่ 2 ทำการกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นการจ่ายโหลดอย่างประหยัดและการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ รวมทั้งกำหนดเงื่อนไขบังคับที่เป็นสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าคือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต้องเพียงพอต่อความต้องการของโหลดและสมการเป็นการกำหนดขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการควบคุม ถ้าเป็นการจ่ายโหลดอย่างประหยัดจะทำการควบคุม กำลังไฟฟ้าจริงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แรงดันบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มุมของแรงดันบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าแท็ปหม้อแปลง และตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ส่วนการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะควบคุมแรงดันบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ขั้นตอนที่ 3 ในกรณีที่เป็นการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะทำการหาผลเฉลยแรงดันด้วยวิธีนิวตันราฟสัน ซึ่งจะทำได้กำลังงานสูญเสียของระบบ

ขั้นตอนที่ 4 ทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี HS เปรียบเทียบกับ BFGS PSO และ GA เพื่อหาต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุด โดยใช้ฟังก์ชันการปรับโทเยเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อช่วยต่อการคำนวณและให้เข้าสู่จุดคำตอบได้รวดเร็ว เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

ของแต่ละตัวแปรแล้วนำค่าตัวแปรที่ได้ไปแทนลงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทำจนกระทั่งครบตามจำนวนรอบที่ตั้งไว้ ดังแผนภาพที่ 5.6 โดยทำการสุ่มค่าเริ่มต้นทั้งหมด 30 ครั้ง

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อได้คำตอบที่เหมาะสมแล้ว ทำการแสดงผลการจำลอง

5.4 ผลการจำลอง

เมื่อทำการจำลองโดยใช้ระบบทดสอบที่เป็นฟังก์ชันพื้นฐาน ได้แก่ (1) Bohachevsky's function (2) Circle function (3) Quadratic function และ (4) Rosenblock function โดยใช้วิธีการค้นหาความบรรสาน เปรียบเทียบกับ วิธีคล้ายนิวตัน วิธีฝูงอนุภาค และวิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อคุณสมบัติของแต่ละวิธี ซึ่งทำการจำลองการดูเข้าของแต่ละวิธี โดยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาความบรรสาน

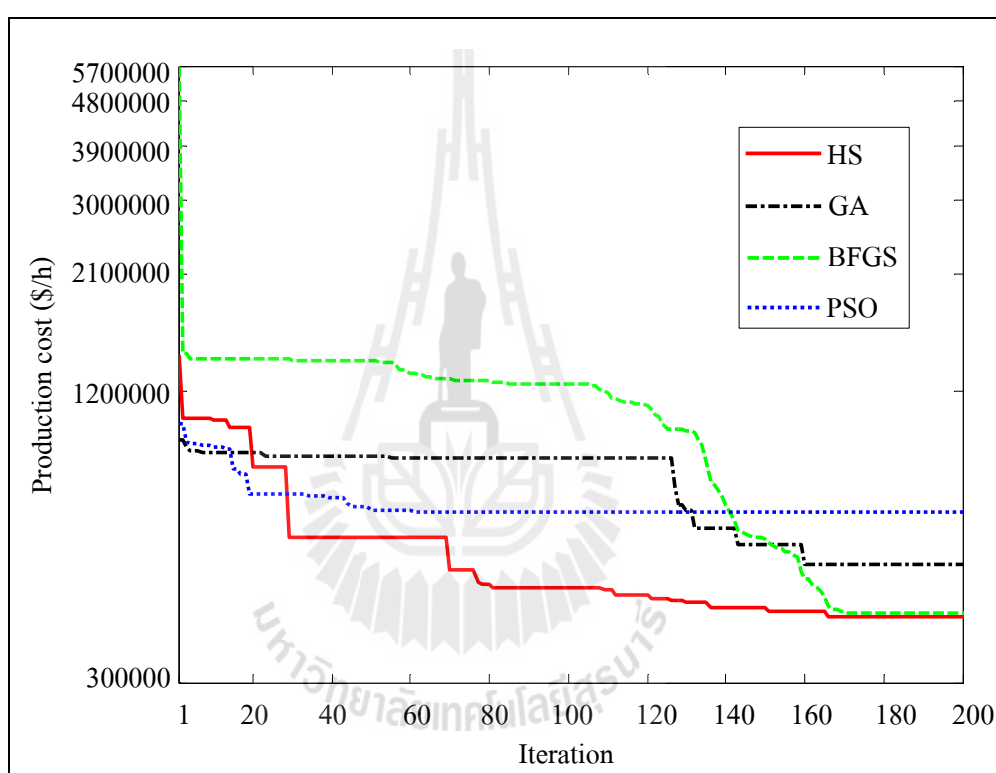
จำนวนประชากร (NP)	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
10	305000.0000	305000.0000	305000.0000	0.0007	9.4973
20	305000.0000	305050.0000	305010.0000	22.2706	9.5048
30	305000.0000	305000.0000	305000.0000	0.0096	9.5015
40	305000.0000	305010.0000	305000.0000	4.2443	9.5114
50	305000.0000	305000.0000	305000.0000	0.0032	9.4923
60	305000.0000	305830.0000	305170.0000	369.9368	9.5920
70	305000.0000	305040.0000	305010.0000	16.0219	9.5530
80	305000.0000	305040.0000	305010.0000	17.3832	9.5569
90	305000.0000	305010.0000	305000.0000	3.5344	9.5558
100	305000.0000	305000.0000	305000.0000	1.8609	9.5882

จากตารางที่ 5.2 จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ $NP = 10$ ซึ่งจะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดดังนั้นทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของแต่ละวิธีให้เหมือนกัน เพื่อทดสอบสมรรถนะดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของแต่ละวิธีให้เหมือนกัน

Algorithm	BFGS	PSO	GA	HS
Population size (NP)	-	10	10	10
Maximum iteration	200	200	200	200

จากนั้นทำการจำลองโดยใช้ระบบทดสอบ 6 บัส ซึ่งจะได้ผลการจำลองการลู่เข้าดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธี

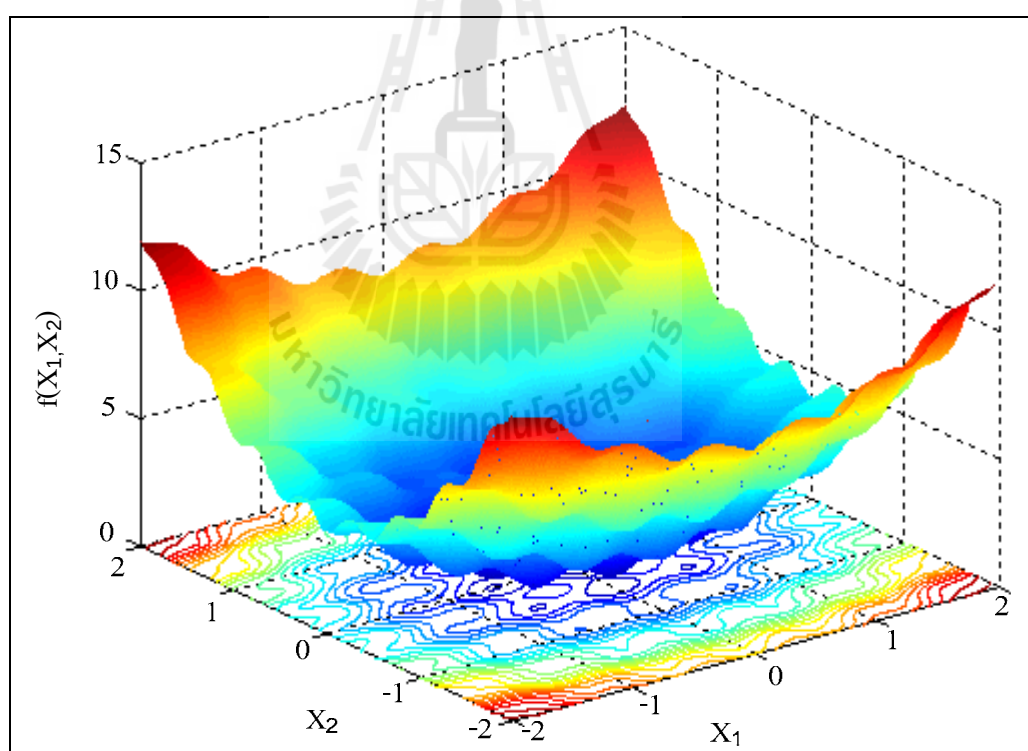
จากกราฟ เมื่อแต่ละวิธีทำการประมวลผล 200 รอบ จะเห็นว่าวิธี HS จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้เร็วที่สุด รองลงมาจะเป็นวิธี BFGS วิธี GA และวิธี PSO ตามลำดับ แล้วทำการจำลองการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี HS เปรียบเทียบกับ วิธี BFGS PSO และวิธี GA โดยใช้ระบบทดสอบที่เป็นสมการง่าย ๆ ดังนี้

- **Bohachevsky's function**

ฟังก์ชันโบฮาเชฟสกีจะมีจุดต่ำสุดหลายจุด ซึ่งจะทำให้การเลือกจุดต่ำสุดจากการประมาณค่าโดยใช้ศูนย์เป็นเกณฑ์การตัดสินใจสิ้นสุดนั้นคือเลือกค่าฟังก์ชันต่ำที่สุดที่ใกล้เคียงศูนย์ ข้อดีของฟังก์ชันโบฮาเชฟสกีคือ มีจุดต่ำสุดหลายจุด ดังนั้นจึงนำมาใช้ในการจำลองกับเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด เพื่อดูสมรรถนะของแต่ละวิธีว่าสามารถหาค่าเหมาะที่สุดที่เป็นจุดต่ำสุดได้หรือไม่ ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ (5.12)

$$\text{Minimize } f(x_1, x_2) = x_1^2 + 2x_2^2 - 0.3\cos(3\pi x_1) - 0.4\cos(4\pi x_2) + 0.7 \quad (5.12)$$

จากสมการ จะเห็นว่าค่าเหมาะที่สุดที่ทำให้ได้ค่าฟังก์ชันต่ำที่สุดจะได้จุดคำตอบ $x^* = [0, 0]$ ซึ่งสามารถแสดงกราฟคอนทัวร์ได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 กราฟคอนทัวร์ 3 มิติของ Bohachevsky's function

จากกราฟจะเห็นได้ว่ามีจุดต่ำสุดหลายจุด ซึ่งจะทำให้การเลือกจุดต่ำที่สุดที่เท่ากับศูนย์ จะทำให้ได้ค่า X_1 และ X_2 ของแต่ละวิธีดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการจำลองของ Bohachevsky's function แต่ละวิธี

ขั้นตอนวิธี	ค่า X_1 และ X_2				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	(-1.2225,-0.9334)	(1.2225,0.4695)	(-0.3476,-0.1092)	(0.7654,0.4022)	0.0116
PSO	(-0.0125,-0.0090)	(0.0074,0.0092)	(0.0005,0.0008)	(0.0046,0.0035)	15.2513
GA	(-0.0000,-0.0000)	(0.0000,0.0000)	(-0.0000,0.0000)	(0.0000,0.0000)	48.5280
HS	(0.0000,0.0000)	(0.0000,0.0000)	(-0.0000,-0.0000)	(0.0000,0.0000)	0.2145

จากผลการจำลองเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นวิธีการกระจายของข้อมูล จะเห็นได้ว่า วิธี GA และ วิธี HS จะได้ (X_1, X_2) เท่ากับจุดคำตอบ (0,0) แต่วิธี GA จะใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่าวิธี HS รองลงมาจะเป็นวิธี PSO และ BFGS ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าฟังก์ชันต่ำสุด $f(x^*) = 0$ ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ Bohachevsky's function แต่ละวิธี

ขั้นตอนวิธี	ค่าฟังก์ชัน $f(x)$				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	0.0000	2.2875	1.1138	0.8361	0.0116
PSO	0.0000	0.0043	0.0007	0.0010	15.2513
GA	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	48.5280
HS	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2145

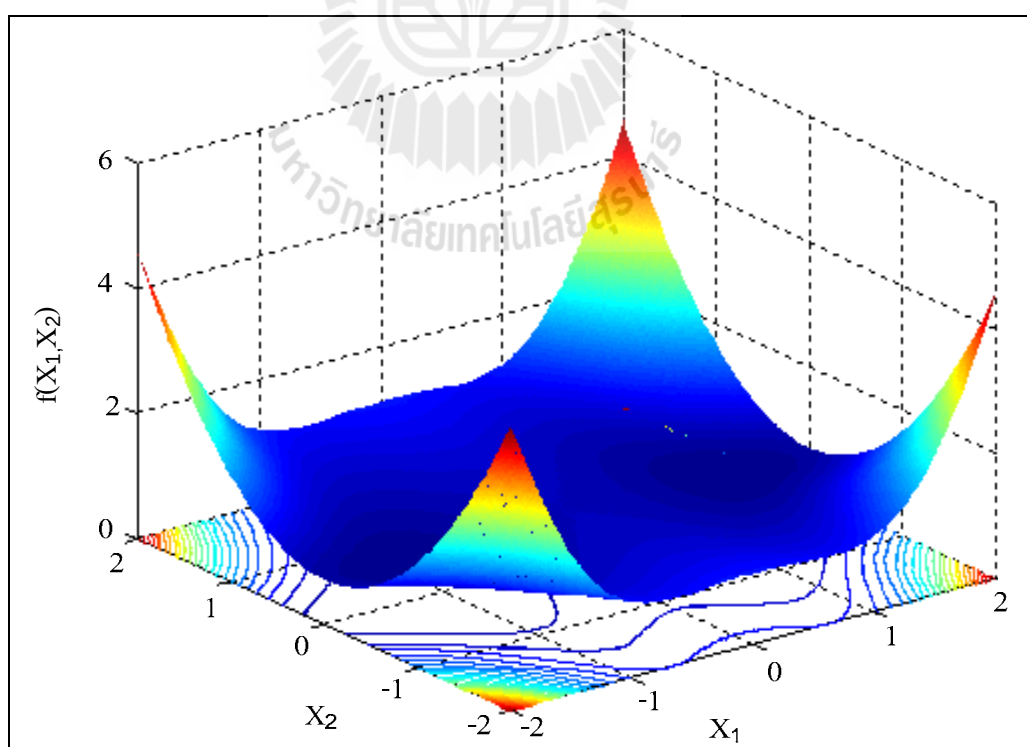
จากผลการจำลองค่าฟังก์ชันต่ำที่สุด จะเห็นได้ว่า วิธี GA และ HS จะได้ค่าฟังก์ชันต่ำที่สุดเท่ากับจุดคำตอบ แต่วิธี GA จะใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่าวิธี HS รองลงมาจะเป็นวิธี PSO และ BFGS ตามลำดับ รวมทั้งวิธี GA และ HS จะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ

- **Circle function**

วงกลม (Circle) ประกอบไปด้วยจุด ๆ หนึ่งเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ จุดคงที่จุดหนึ่ง โดยจุดที่เคลื่อนที่และจุดคงที่นั้นมีระยะห่างเท่ากันเสมอ เส้นที่ได้จะเป็นเส้นโค้งเรียกว่า วงกลม หรือ เส้นรอบวง ซึ่งเรียกจุดคงที่นั้นว่า จุดศูนย์กลาง และระยะที่เท่ากันนั้นเรียกว่า รัศมีของวงกลม ถ้าลากเส้นตรงจากจุดใดจุดหนึ่งบนวงกลมให้ผ่านจุดศูนย์กลางไปพบจุดหนึ่ง เราเรียกเส้นนั้นว่า เส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลาง มีความยาวเป็นสองเท่าของรัศมีของวงกลม โดยสามารถคำนวณค่า (x, y) เส้นรอบวง สามารถใช้กฎการสมมาตรเทียบกับแกน $x = \pm y$ และ แกน x และ y ฟังก์ชันวงกลมมีข้อดีคือ มีการนำฟังก์ชันตรีโกณมิติมาใช้ในสมการ ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\text{Minimize } f(x_1, x_2) = (x_1^2 + x_2^2)^{1/4} \left\{ \sin^2(50(x_1^2 + x_2^2)^{1/10}) + 0.1 \right\} \quad (5.13)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่าเหมาะที่สุดที่ทำให้ได้ค่าฟังก์ชันต่ำที่สุด ซึ่งจะได้จุดคำตอบ $x^* = [0, 0]$ โดยสามารถแสดงกราฟคอนทัวร์ได้ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 กราฟคอนทัวร์ 3 มิติของ Circle function

จากกราฟจะได้จุดต่ำสุดอยู่ที่ศูนย์ ซึ่งจะได้ค่า X_1 และ X_2 ที่ทำให้ได้ค่าฟังก์ชันต่ำที่สุดของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการจำลองของ Circle function แต่ละวิธี

ขั้นตอนวิธี	ค่า X_1 และ X_2				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	(-2.2762,-1.9102)	(1.9327,2.1531)	(0.0150,-0.0001)	(1.4264,1.1296)	0.0111
PSO	(-0.0094,-0.0135)	(0.0065,0.0151)	(-0.0001,0.0000)	(0.0033,0.0043)	29.0924
GA	(-0.0002,-0.0002)	(0.0002,0.0002)	(-0.0000,0.0000)	(0.0001,0.0001)	50.9805
HS	(-0.0650,-0.0732)	(0.1769,0.1674)	(0.0122,0.0075)	(0.0420,0.0425)	0.2545

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า วิธี GA จะได้คำตอบใกล้เคียงกับจุดคำตอบมากที่สุด รวมทั้งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาจะเป็นวิธี PSO HS และ BFGS ดังนั้นจะทำให้ได้ค่าฟังก์ชันต่ำสุด $f(x^*) = 0$ ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ Circle function แต่ละวิธี

ขั้นตอนวิธี	ค่าฟังก์ชัน $f(x)$				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	0.0313	0.1770	0.1180	0.0423	0.0111
PSO	0.0015	0.0130	0.0057	0.0029	29.0924
GA	0.0006	0.0015	0.0011	0.0005	50.9805
HS	0.0001	0.0494	0.0129	0.0132	0.2545

จากผลการจำลองค่าฟังก์ชันต่ำที่สุด จะเห็นได้ว่า วิธี GA จะได้ค่าฟังก์ชันต่ำที่สุด ใกล้เคียงกับจุดคำตอบมากที่สุด รองลงมาจะเป็นวิธี PSO HS และ BFGS แต่วิธี GA จะใช้เวลาในการประมวลผลมากที่สุดและวิธี BFGS จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รวมทั้งวิธี GA จะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด

- **Quadratic function**

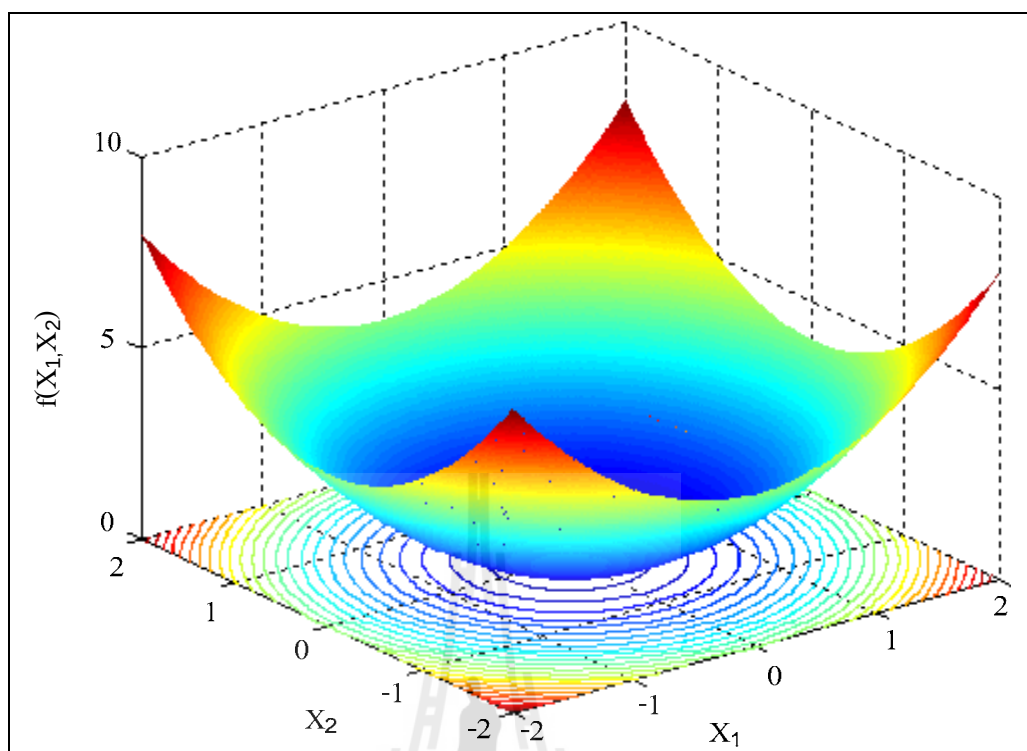
สำหรับรูปแบบฟังก์ชันกำลังสอง (Quadratic function) เป็นที่นิยมนักมากในการศึกษาทางเศรษฐศาสตร์ โดยสามารถเขียนรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้ ในกรณีที่รูปกราฟมีลักษณะเป็นรูปกรวยหงาย หรือ ค่ำ จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรกำลังสอง ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์มีค่ามากกว่าศูนย์ จะได้กราฟเป็นรูปกรวยหงาย แต่ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์มีค่าน้อยกว่าศูนย์ จะได้กราฟเป็นรูปกรวยคว่ำ ซึ่งจะทำได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบต่ำสุดและสูงที่สุดขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหาที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (x) หาได้จากกราฟของฟังก์ชันกำลังสองสามารถหาได้โดยใช้สูตร Quadratic formula ซึ่งได้มาจากกระบวนการแปลงสมการกำลังสองให้อยู่ในรูปกำลังสองสมบูรณ์ การประมาณค่าโดยอาศัย Quadratic function อาศัยหลักการที่ว่า second – order polynomial เป็นการประมาณรูปแบบของฟังก์ชันที่ใกล้จุดสูงสุดหรือต่ำสุด โดยที่ Quadratic formula มีรูปแบบดังสมการที่ (5.14) ดังนั้น Quadratic formula คือ

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5.14)$$

ข้อดีของฟังก์ชันกำลังสองคือ เป็นสมการที่หาค่าที่ดีที่สุดได้ง่าย เนื่องจากค่าที่ดีที่สุดจะอยู่ที่จุดยอดเพียงจุดเดียว ซึ่งมีรูปแบบสมการกำลังสองดังนี้

$$\text{Minimize } f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 \quad (5.15)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้ค่าฟังก์ชันต่ำที่สุดจะได้จุดคำตอบ $x^* = [0,0]$ ซึ่งสามารถแสดงกราฟคอนทัวร์ได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กราฟคอนทัวร์ 3 มิติของ Quadratic function

จากกราฟจะเห็นได้ว่าจุดต่ำสุดอยู่ที่ศูนย์ ซึ่งจะได้อ่า X_1 และ X_2 ที่ทำให้ได้ค่าฟังก์ชันต่ำที่สุดของแต่ละวิธีดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบผลการจำลองของ Quadratic function แต่ละวิธี

ขั้นตอนวิธี	ค่า X_1 และ X_2				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	(-0.0000,-0.0000)	(0.0000,0.0000)	(-0.0000,0.0000)	(0.0000,0.0000)	0.0108
PSO	(-0.0079,-0.0111)	(0.0115,0.0137)	(0.0007,0.0001)	(0.0036,0.0052)	13.2559
GA	(-0.0000,-0.0000)	(0.0000,0.0000)	(0.0000,-0.0000)	(0.0000,0.0000)	47.7309
HS	(-0.0000,-0.0000)	(0.0000,0.0000)	(0.0000,-0.0000)	(0.0000,0.0000)	0.2001

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า วิธี GA BFGS และวิธี HS จะได้คำตอบเท่ากับจุดคำตอบ รองลงมาเป็นวิธี PSO แต่วิธี BFGS จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าวิธี GA และ HS ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิธี GA BFGS และวิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมาเป็นวิธี PSO ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าฟังก์ชันต่ำสุด $f(x^*) = 0$ ดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ Quadratic function แต่ละวิธี

ขั้นตอนวิธี	ค่าฟังก์ชัน $f(x)$				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0108
PSO	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.2559
GA	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	47.7309
HS	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2001

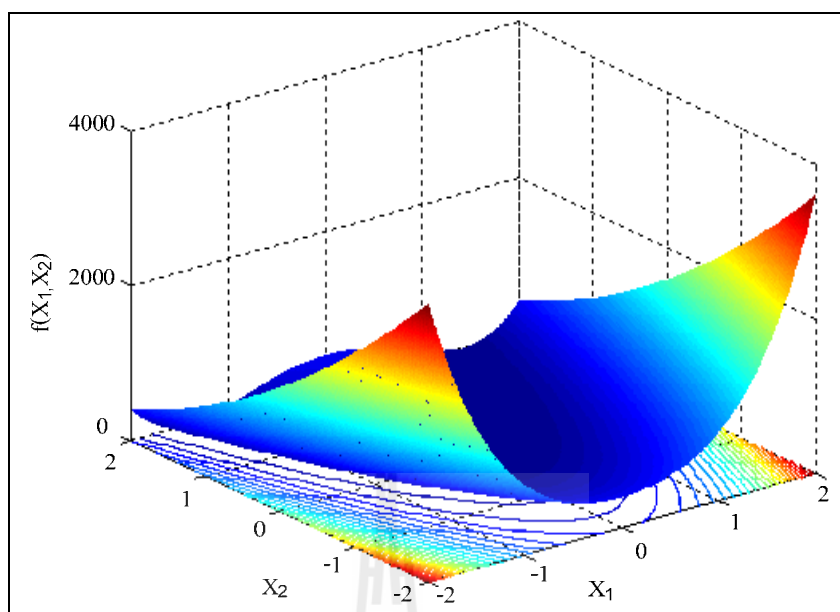
จากผลการจำลองค่าฟังก์ชันต่ำสุด จะเห็นได้ว่า ทุกวิธี จะได้ค่าฟังก์ชันต่ำสุดเท่ากับจุดคำตอบรวมทั้งได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับศูนย์หมดทุกวิธี และวิธี BFGS จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลาในการประมวลผลมากที่สุด

- **Rosenbrock function**

สมการพื้นผิว Rosenbrock มีข้อดีคือ เป็นสมการที่หาค่าที่ดีที่สุดได้ยากเพราะค่าที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ ณ บริเวณขอบของพื้นที่ของสมการเหมาะสำหรับนำมาทดสอบสมรรถนะการหาค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธี ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\text{Minimize } f(x_1, x_2) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (5.16)$$

จากสมการ จะเห็นได้ว่าค่าเหมาะที่สุดที่ทำให้ได้ค่าฟังก์ชันต่ำที่สุดจะได้จุดคำตอบ $x^* = [1, 1]$ ซึ่งสามารถแสดงกราฟคอนทัวร์ได้ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 กราฟคอนทัวร์ 3 มิติของ Rosenbrock function

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าต่ำที่สุดจะอยู่บริเวณขอบของพื้นที่ผิวของสมการ ซึ่งจะทำได้ค่า X_1 และ X_2 ของแต่ละวิธีดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบผลการจำลองของ Rosenbrock function แต่ละวิธี

ขั้นตอนวิธี	ค่า X_1 และ X_2				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	(0.9993,0.9986)	(1.0000,1.0000)	(1.0000,0.9999)	(0.0001,0.0003)	0.0772
PSO	(0.8009,0.6384)	(1.2581,1.5827)	(1.0198,1.0493)	(0.0957,0.1989)	13.2822
GA	(0.9994,0.9988)	(1.0004,1.0008)	(0.9999,0.9998)	(0.0002,0.0004)	48.1412
HS	(0.9997,0.9993)	(1.0068,1.0137)	(1.0003,1.0005)	(0.0012,0.0025)	0.2071

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า วิธี BFGS จะได้คำตอบใกล้เคียงกับจุดค่าตอบมากที่สุด รองลงมาเป็นวิธี GA HS และ PSO ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิธี BFGS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดรองลงมาเป็นวิธี GA HS และ PSO ซึ่งจะทำให้ได้ค่าฟังก์ชันต่ำสุด $f(x^*) = 0$ ดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ Rosenbrock function แต่ละวิธี

ขั้นตอนวิธี	ค่าฟังก์ชัน $f(x)$				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0772
PSO	0.0000	0.0666	0.0098	0.0162	13.2822
GA	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	48.1412
HS	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2071

จากผลการจำลองค่าฟังก์ชันต่ำที่สุด จะเห็นได้ว่า วิธี GA BFGS และ HS จะได้ค่าฟังก์ชันต่ำที่สุดใกล้เคียงกับจุดค่าตอบมากที่สุด รองลงมาจะเป็นวิธี PSO ตามลำดับ แต่วิธี GA จะใช้เวลาในการประมวลผลมากที่สุดและวิธี BFGS จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รวมทั้งวิธี GA BFGS และ HS จะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด

5.5 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีการค้นหาความบรรสาน ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด โดยการใช้หลักการธรรมชาติของนักดนตรีที่มีการปรับปรุงและแก้ไขตัวโน้ตให้เหมาะกับเครื่องดนตรีแต่ละชนิดเพื่อนำเครื่องดนตรีแต่ละชนิดมาเล่นป็นวงดนตรี เพื่อให้เกิดความไพเราะมากที่สุด ซึ่งก็เปรียบเสมือนการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำที่สุด ซึ่งการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสานนี้จะใช้พื้นฐานของการเล่นดนตรี โดยที่นักดนตรีจะค้นหาความบรรสานตัวใหม่ที่ดีกว่าตัวเดิม ความบรรสานตัวใหม่ที่เกิดขึ้นก็จะถูกเก็บเป็นส่วนหนึ่งของหน่วยความจำความบรรสาน แล้วทำการเปรียบเทียบ ถ้าความบรรสานตัวใหม่ดีกว่าตัวที่แย่ที่สุดของหน่วยความจำความบรรสานตัวที่แย่ที่สุดก็จะแทนลงในตัวนั้น ทำซ้ำ ๆ จนกว่าจะครบกำหนดจำนวนรอบแล้วจะหยุดการทำงานและทำการเลือกตัวที่ดีที่สุดของทุกความบรรสานมาเป็นคำตอบและทำการจำลองแต่ละวิธีด้วยฟังก์ชันพื้นฐานแบบง่าย ๆ จะเห็นได้ว่าการนำแต่ละวิธีมาใช้ในการหาค่าเหมาะที่สุดจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหาที่นำมาจำลองว่าเหมาะกับเทคนิคการแก้ปัญหาด้วยเทคนิคใด ซึ่งจะกล่าวถึงผลการจำลองของแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาความบรรสานในบทที่ 6 ต่อไป

บทที่ 6

ผลการทดสอบ

6.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาความบรรสานในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งใช้ระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส 169 บัส (กฟผ.) และ 9 บัส (115kV นครราชสีมา 2) โดยการทดสอบแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ

1. การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพิจารณาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส และระบบทดสอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยของภาคกลางตอนบนและภาคกลางด้านตะวันตก รวม 169 บัส โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ (smooth quadratic function) แล้วใช้วิธี BFGS GA PSO และ HS ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

2. การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพิจารณาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส และ 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นฟังก์ชันที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ (non – smooth valve point loading function) แล้วใช้วิธี BFGS GA PSO และ HS ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

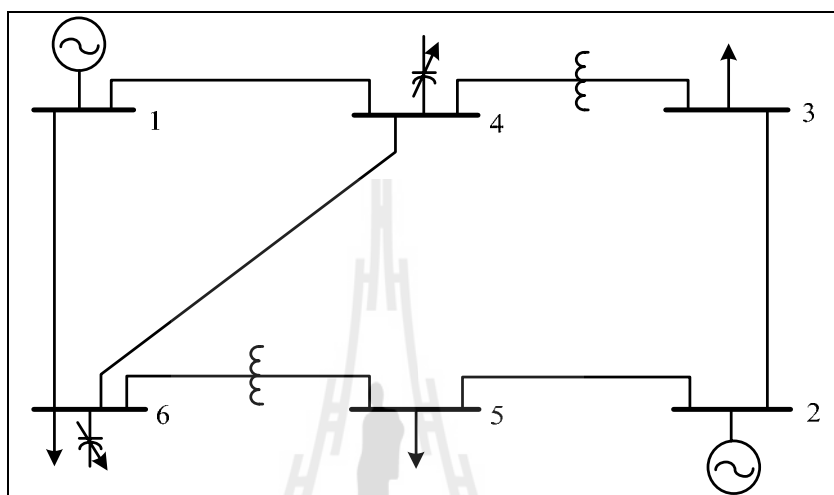
3. การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพิจารณาการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ของระบบทดสอบ 9 บัส (115kV นครราชสีมา 2) โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นค่ากำลังงานสูญเสียแล้วใช้วิธี BFGS GA PSO และ HS ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

6.2 การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ (Smooth Quadratic Function)

ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด จะใช้ระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส และ 169 บัส (กฟผ.) ตามลำดับ โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ (smooth quadratic function) แล้วใช้วิธี HS ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเปรียบเทียบกับวิธี GA PSO และ BFGS เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด โดยคิดเป็นอัตราเงินบาทต่อชั่วโมง ซึ่งแต่ละวิธีจะทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมเมทแลป 30 ครั้ง เพื่อดูสมรรถนะของแต่ละวิธี ดังนี้

6.2.1 ระบบทดสอบ 6 บัส

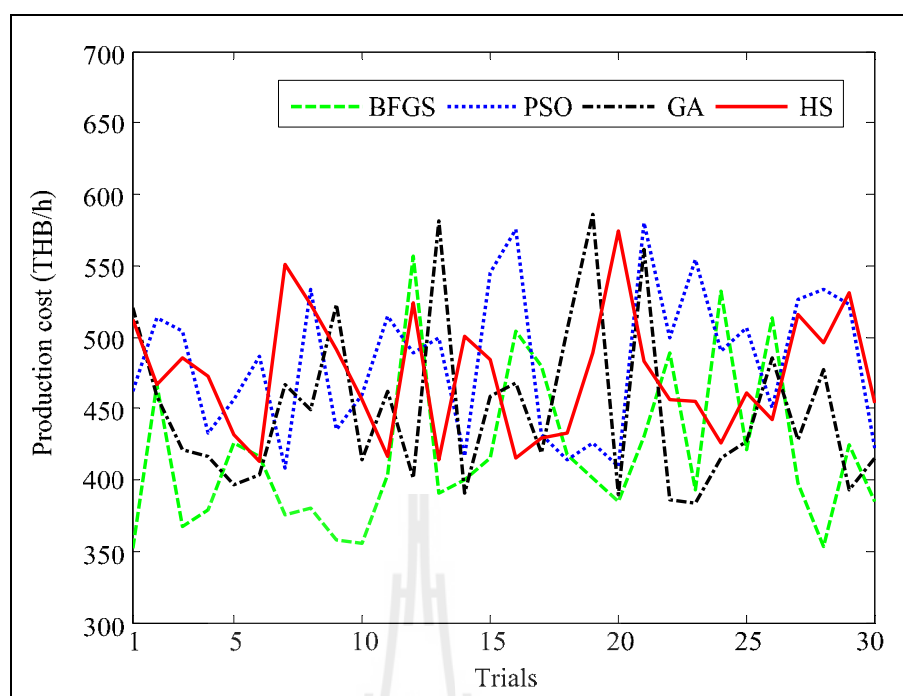
การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ค่าเชื้อเพลิงกำลังสองแบบราบเรียบโดยใช้ระบบทดสอบมาตรฐาน 6 บัส (100 MVAbase : 230 kVbase) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่อง ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบ 6 บัส

เมื่อทำการจำลองการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้เทคนิคการค้นหาค่าความบรรลวน (Harmony Search หรือ HS) เปรียบเทียบกับวิธีเชิงพันธุกรรม วิธีคล้ายนิวตัน และกลุ่มอนุภาค ในการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่าต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบต่ำที่สุด

ซึ่งจะได้ค่าต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบต่ำที่สุด โดยที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ($\text{power generator} - \text{power demand} = 0$) ดังนั้นจะได้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดของแต่ละวิธีเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้ง ดังรูปที่ 6.2



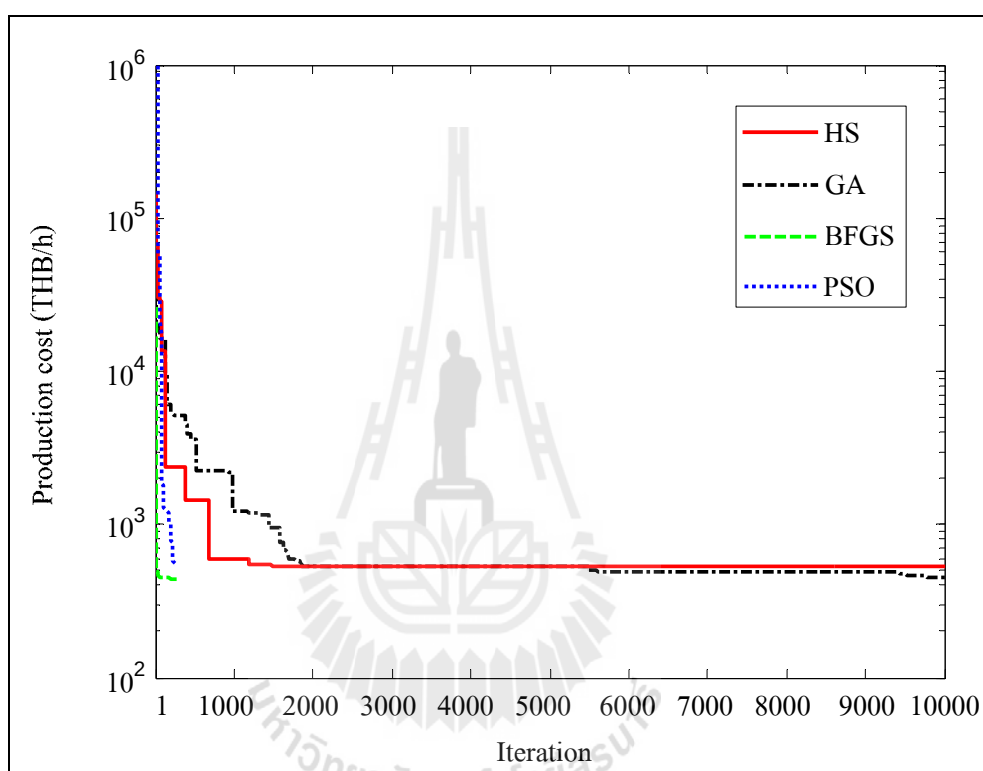
รูปที่ 6.2 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 6 บัส

ผลการจำลองเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้งของระบบทดสอบ 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ จะสังเกตเห็นได้ว่าทุกวิธีจะได้กราฟค่อนข้างแกว่ง แต่วิธี HS จะได้กราฟต้นทุนการผลิตแกว่งน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี PSO BFGS และวิธี GA ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 6 บัส

ขั้นตอนวิธี	ค่าเชื้อเพลิง (THB/h)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	351.5242	557.1320	418.8620	55.1839	2.9097
PSO	408.2473	580.6938	483.2624	51.4146	5.5203
GA	383.6745	586.2633	450.1367	58.3261	62.2800
HS	412.5233	573.9305	473.4124	43.1452	10.6077

จากผลการจำลองในตารางทำการจำลอง 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่า วิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี PSO BFGS และ GA ตามลำดับและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลวิธี BFGS จะใช้เวลาน้อยที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการลู่เข้าสู่ค่าตอบของแต่ละวิธี ได้ดังรูปที่ 6.3

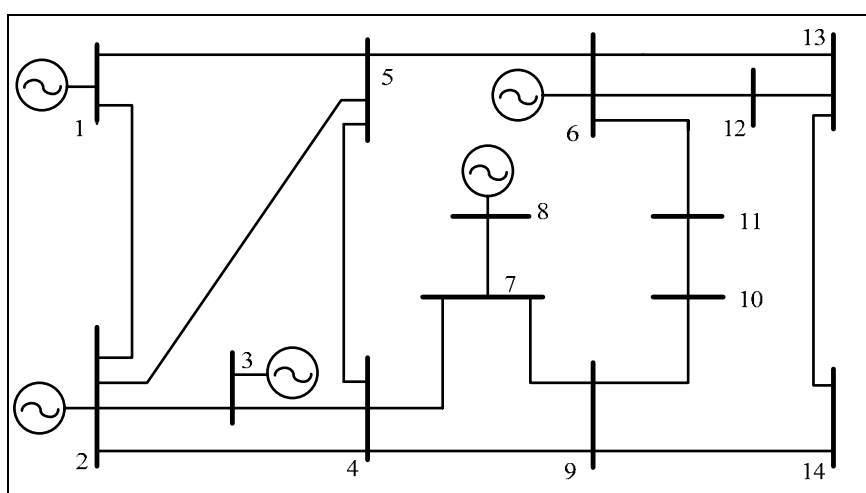


รูปที่ 6.3 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 6 บัส

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้งโดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นว่าวิธี BFGS จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้เร็วที่สุดรองลงมาเป็นวิธี GA HS และ PSO ตามลำดับ แต่วิธี GA และ HS จะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่ค่าตอบ

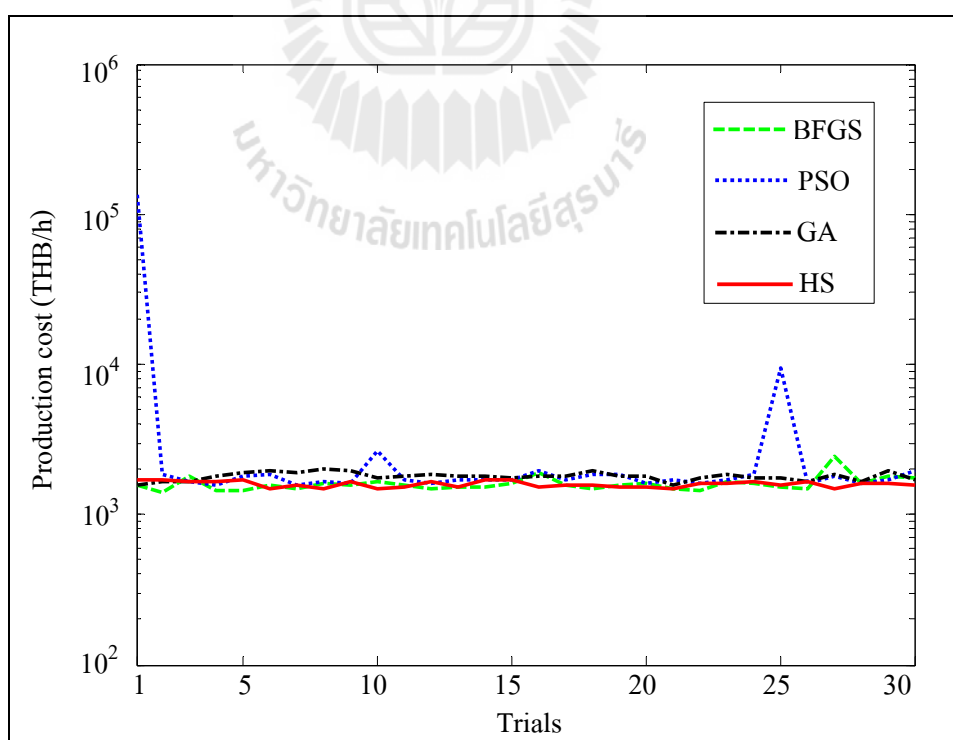
6.2.2 ระบบทดสอบ 14 บัส

การแก้ปัญหาค่าโหลดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเชื้อเพลิงกำลังสองแบบราบเรียบ โดยใช้ระบบทดสอบมาตรฐาน 14 บัส (100 MVAbase : 230 kVbase) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 เครื่อง ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ระบบทดสอบ 14 บัส

จากระบบทดสอบ 14 บัส ทำการจำลองเพื่อเลือกจุดทำงานที่ทำให้ค่าต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ ซึ่งทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.5



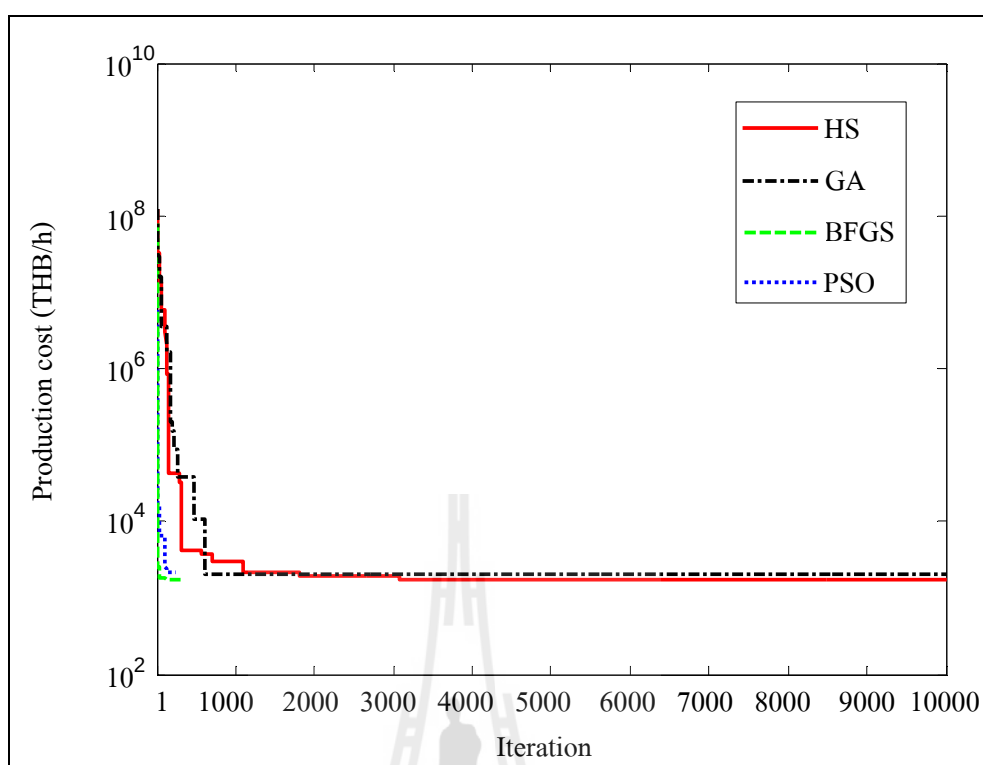
รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 14 บัส

ผลการจำลองเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้งของระบบทดสอบ 14 บัส จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี PSO จะได้ค่าต้นทุนการผลิตแต่ละครั้งไม่ใกล้เคียงกันจึงทำให้กราฟแกว่งมากกว่าวิธีอื่น ๆ ส่วนวิธี GA PSO และ HS กราฟที่ได้จะใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 14 บัส

ขั้นตอนวิธี	ค่าเชื้อเพลิง (THB/h)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	1419.3000	2418.6000	1606.5000	191.6274	9.4560
PSO	1560.0000	2650.0000	1753.2143	210.6261	13.3960
GA	1572.4000	2017.9000	1791.7000	111.7356	180.6754
HS	1481.6000	1715.6000	1594.1500	74.7276	30.3255

จากผลการจำลองในตารางทำการจำลอง 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ โดยวิธี PSO ทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้งแล้วเข้าสู่จุดคำตอบ 28 ครั้ง และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลวิธี BFGS จะใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการเข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.6

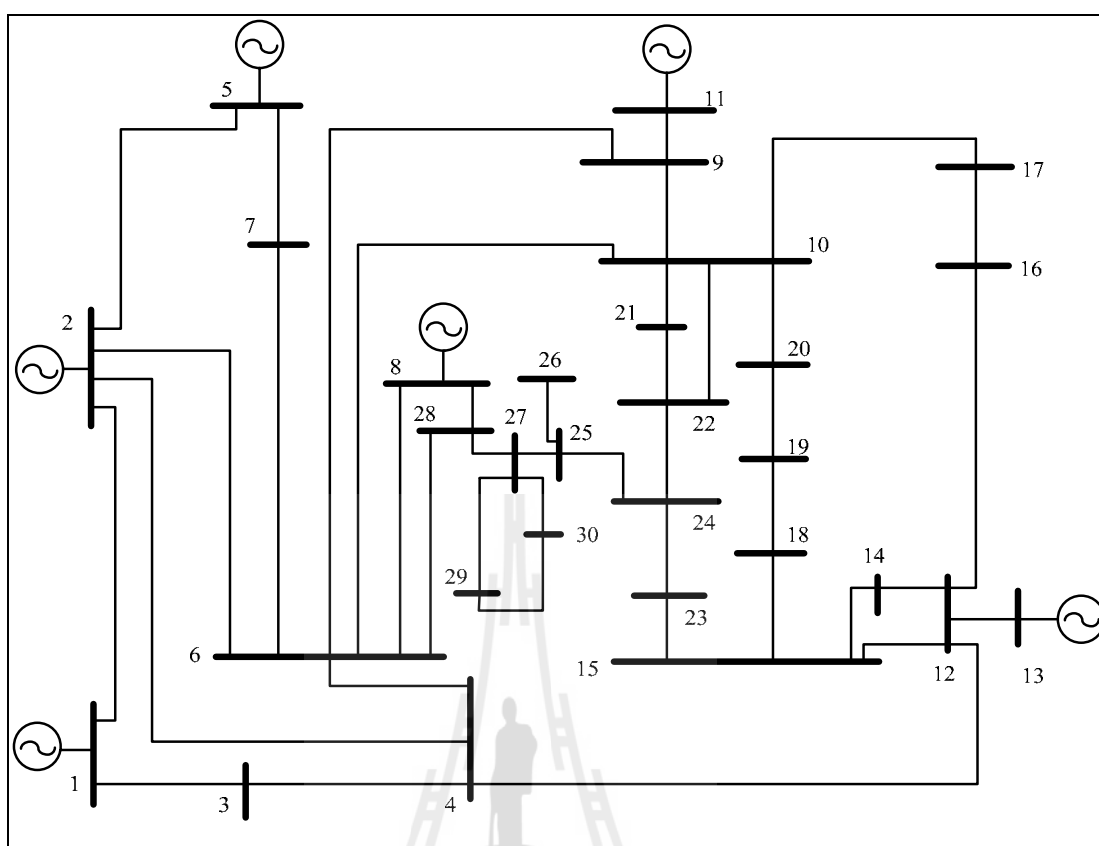


รูปที่ 6.6 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 14 บัส

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้งโดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นได้ว่าวิธี HS จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้ดีที่สุด รองลงมาจะเป็นวิธี BFGS PSO และ GA ตามลำดับ

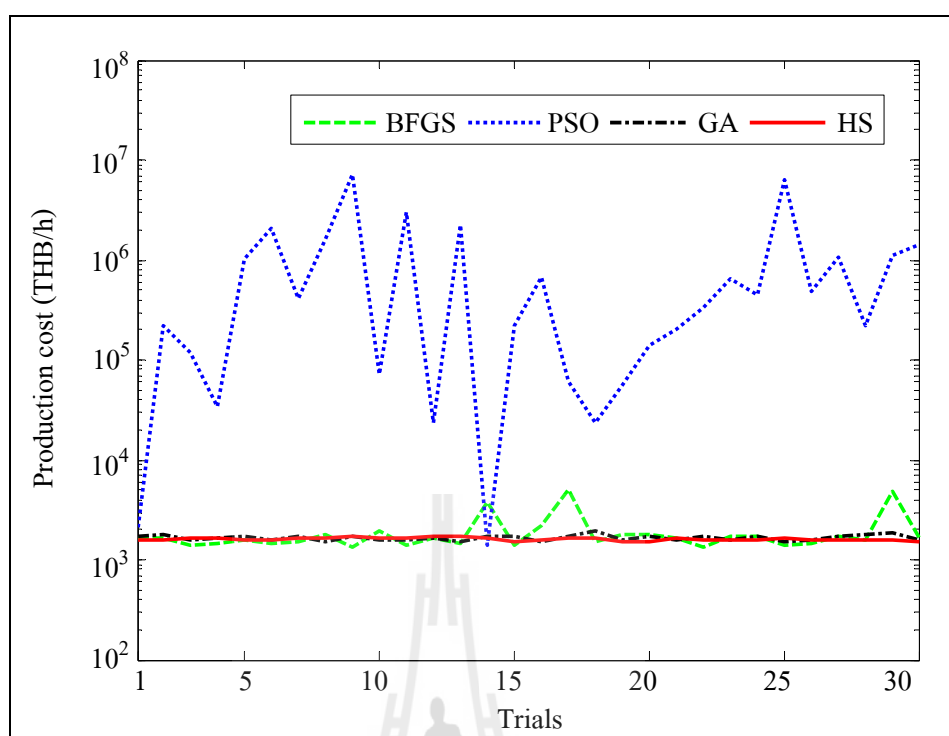
6.2.3 ระบบทดสอบ 30 บัส

การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ค่าเชื้อเพลิงกำลังสองแบบราบเรียบ โดยใช้ระบบทดสอบมาตรฐาน 30 บัส (100 MVAbase : 135 kVbase) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 เครื่อง ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 ระบบทดสอบ 30 บัส

จากระบบทดสอบ 30 บัส ทำการจำลองเพื่อเลือกจุดทำงานที่ทำให้ค่าต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟที่ผลิตได้เท่ากับความต้องการของโหลด และตัวแปรที่ทำการควบคุมต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแลบในการประมวลผล จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.8



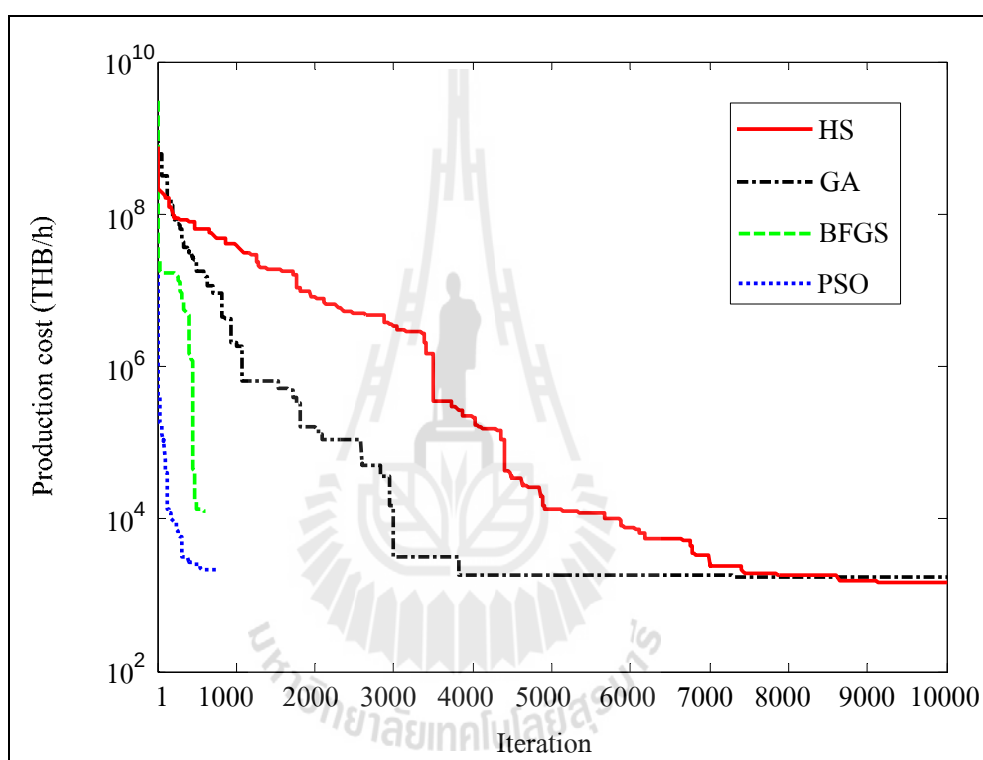
รูปที่ 6.8 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 30 บัส

จากผลการจำลองเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้งของระบบทดสอบ 30 บัส จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี PSO จะได้ค่าต้นทุนการผลิตแต่ละครั้งไม่ใกล้เคียงกันจึงทำให้กราฟแกว่งมากกว่าวิธีอื่น ๆ ร่องลงมาเป็นวิธี BFGS ส่วนวิธี GA และ HS จะได้ต้นทุนการผลิตใกล้เคียงกันมากจนเกือบเป็นเส้นเดียวกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 30 บัส

ขั้นตอนวิธี	ค่าเชื้อเพลิง (THB/h)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	1319.8000	5100.6900	1892.3600	948.4460	74.0599
PSO	1400.0000	2100.0000	1750.0000	494.9747	102.9077
GA	1508.9000	1911.9800	1659.4400	108.1430	455.2720
HS	1506.4000	1685.0000	1603.9933	51.5505	94.7771

จากผลการจำลองในตารางทำการจำลอง 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่า วิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ โดยวิธี PSO จำลองทั้งหมด 30 ครั้งเข้าสู่จุดค่าตอบแค่ 2 ครั้ง และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลวิธี BFGS จะใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการเข้าสู่ค่าตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.9

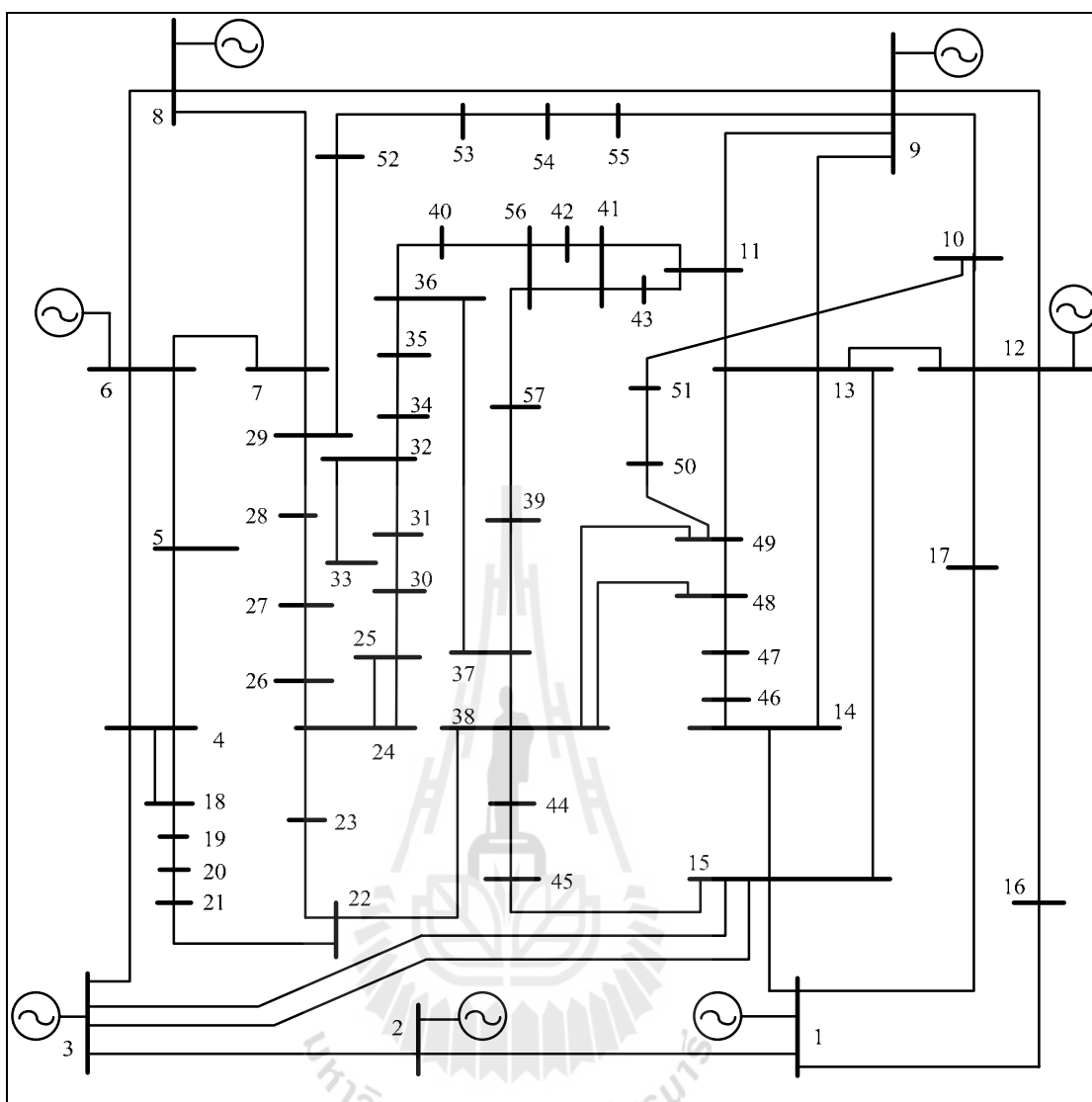


รูปที่ 6.9 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 30 บัส

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้งโดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นได้ว่าวิธี HS จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้ดีที่สุดรองลงมาจะเป็นวิธี GA PSO และ BFGS ตามลำดับ ซึ่งวิธี HS และ GA จะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่ค่าตอบ

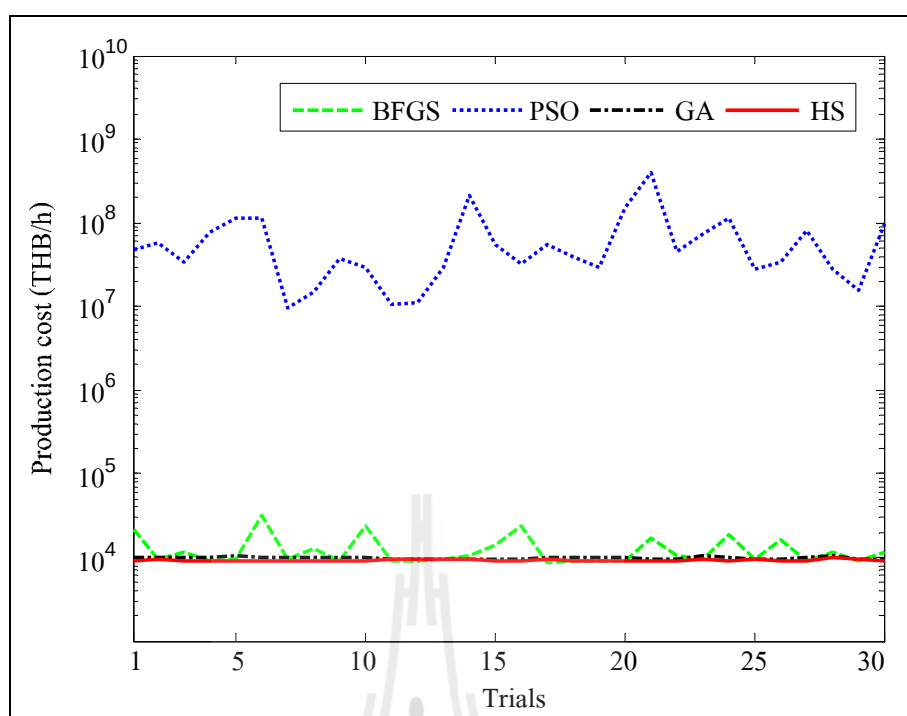
6.2.4 ระบบทดสอบ 57 บัส

การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเชื้อเพลิงกำลังสองแบบราบเรียบ โดยใช้ระบบทดสอบมาตรฐาน 57 บัส (100 MVAbase : 135 kVbase) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 7 เครื่อง ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 ระบบทดสอบ 57 บัส

จากระบบทดสอบ 57 บัส ทำการจำลองเพื่อเลือกจุดทำงานที่ทำให้ค่าต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับความต้องการของโหลด และตัวแปรที่ทำการควบคุมต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแลบในการประมวลผล จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.11



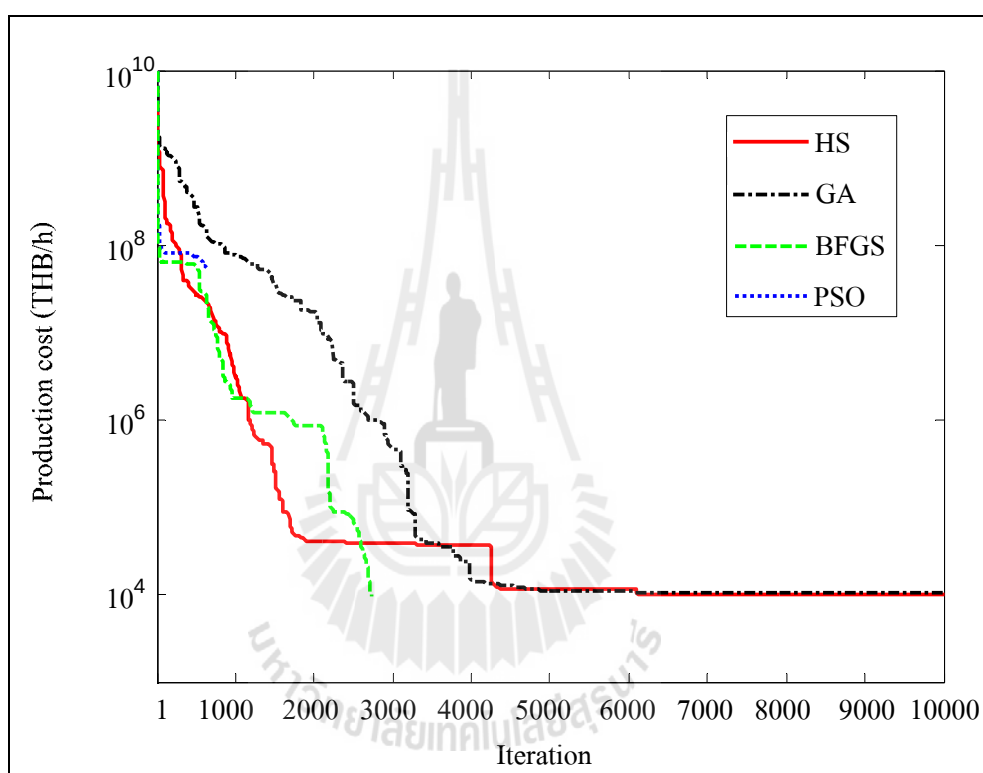
รูปที่ 6.11 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 57 บัส

จากผลการจำลองเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้งของระบบทดสอบ 57 บัส จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี PSO จะได้ต้นทุนการผลิตสูงกว่าวิธี HS GA และ BFGS ซึ่งวิธี HS จะได้ต้นทุนการผลิตแต่ละครั้งใกล้เคียงกันดังนั้นจึงทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 57 บัส

ขั้นตอนวิธี	ค่าเชื้อเพลิง (THB/h)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	8825.0948	32133.8183	12706.7307	5810.4115	1142.3843
PSO	9636083.6898	394086633.2530	69194949.4470	76949458.8078	380.0253
GA	9403.0000	10252.0000	9867.7667	253.4412	4152.0667
HS	8859.6000	9878.9000	9213.2000	246.9591	290.6926

จากผลการจำลองในตารางทำการจำลอง 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่า วิธี PSO จะได้ต้นทุนการผลิตมากกว่าวิธีอื่น ๆ เนื่องจากค่าที่ได้ไม่ลู่เข้าสู่จุดค่าตอบที่เหมาะสมที่สุด และวิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลวิธี HS จะใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการลู่เข้าสู่ค่าตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.12



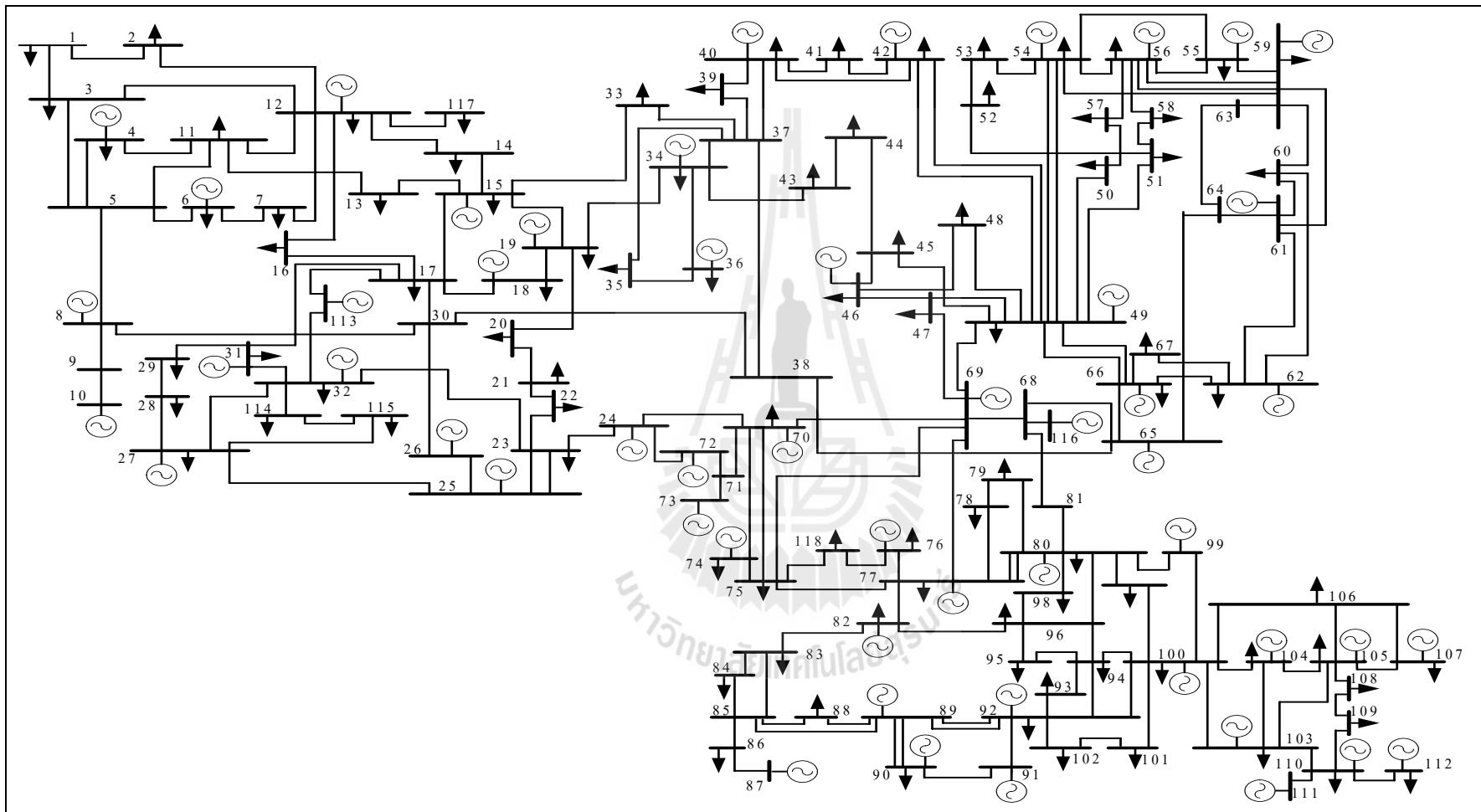
รูปที่ 6.12 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 57 บัส

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้งโดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นได้ว่าวิธี HS จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้ดีที่สุดรองลงมาจะเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ ซึ่งวิธี HS จะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่ค่าตอบจนถึงจุดต่ำสุด

6.2.5 ระบบทดสอบ 118 บัส

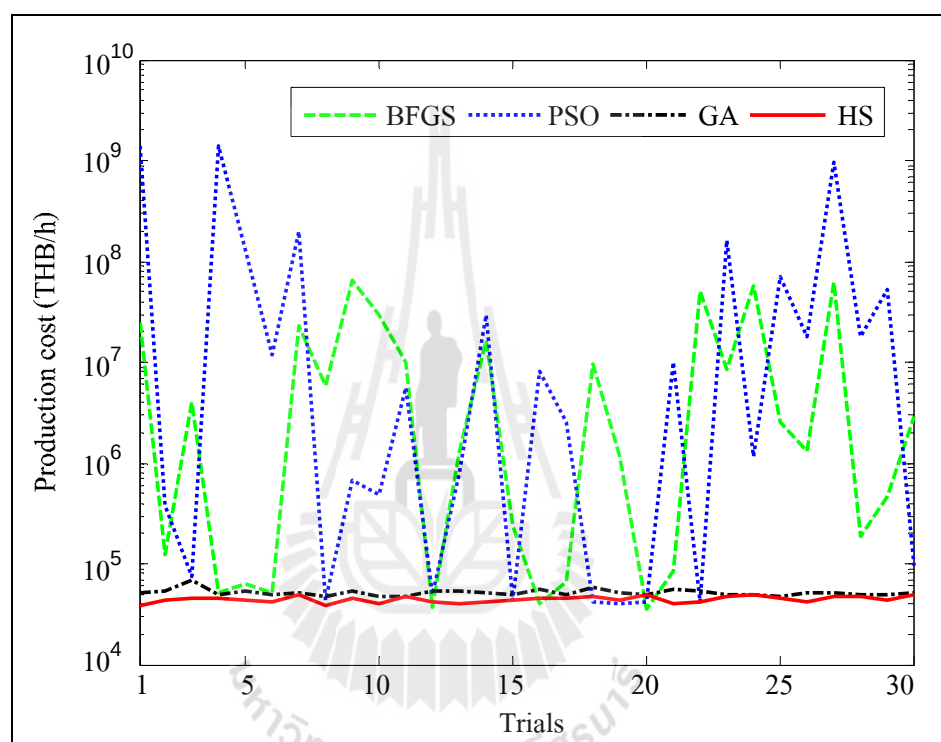
การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ค่าเชื้อเพลิงกำลังสองแบบราบเรียบโดยใช้ระบบทดสอบมาตรฐาน 118 บัส ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 54 เครื่อง และมีโหลดเกาะอยู่ที่บัสต่าง ๆ 91 ตัว รวมทั้งมีสายส่งทั้งหมด 186 สาย ดังรูปที่ 6.13





รูปที่ 6.13 ระบบทดสอบ 118 บัส

จากระบบทดสอบ 118 บัส ทำการจำลองเพื่อเลือกจุดทำงานที่ทำให้ได้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับความต้องการของโหลด และตัวแปรที่ทำการควบคุมต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแลบในการประมวลผล จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.14



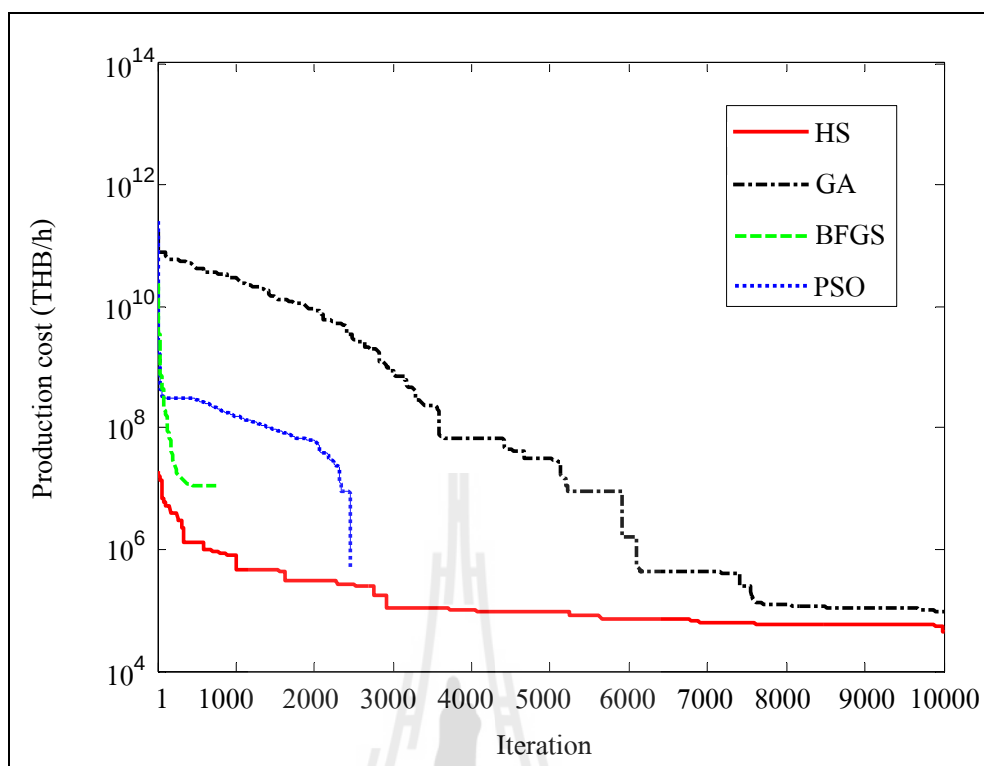
รูปที่ 6.14 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 118 บัส

จากผลการจำลองเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้งของระบบทดสอบ 118 บัส จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี HS และ GA จะได้กราฟเป็นเชิงเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการจำลองแต่ละครั้งจะได้ต้นทุนการผลิตใกล้เคียงกัน รองลงมาเป็นวิธี BFGS และ PSO ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 118 บัส

ขั้นตอนวิธี	ค่าเชื้อเพลิง (THB/h)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	35247.0101	85407.5816	53545.9948	17021.9178	13048.7672
PSO	40134.9746	97676.6333	52544.0656	20041.1803	1373.0000
GA	47447.0000	68127.0000	51842.0000	4100.5000	16412.0000
HS	37839.0000	49797.0000	44394.0000	3353.9000	1175.7000

จากผลการจำลองในตารางทำการจำลอง 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่า วิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ โดยวิธี BFGS จำลองทั้งหมด 30 ครั้งเข้าสู่จุดคำตอบ 8 ครั้ง และวิธี PSO เข้าสู่จุดคำตอบทั้งหมด 9 ครั้ง และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลวิธี HS จะใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด และวิธี HS จะมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงการเข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.15

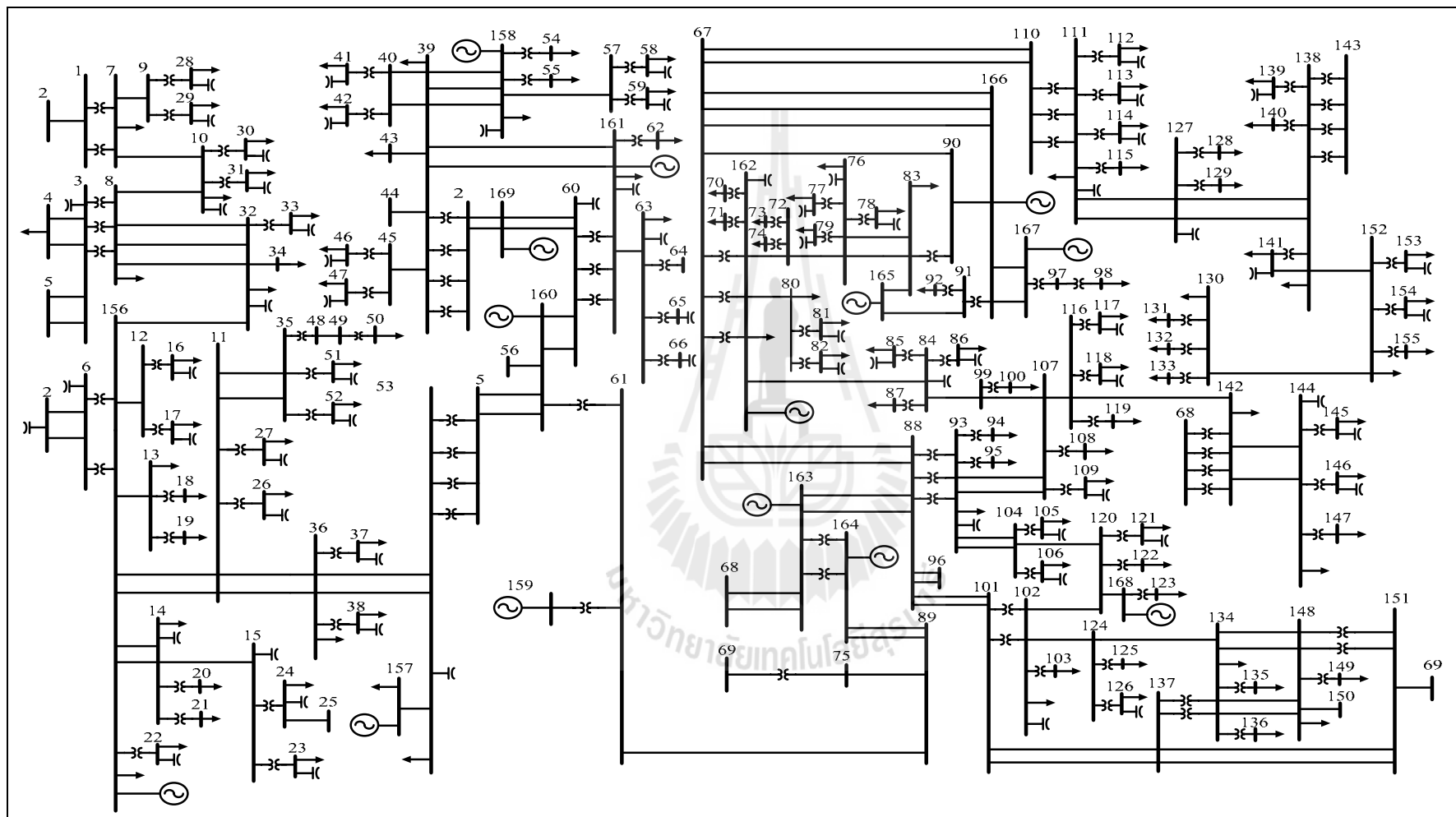


รูปที่ 6.15 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 118 บัส

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้ง โดยแต่ละวิธีใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นได้ว่าวิธี HS จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้ดีที่สุด รองลงมาจะเป็นวิธี GA PSO และ BFGS ตามลำดับ ซึ่งวิธี HS และ GA จะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่ค่าตอบ

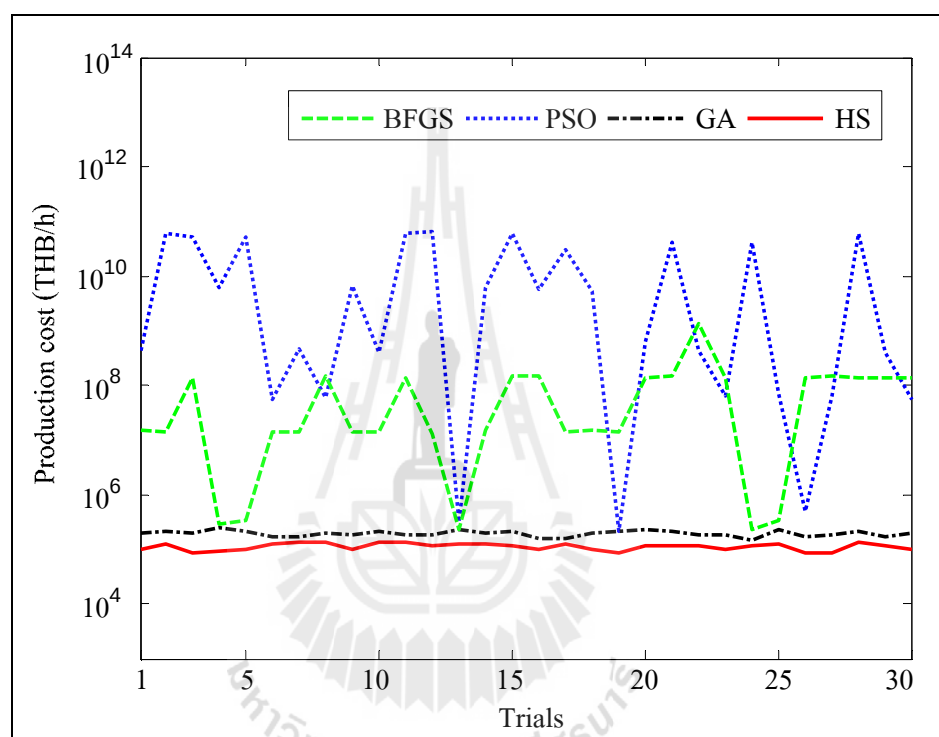
6.2.6 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบทดสอบการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย 169 บัส

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เป็นรัฐวิสาหกิจ สังกัดกระทรวงพลังงานทำหน้าที่ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าแล้วทำการจัดหาและจัดส่งพลังงานไฟฟ้าที่มีความมั่นคง เชื่อถือได้ไปยังการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย ซึ่งได้แก่ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยมีนโยบายคือต้องผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของประชาชนและระบบไฟฟ้าต้องมีความมั่นคงเชื่อถือได้ ราคาเหมาะสม และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยยังรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตรายเล็ก (Very Small Power Producer : VSPP) และ โรงไฟฟ้าเอกชนอีกด้วย ซึ่งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะรับกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแล้วทำการแปลงแรงดันโดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับลดแรงดันเป็นระดับปานกลางเข้าสู่ระบบจำหน่ายและส่งจ่ายให้แก่ภาคอุตสาหกรรมและที่พักอาศัยต่อไป และในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงมากขึ้นตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นทุกปี ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นพลังงานทดแทนเนื่องจากการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานน้ำและพลังงานถ่านหินมีความยากลำบาก ไม่แน่นอนเนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อมและการยอมรับของประชาชน ซึ่งพลังงานทดแทนจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนที่ใช้แล้วหมดไป ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และนิวเคลียร์ เป็นต้น และพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก ได้แก่ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานความร้อนใต้พิภพ ซึ่งพลังงานทดแทนนี้จะช่วยลดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และอีกทางหนึ่งที่จะช่วยให้ไฟฟ้าเพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้คือ การรับซื้อไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน ได้แก่ ประเทศลาว จีน พม่า กัมพูชา และมาเลเซีย เพื่อให้ไฟฟ้าเพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้และสร้างความมั่นคงให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าในอนาคตอีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยการจ่ายโหลดอย่างประหยัด โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ (smooth quadratic-function) แล้วใช้วิธี HS ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเปรียบเทียบกับวิธี GA PSO และ BFGS เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ซึ่งแต่ละวิธีจะทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมเมทแพลทั้งหมด 30 ครั้งเพื่อดูสมรรถนะของแต่ละวิธีโดยใช้ระบบทดสอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งประกอบด้วยภาคกลางตอนบนและภาคกลางด้านตะวันตก รวม 169 บัส (1000 MVAbase : 500 kVbase) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 14 เครื่อง ค่าที่ป้อนหม้อแปลง 137 ค่า ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 65 ตัว และมีโหลดเกาะอยู่ที่บัสต่าง ๆ 103 ตัว ดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 ระบบทดสอบ 169 บัส (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย)

เมื่อทำการจำลองแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้เทคนิค วิธี HS ในการหาค่าเหมาะที่สุดเปรียบเทียบกับวิธี GA PSO และ BFGS ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อหาค่าต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบต่ำที่สุด ซึ่งจะได้ค่าต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบต่ำที่สุด โดยที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ดังนั้นจะได้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดของแต่ละวิธีเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้ง ดังรูปที่ 6.17



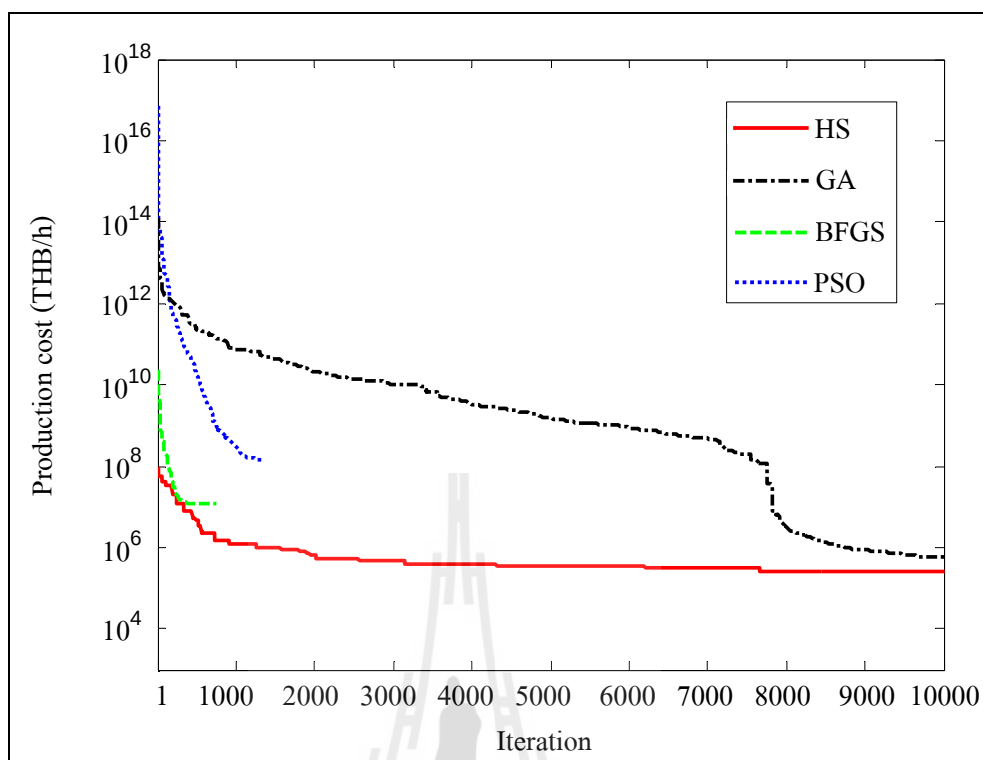
รูปที่ 6.17 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 169 บัส

จากผลการจำลองเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้งของระบบทดสอบการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 169 บัส จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี PSO และ BFGS จะได้ค่าต้นทุนการผลิตแต่ละครั้งไม่ใกล้เคียงกันจึงทำให้ได้กราฟแกว่งมากกว่าวิธีอื่น ๆ ส่วนวิธี GA และ HS จะได้ต้นทุนการผลิตใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส

ขั้นตอนวิธี	ค่าเชื้อเพลิง (THB/h)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	229904.0000	332057.0000	283049.4564	50515.5277	29744.9191
PSO	212000.0000	475000.0000	333000.0000	132751.6478	9782.5000
GA	145900.0000	254000.0000	194662.0000	24802.3883	31927.4000
HS	83720.0000	140010.0000	111886.0000	17356.3447	9547.1600

จากผลการจำลองในตารางทำการจำลอง 30 ครั้ง ทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่า วิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ โดยวิธี BFGS ทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้งเข้าสู่จุดคำตอบ 5 ครั้ง และ วิธี PSO เข้าสู่จุดคำตอบแค่ 3 ครั้งและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลวิธี HS จะใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการเข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 169 บัส

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้งโดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นได้ว่า HS จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้ดีที่สุดรองลงมาจะเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ แต่วิธี HS จะลู่เข้าสู่จุดค่าตอบได้ดีที่สุดและจะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่ค่าตอบ

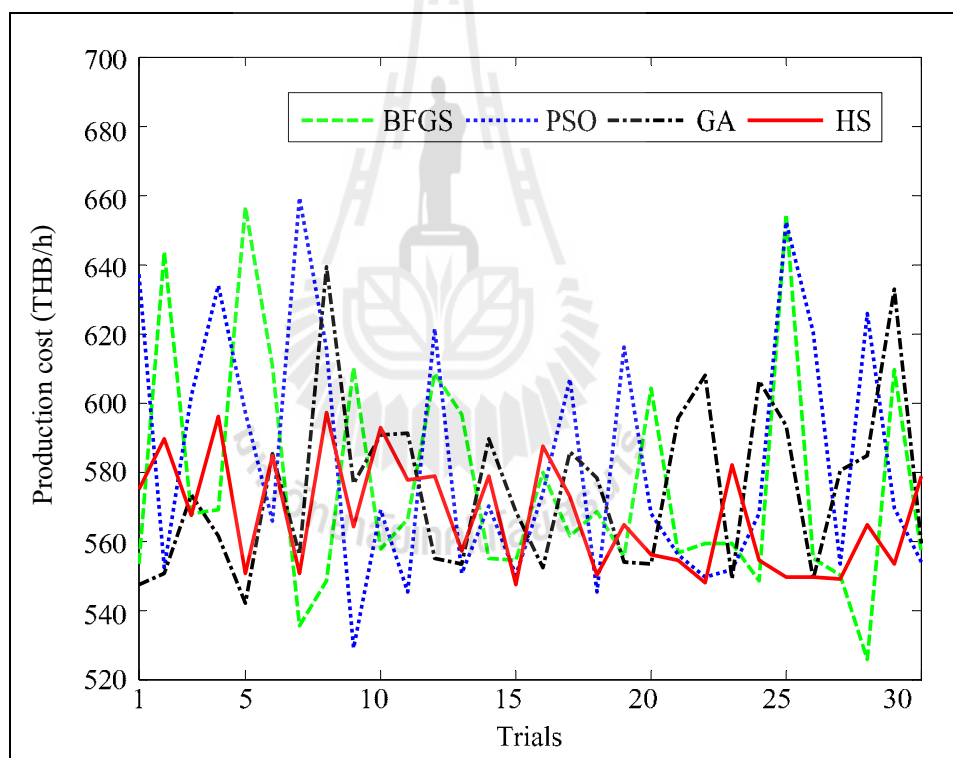
6.3 การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ (Non - Smooth Valve Point

Loading Function)

การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ค่าเชื้อเพลิงที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ ซึ่งใช้ระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส และ 30 บัส แล้วทำการเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมโดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ วิธี GA PSO BFGS และ HS โดยคิดต้นทุนการผลิตเป็นอัตราเงินบาท/ชั่วโมง ดังนี้

6.3.1 ระบบทดสอบ 6 บัส

จากระบบทดสอบ 6 บัส ทำการจำลองเพื่อเลือกจุดทำงานที่ทำให้ค่าต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับความต้องการของโหลด และตัวแปรที่ทำการควบคุมต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบใช้กับปัญหาที่มีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น เช่น กรณีที่หน่วยการผลิตเป็นแบบกังหันไอน้ำหลายวาล์ว (multi-valve steam turbines) ณ จุดที่มีการเปิดวาล์วจะทำให้ใช้พลังงานความร้อนที่มีค่าสูงขึ้น ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงที่เป็นสมการกำลังสองจึงไม่สามารถใช้ในการจำลองได้ แล้วทำการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี HS เปรียบเทียบกับวิธี BFGS PSO และ GA ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บในการประมวลผล จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.19



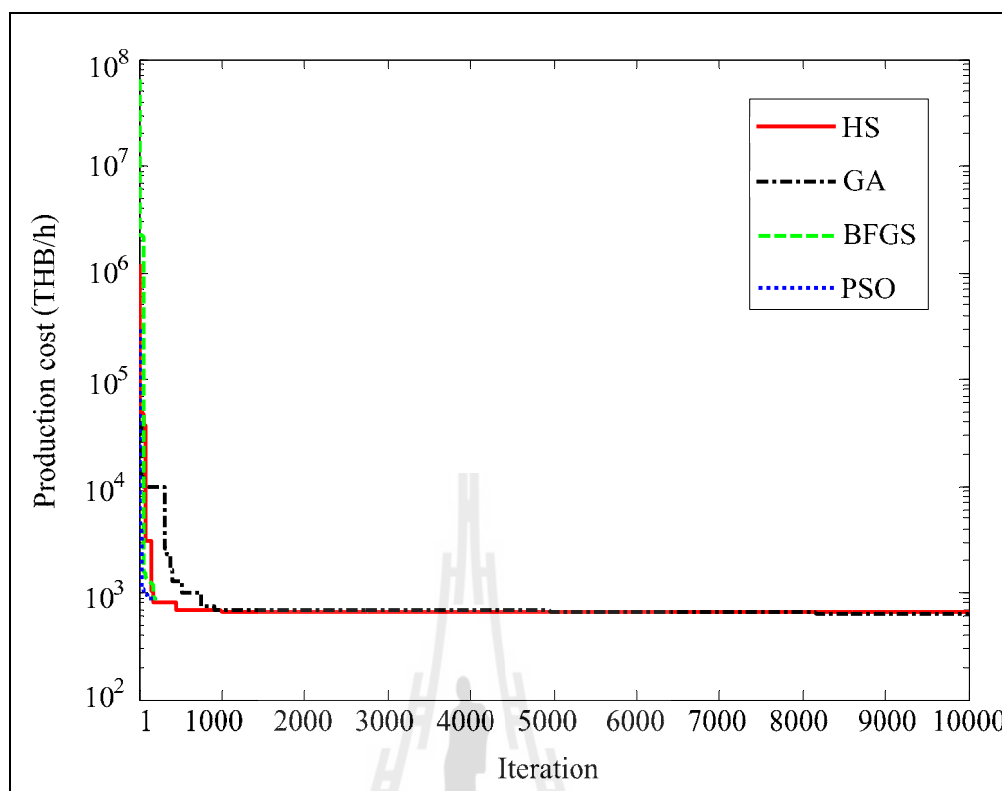
รูปที่ 6.19 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 6 บัส

จากผลการจำลองเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้งของระบบทดสอบ 6 บัส จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี PSO จะได้ค่าต้นทุนการผลิตแต่ละครั้งไม่ใกล้เคียงกันจึงทำให้กราฟแกว่งมากกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี BFGS GA และ HS ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 6 บัส

ขั้นตอนวิธี	ค่าเชื้อเพลิง (THB/h)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	525.8453	656.6875	575.8232	34.1163	1.3348
PSO	528.8122	659.1707	583.5840	36.5964	6.7361
GA	541.8631	639.4167	575.2649	25.1417	62.9268
HS	547.4845	597.2276	567.3255	16.3267	13.4117

จากผลการจำลองในตารางทำการจำลอง 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุดค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และวิธี PSO ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลวิธี BFGS จะใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการเข้าสู่ค่าตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.20

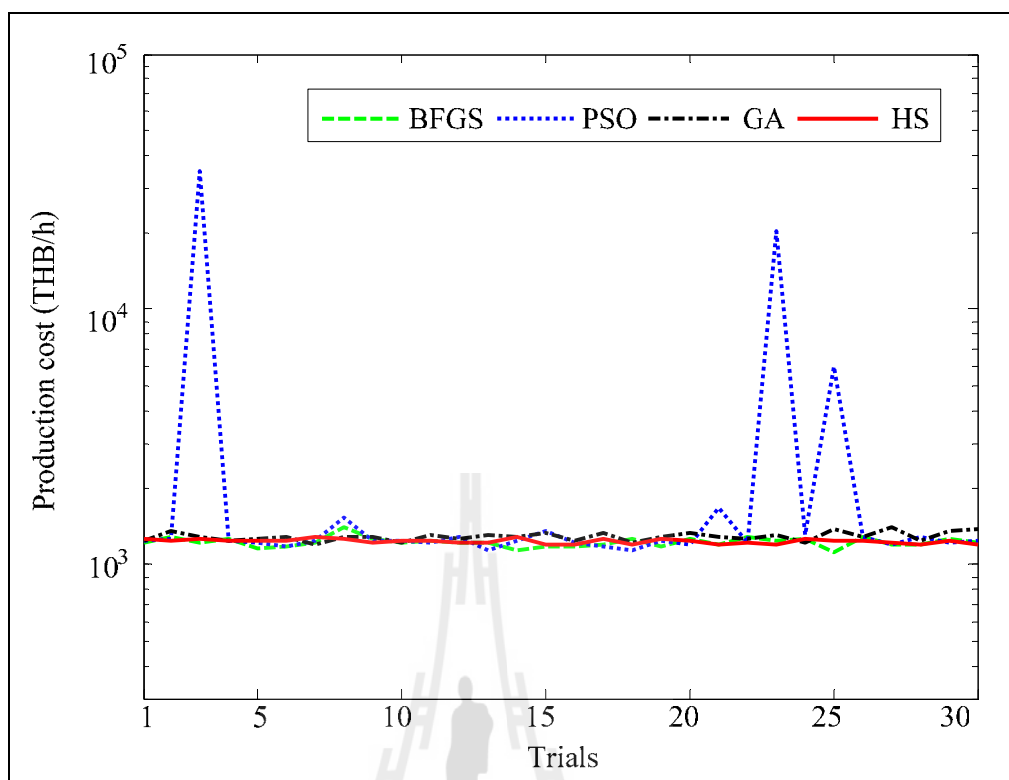


รูปที่ 6.20 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 6 บัส

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้งโดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นได้ว่าวิธี HS จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้ดีที่สุดรองลงมาจะเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ แต่วิธี HS จะลู่เข้าสู่จุดค่าตอบได้ดีที่สุด และจะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่ค่าตอบ

6.3.2 ระบบทดสอบ 14 บัส

จากระบบทดสอบ 14 บัส ทำการจำลองเพื่อเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ปลอดภัยและมีเสถียรภาพ โดยทำการควบคุมตัวแปรให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ แล้วทำการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี BFGS PSO GA และ HS ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บในการประมวลผล จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.21



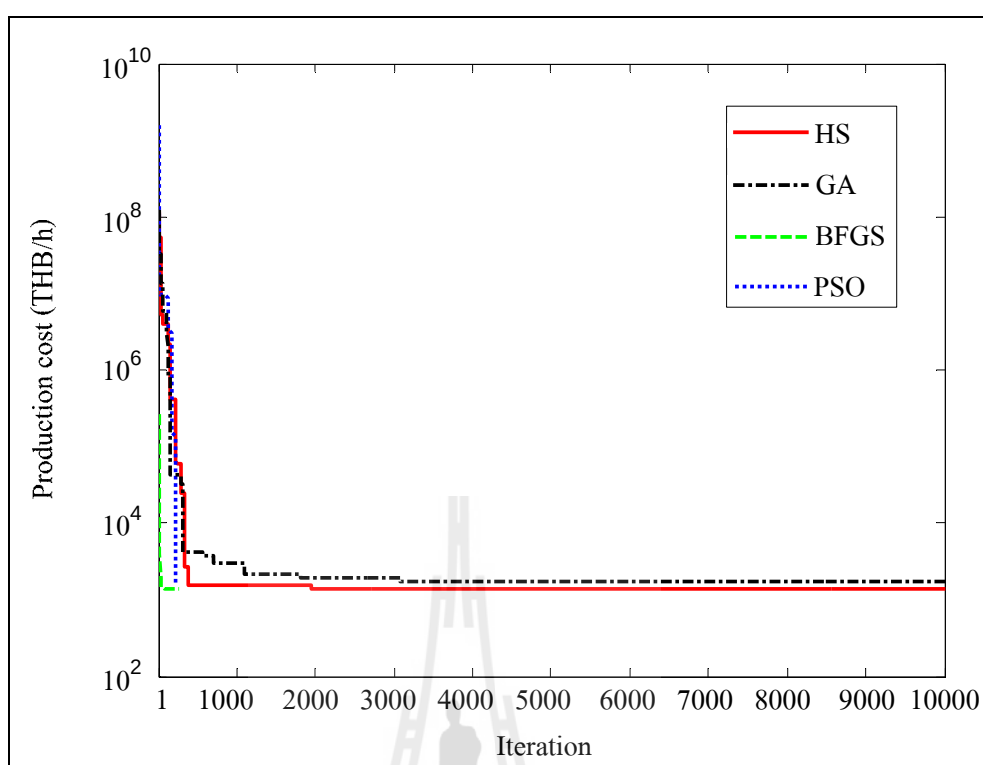
รูปที่ 6.21 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 14 บัส

จากผลการจำลองเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้งของระบบทดสอบ 14 บัส จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี PSO จะได้ค่าต้นทุนการผลิตแต่ละครั้งไม่ใกล้เคียงกันจึงทำให้กราฟแกว่งมากกว่าวิธีอื่น ๆ ส่วนวิธี BFGS GA และ HS จะมีค่าต้นทุนการผลิตแต่ละครั้งใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 14 บัส

ขั้นตอนวิธี	ค่าเชื้อเพลิง (THB/h)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	1116.3000	1399.7000	1225.9000	55.3235	10.5466
PSO	1138.0000	1686.0000	1262.5926	110.7566	17.4587
GA	1194.3000	1402.6000	1291.8000	52.8006	147.8815
HS	1192.5000	1285.8000	1234.8167	26.8348	30.5456

จากผลการจำลองในตารางทำการจำลอง 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่า วิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และวิธี PSO ตามลำดับ โดยวิธี PSO จำลองทั้งหมด 30 ครั้งเข้าสู่จุดคำตอบ 27 ครั้ง และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลวิธี BFGS จะใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการเข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.22

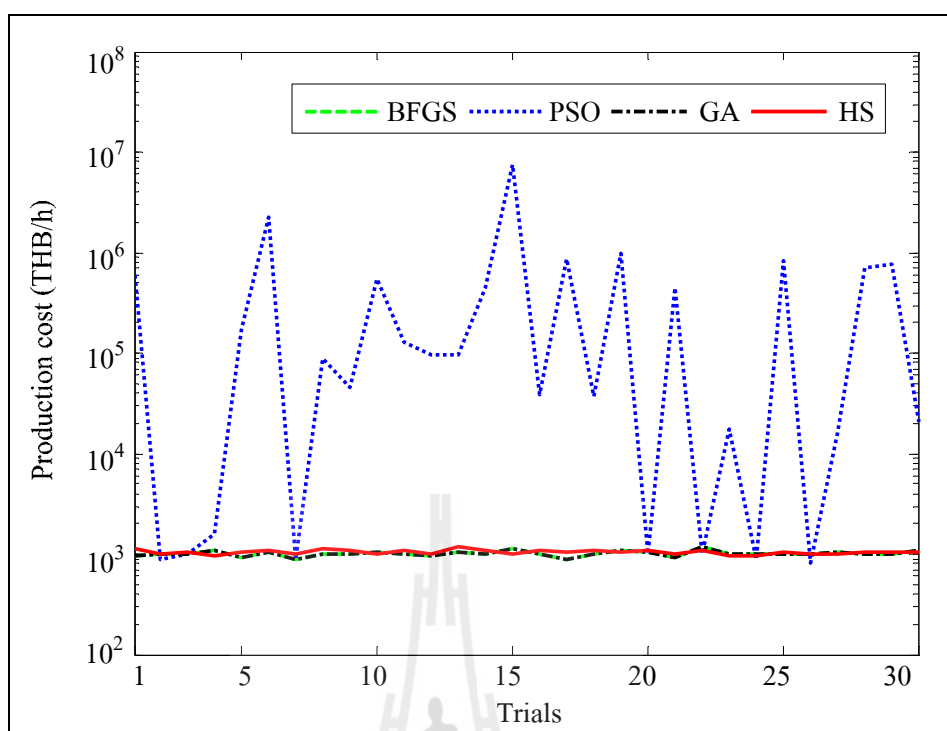


รูปที่ 6.22 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในระบบ 14 บัส

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้งโดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นว่าวิธี BFGS จะลู่เข้าสู่คำตอบได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นวิธี HS PSO และ GA ตามลำดับ แต่วิธี HS และ GA จะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่คำตอบ

6.3.3 ระบบทดสอบ 30 บัส

จากระบบทดสอบ 30 บัส ทำการจำลองเพื่อหาค่าเหมาะที่สุดที่ทำให้ค่าต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด โดยที่ระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่องภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ปลอดภัยและมีเสถียรภาพ โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีจุดเปิดควาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ แล้วทำการควบคุมตัวแปรให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด จากนั้นทำการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี BFGS PSO GA และ HS ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแลบในการประมวลผล จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.23



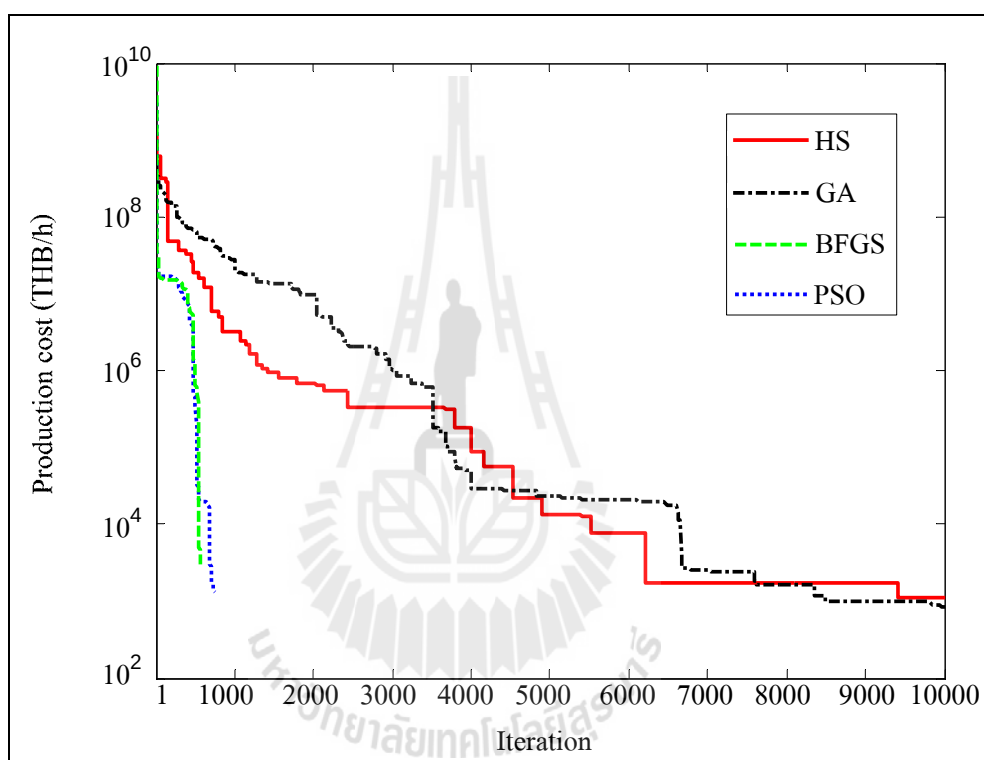
รูปที่ 6.23 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจำนวน 30 รอบของแต่ละวิธีในระบบ 30 บัส

จากผลการจำลองเมื่อทำการจำลอง 30 ครั้งของระบบทดสอบ 30 บัส จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี PSO จะได้ค่าต้นทุนการผลิตแต่ละครั้งไม่ใกล้เคียงกันจึงทำให้ได้กราฟแกว่งมากกว่าวิธีอื่น ๆ ส่วนวิธี BFGS GA และ HS จะได้ต้นทุนการผลิตใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 เปรียบเทียบการหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 30 บัส

ขั้นตอนวิธี	ค่าเชื้อเพลิง (THB/h)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	874.5660	8992.2700	1412.5600	1561.9100	76.2921
PSO	800.0000	1600.0000	1012.5000	247.4874	92.5087
GA	896.4390	1197.6500	1011.8400	65.1912	304.3220
HS	945.4090	1186.0000	1042.5600	55.6683	93.7665

จากผลการจำลองในตารางทำการจำลอง 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่า วิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี GA PSO และ BFGS ตามลำดับ โดยวิธี PSO ทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้งเข้าสู่จุดค่าตอบแค่ 8 ครั้ง และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลวิธี BFGS จะใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการเข้าสู่ค่าตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.24

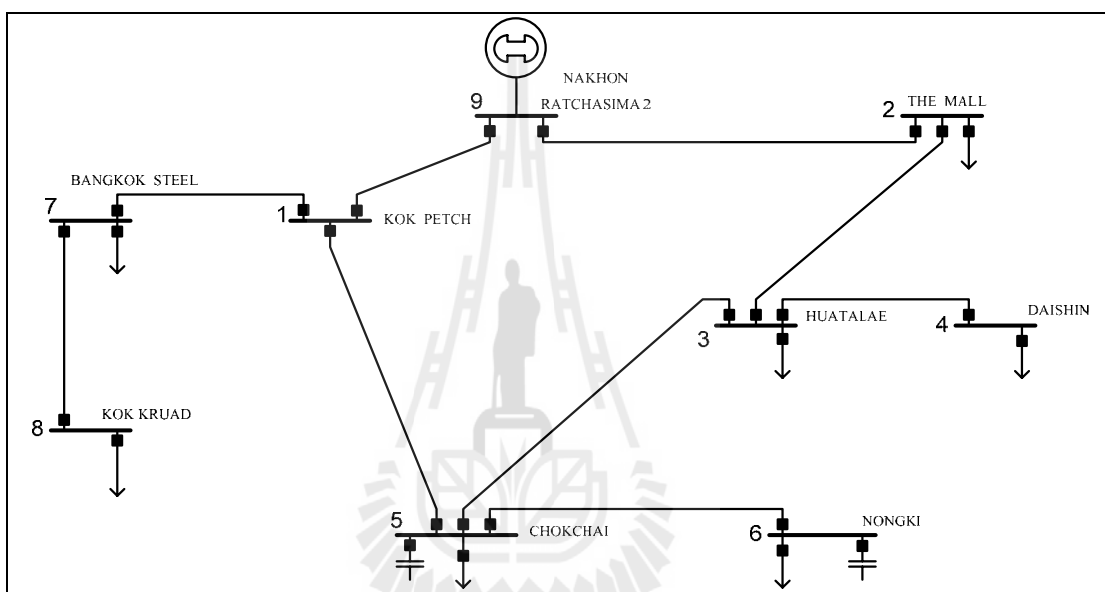


รูปที่ 6.24 กราฟการเข้าสู่ของแต่ละวิธีในระบบ 30 บัส

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้งโดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นได้ว่าวิธี GA จะเข้าสู่ค่าตอบได้ดีที่สุดรองลงมาจะเป็นวิธี PSO HS และ BFGS ตามลำดับ แต่วิธี HS และ GA จะค่อย ๆ เข้าสู่ค่าตอบ

6.4 การเปรียบเทียบค่ากำลังงานสูญเสียในระบบโดยใช้วิธี BFGS PSO GA และ HS

การแก้ปัญหาค่ากำลังงานสูญเสียที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำลังงานสูญเสีย โดยใช้ระบบทดสอบ 9 บัส ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 ตัว ติดอยู่ที่บัส 9 (นครราชสีมา 2) และมีโหลดเกาะอยู่ที่ บัส 2 เดอะมอลล์ บัส 3 ห้วยทะเล บัส 4 ไคชิน บัส 5 โชคชัย บัส 6 หนองกี่ บัส 7 บางกอกสตีล บัส 8 โลกกรวด และมีการชดเชยกำลังไฟฟ้ที่บัส 5 โชคชัย บัส 6 หนองกี่ ดังรูปที่ 6.25



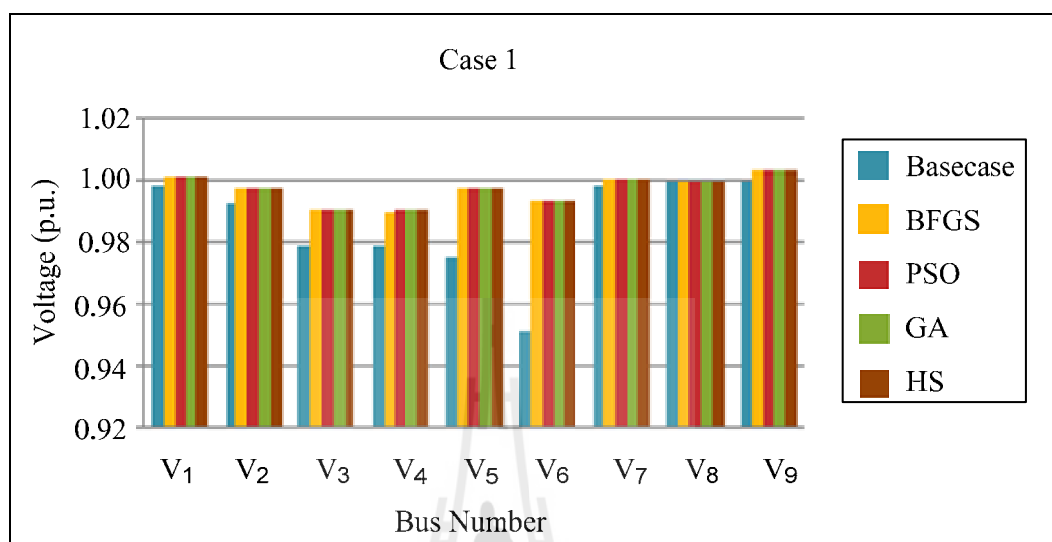
รูปที่ 6.25 ระบบทดสอบ 9 บัส (115 kV นม.2)

จากระบบทดสอบ 9 บัส ทำการจำลองเพื่อเลือกจุดการทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ปลอดภัยและมีเสถียรภาพ แล้วทำการควบคุมตัวแปรให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด จากนั้นทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี BFGS PSO GA และ HS ซึ่งทำการจำลองทั้งหมด 6 กรณี แต่ละกรณีทำการเพิ่มโหลดขึ้นเรื่อย ๆ ทีละหนึ่งเท่า ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บในการประมวลผล

6.4.1 กรณีที่ 1

จากระบบทดสอบ 9 บัส ในกรณีที่โหลดปกติ ทำการจำลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด โดยที่ระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่องภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ปลอดภัยและมีเสถียรภาพ แล้วทำการควบคุมตัวแปรให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด จากนั้นทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี BFGS PSO GA และ HS เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มี การจัดสรร

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแลบในการประมวลผล จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.26



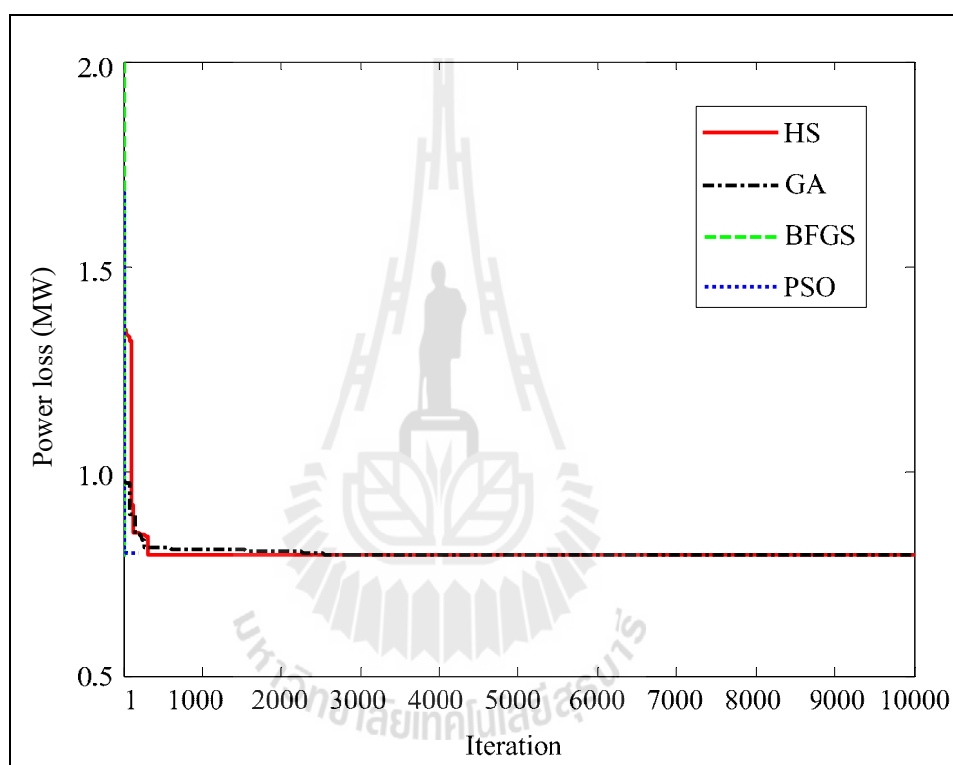
รูปที่ 6.26 เปรียบเทียบแรงดันบัสทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและแรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณีที่ 1

จากผลการจำลองของระบบทดสอบ 9 บัส โดยทำการจำลอง 30 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แรงดันบัสที่ 1 2 3 4 5 6 และ 7 จะมีค่าไม่ถึงหนึ่ง ทำให้เกิดแรงดันตก แต่เมื่อมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะช่วยชดเชยแรงดันไม่ให้เกิดแรงดันตก และทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีที่ 1

ขั้นตอนวิธี	กำลังงานสูญเสีย (MW)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	0.7942	0.8092	0.7955	0.0032	0.3749
PSO	0.7942	0.7980	0.7946	0.0007	167.7373
GA	0.7942	0.7942	0.7942	0.0000	185.4526
HS	0.7942	0.7942	0.7942	0.0000	8.4744
Basecase	1.0128				

จากผลการจำลองกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดในตารางที่ 6.10 ซึ่งทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี HS และ GA จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี PSO และวิธี BFGS ตามลำดับ แต่วิธี GA จะใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่าวิธี HS และวิธี BFGS จะใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการลู่เข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.27



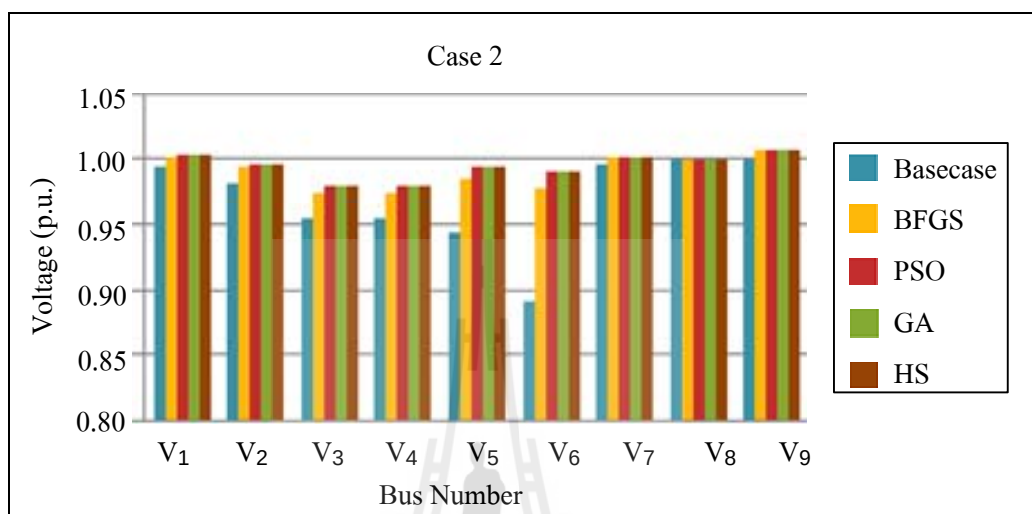
รูปที่ 6.27 กราฟการลู่เข้าสู่ของแต่ละวิธีในกรณีที่ 1

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้ง โดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นได้ว่า PSO จะลู่เข้าสู่คำตอบได้เร็วที่สุด รองลงมาเป็นวิธี BFGS HS และ GA ตามลำดับ แต่วิธี HS และ GA จะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่จุดคำตอบต่ำที่สุด

6.4.2 กรณีที่ 2

จากระบบทดสอบ 9 บัส ในกรณีที่เพิ่มโหลดเป็นหนึ่งเท่า ทำการจำลองเพื่อหาค่าเหมาะที่สุดที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ปลอดภัยและมีเสถียรภาพ แล้วทำการควบคุมตัวแปรให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด จากนั้นทำการจัดสรรกำลังไฟฟ้า

รีแอกทีฟแล้วทำการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี BFGS PSO GA และ HS เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแลบในการประมวลผล จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.28



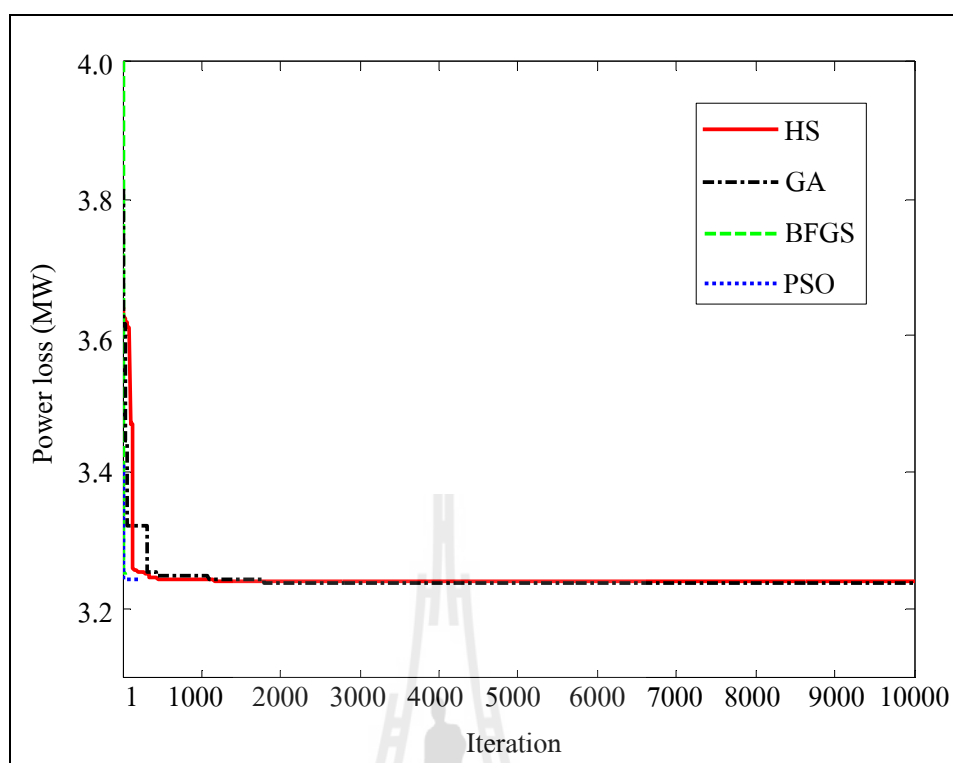
รูปที่ 6.28 เปรียบเทียบแรงดันบัสทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและแรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณี 2

จากผลการจำลองของระบบทดสอบ 9 บัส เมื่อทำการจำลอง 30 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟ แรงดันบัสที่ 1 2 3 4 5 6 และ 7 จะมีค่าไม่ถึงหนึ่งทำให้เกิดแรงดันตก แต่เมื่อมีการจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะช่วยชดเชยแรงดันไม่ให้เกิดแรงดันตก และทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ส่วนบัสที่ 8 และ 9 ไม่เกิดแรงดันตก จึงไม่มีการชดเชยแรงดันที่บัสนี้ และวิธี BFGS ชดเชยกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่าวิธีอื่น ๆ ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 6.11

ตารางที่ 6.11 กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีที่ 2

ขั้นตอนวิธี	กำลังงานสูญเสีย (MW)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	3.2439	3.9834	3.3669	0.1870	0.4698
PSO	3.2432	3.3187	3.2471	0.0140	27.9652
GA	3.2432	3.2432	3.2432	0.0000	185.4587
HS	3.2432	3.2432	3.2432	0.0000	8.4920
Basecase	4.5015				

จากผลการจำลองกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดในตารางที่ 6.11 ซึ่งทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี HS และ GA จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี PSO และวิธี BFGS ตามลำดับ แต่วิธี GA จะใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่าวิธี HS และวิธี BFGS จะใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการเข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.29

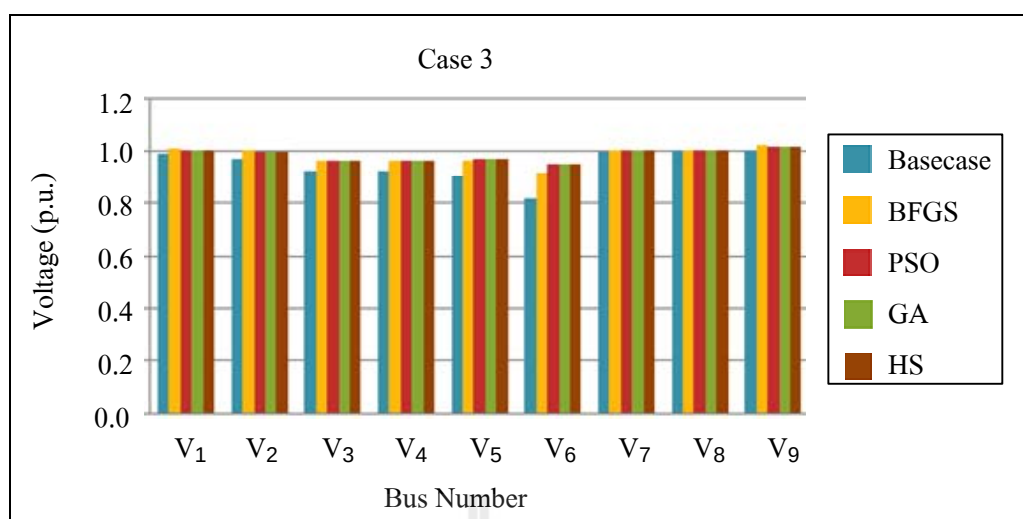


รูปที่ 6.29 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในกรณีที่ 2

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้งโดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นได้ว่า PSO จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้เร็วที่สุดรองลงมาจะเป็นวิธี BFGS HS และ GA ตามลำดับ แต่วิธี HS และ GA จะลู่เข้าสู่จุดค่าตอบต่ำที่สุด

6.4.3 กรณีที่ 3

จากระบบทดสอบ 9 บัส ในกรณีที่เพิ่มโหลดเป็นสองเท่า แล้วทำการจำลองเพื่อหาค่าเหมาะที่สุดที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ปลอดภัยแล้วทำการควบคุมตัวแปรให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด จากนั้นทำการจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟแล้วทำการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี BFGS PSO GA และ HS เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแลบในการประมวลผล จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.30



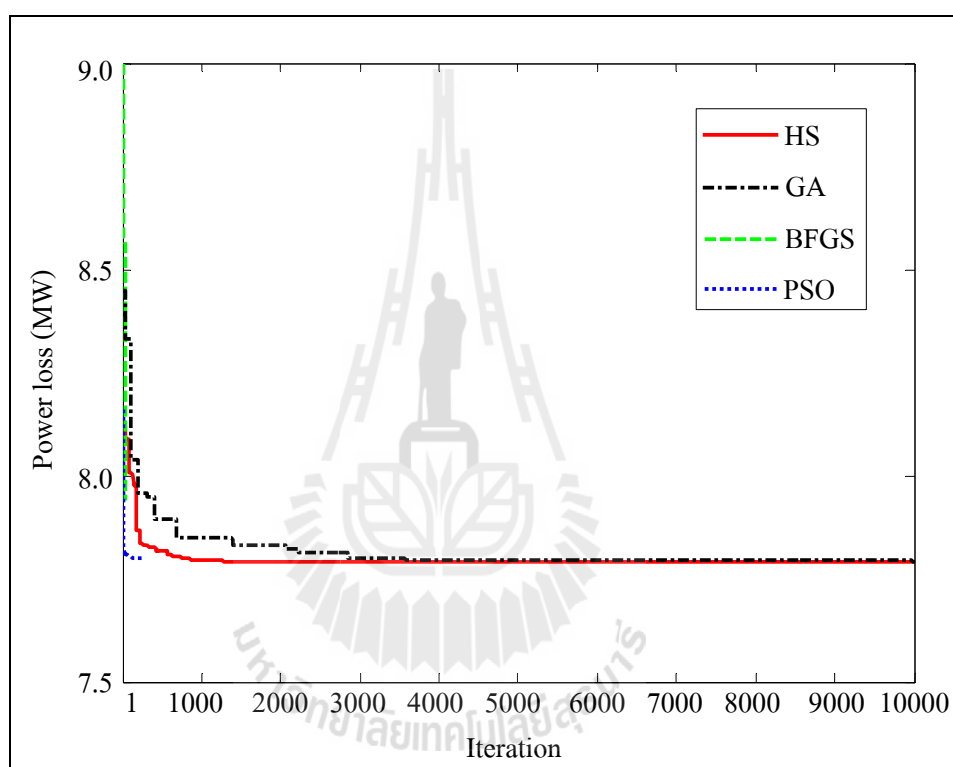
รูปที่ 6.30 เปรียบเทียบแรงดันบัสทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและแรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณีศึกษาที่ 3

จากผลการจำลองของระบบทดสอบ 9 บัส เมื่อทำการจำลอง 30 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการจัดสรรกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ แรงดันที่บัส 1 2 3 4 5 และ 6 จะมีค่าไม่ถึงหนึ่งทำให้เกิดแรงดันตก แต่เมื่อมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจะช่วยชดเชยแรงดันไม่ให้เกิดแรงดันตก และทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ภายใต้การทำงานที่ปลอดภัย ส่วนบัสที่ 7 8 และ 9 ไม่เกิดแรงดันตกจึงไม่มีการชดเชยแรงดันที่บัสนี้ ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางดังตารางที่ 6.12

ตารางที่ 6.12 กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีศึกษาที่ 3

ขั้นตอนวิธี	กำลังงานสูญเสีย (MW)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	7.9839	11.6064	8.8377	1.0210	0.5229
PSO	7.7929	7.8213	7.7972	0.0061	97.3242
GA	7.7924	7.7925	7.7924	0.0000	658.0325
HS	7.7924	7.7924	7.7924	0.0000	10.0886
Basecase	11.3585				

จากผลการจำลองกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดในตารางที่ 6.12 ซึ่งทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี HS และ GA จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี PSO และวิธี BFGS ตามลำดับ แต่วิธี GA จะใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่าวิธี HS และในการจำลองนี้ วิธี BFGS จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการลู่เข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.31



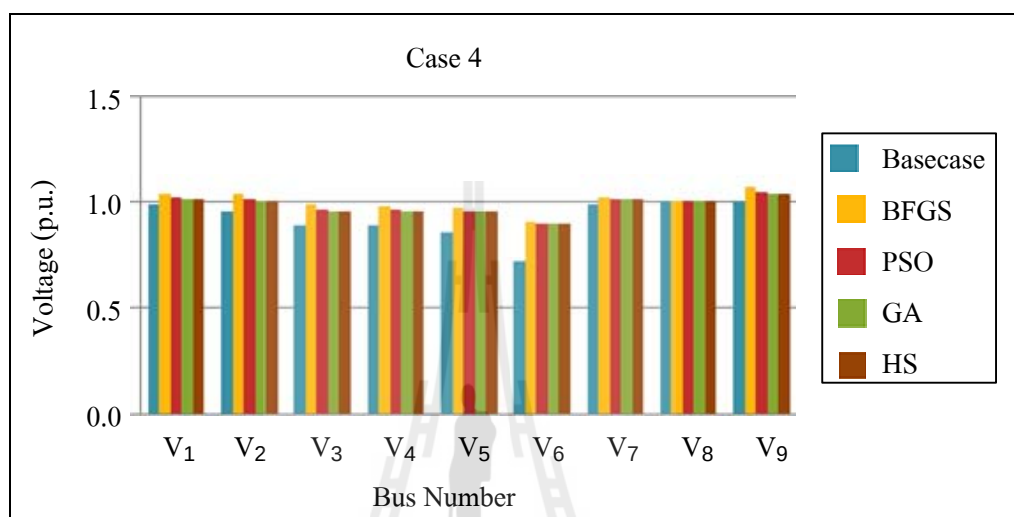
รูปที่ 6.31 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในกรณีที่ 3

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้ง โดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นได้ว่าวิธี PSO HS และ GA จะลู่เข้าสู่คำตอบได้เร็วที่สุดรองลงมาจะเป็นวิธี BFGS ตามลำดับ และวิธี HS และ GA จะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่จุดคำตอบต่ำที่สุด

6.4.4 กรณีที่ 4

จากระบบทดสอบ 9 บัส ในกรณีที่เพิ่มโหลดเป็นสามเท่า แล้วทำการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสัน จากนั้นทำการหาค่าเหมาะที่สุดที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ปลอดภัย แล้วทำการควบคุมตัวแปรให้อยู่ในขอบเขต

ที่กำหนด จากนั้นทำการจัดสรรกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแล้วทำการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี BFGS PSO GA และ HS เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการจัดสรรกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแลป ในการประมวลผลจะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.32



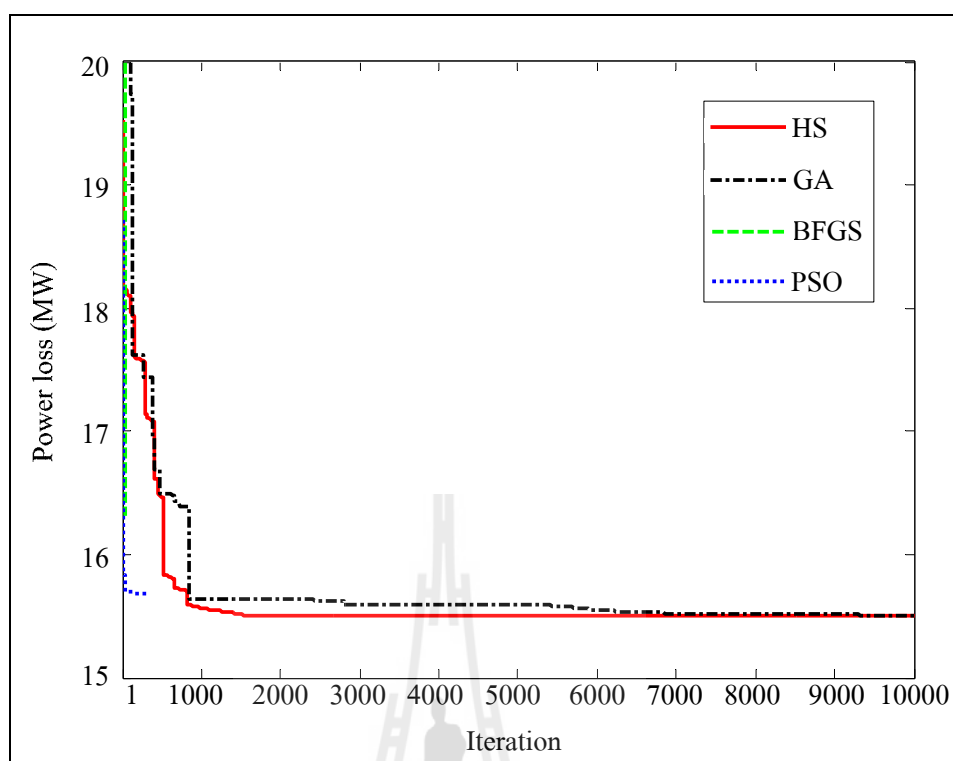
รูปที่ 6.32 เปรียบเทียบแรงดันบัสทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและแรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณีที่ 4

จากผลการจำลองของระบบทดสอบ 9 บัส เมื่อทำการจำลอง 30 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการจัดสรรกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ แรงดันที่บัส 1 2 3 4 5 6 และ 7 จะมีค่าไม่ถึงหนึ่ง ทำให้เกิดแรงดันตก แต่เมื่อมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจะช่วยชดเชยแรงดันไม่ให้เกิดแรงดันตก และทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ภายใต้การทำงานที่ปลอดภัย ส่วนบัสที่ 8 และ 9 ไม่เกิดแรงดันตกจึงไม่มีการชดเชยแรงดันที่บัสนี้ ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 6.13

ตารางที่ 6.13 กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีที่ 4

ขั้นตอนวิธี	กำลังงานสูญเสีย (MW)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	16.0370	21.7866	17.7036	1.2350	0.5482
PSO	15.5032	16.7917	15.7472	0.3470	127.2632
GA	15.4991	15.4999	15.4994	0.0002	486.8663
HS	15.4991	15.4991	15.4991	0.0000	10.1939
Basecase	23.7510				

จากผลการจำลองกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดในตารางที่ 6.13 ซึ่งทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาเป็นวิธี GA PSO และ BFGS ตามลำดับ และในการจำลองนี้ วิธี BFGS จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการลู่เข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.33

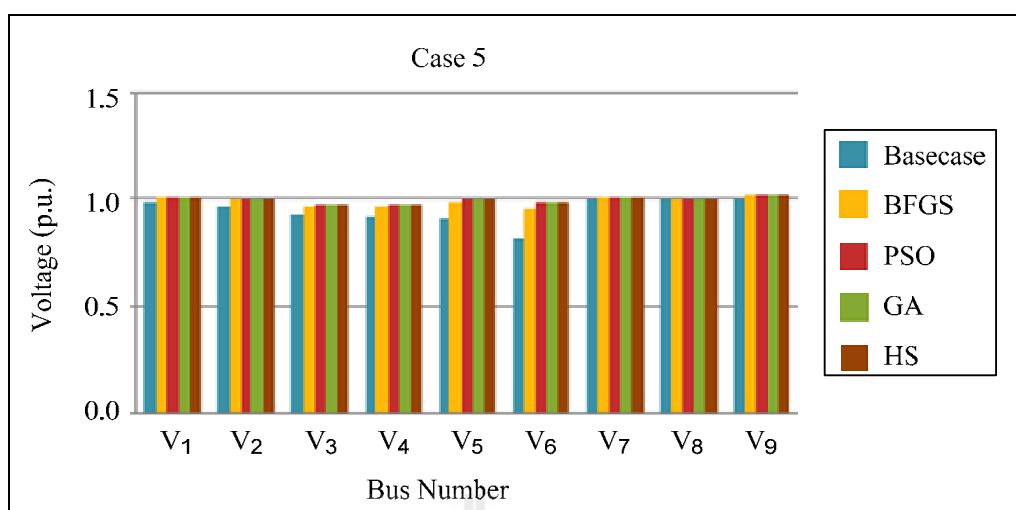


รูปที่ 6.33 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในกรณีที่ 4

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้ง โดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นได้ว่า PSO จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้เร็วที่สุด รองลงมาจะเป็นวิธี HS GA และ BFGS ตามลำดับ แต่วิธี HS จะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่จุดค่าตอบต่ำที่สุด

6.4.5 กรณีที่ 5

จากระบบทดสอบ 9 บัส ในกรณีที่เพิ่มโหลดเป็นสองเท่า แล้วทำการขยายขอบเขตของกำลังไฟฟัรีแอกทีฟที่บัส 5 และ 6 โดยทำการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสัน จากนั้นทำการหาค่าเหมาะที่สุดที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ปลอดภัย แล้วทำการควบคุมตัวแปรให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด จากนั้นทำการจัดสรรกำลังไฟฟัรีแอกทีฟแล้วทำการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี BFGS PSO GA และ HS เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มี การจัดสรรกำลังไฟฟัรีแอกทีฟ ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแลบในการประมวลผล จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.34



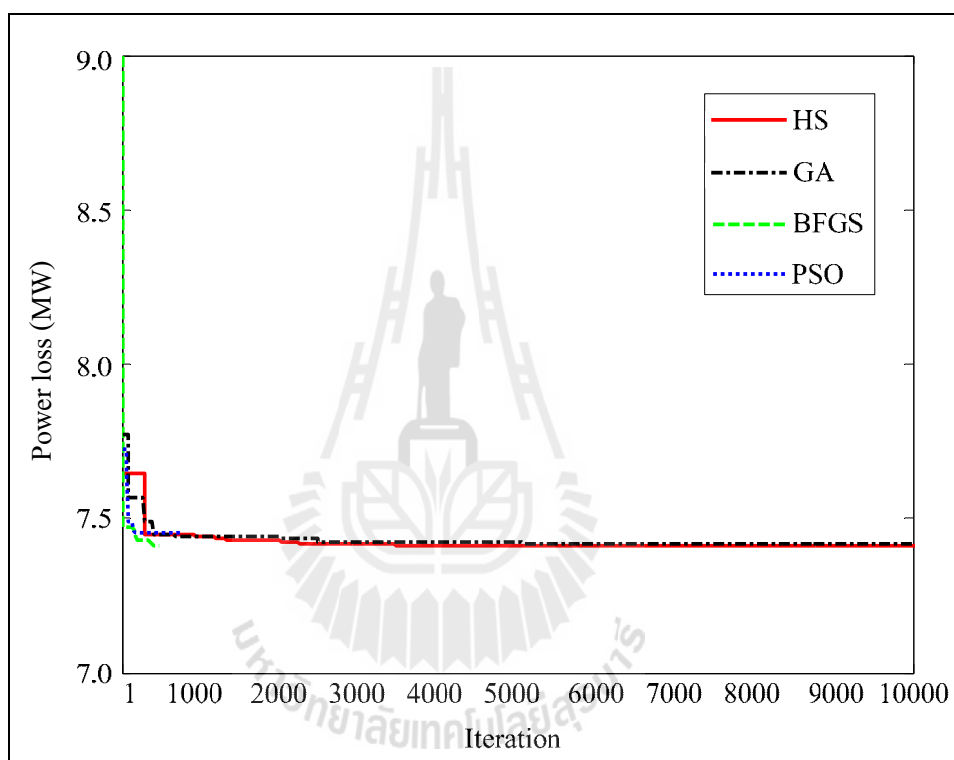
รูปที่ 6.34 เปรียบเทียบแรงดันบัสทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและแรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณีที่ 5

จากผลการจำลองของระบบทดสอบ 9 บัส เมื่อทำการจำลอง 30 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการจัดสรรกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ แรงดันที่บัส 1 2 3 4 5 และ 6 จะมีค่าไม่ถึงหนึ่งทำให้เกิดแรงดันตก แต่เมื่อมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ จะช่วยชดเชยแรงดันไม่ให้เกิดแรงดันตก และทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ภายใต้การทำงานที่ปลอดภัย ส่วนบัสที่ 7 8 และ 9 ไม่เกิดแรงดันตกจึงไม่มีการชดเชยแรงดันที่บัสนี้ จากรูปที่ 6.34 จะเห็นว่าวิธี GA และ HS จะชดเชยแรงดันได้เท่ากันทุกบัส ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 6.14

ตารางที่ 6.14 กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีที่ 5

ขั้นตอนวิธี	กำลังงานสูญเสีย (MW)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	7.4090	11.6897	7.9915	0.9679	0.4464
PSO	7.4090	7.4154	7.4099	0.0014	56.6314
GA	7.4090	7.4090	7.4090	0.0000	640.7064
HS	7.4090	7.4090	7.4090	0.0000	9.2502
Basecase	11.3585				

จากผลการจำลองกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดในตารางที่ 6.14 ซึ่งทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี HS และ GA จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ แต่วิธี GA จะใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่าวิธี HS และในการจำลองนี้ วิธี BFGS จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยที่สุด ส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการลู่เข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.35

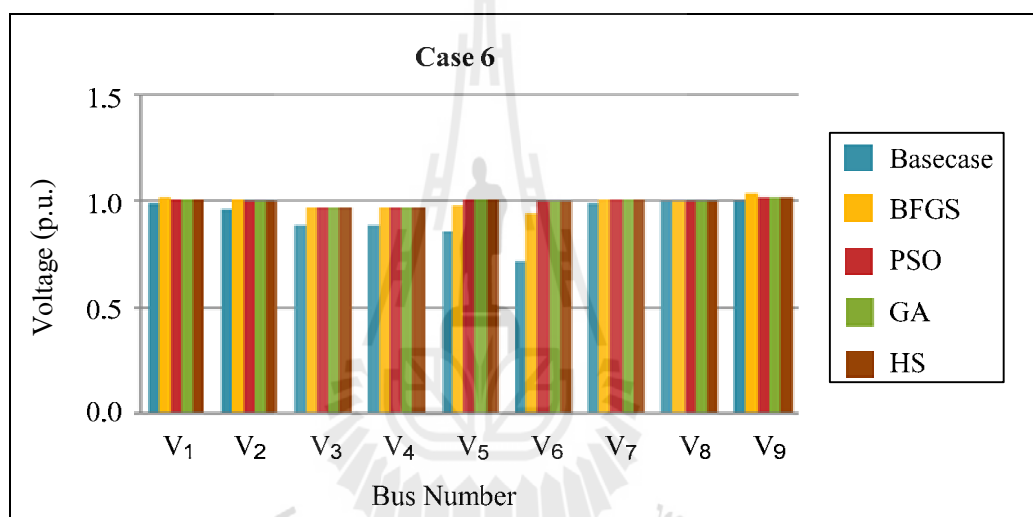


รูปที่ 6.35 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในกรณีที่ 5

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้งโดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นว่าวิธี BFGS จะลู่เข้าสู่คำตอบได้เร็วที่สุดรองลงมาจะเป็นวิธี PSO HS และ GA ตามลำดับ แต่วิธี HS จะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่จุดคำตอบต่ำที่สุด

6.4.6 กรณีที่ 6

จากระบบทดสอบ 9 บัส ในกรณีที่เพิ่มโหลดเป็นสามเท่า แล้วทำการขยายขอบเขตของกำลังไฟรีแอกทีฟที่บัส 5 และ 6 โดยทำการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสัน จากนั้นทำการหาค่าเหมาะที่สุดที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ปลอดภัย แล้วทำการควบคุมตัวแปรให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด จากนั้นทำการจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟแล้วทำการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี BFGS PSO GA และ HS เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มี การจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ซึ่งแต่ละวิธีทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยใช้โปรแกรมแมทแลบในการประมวลผล จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.36



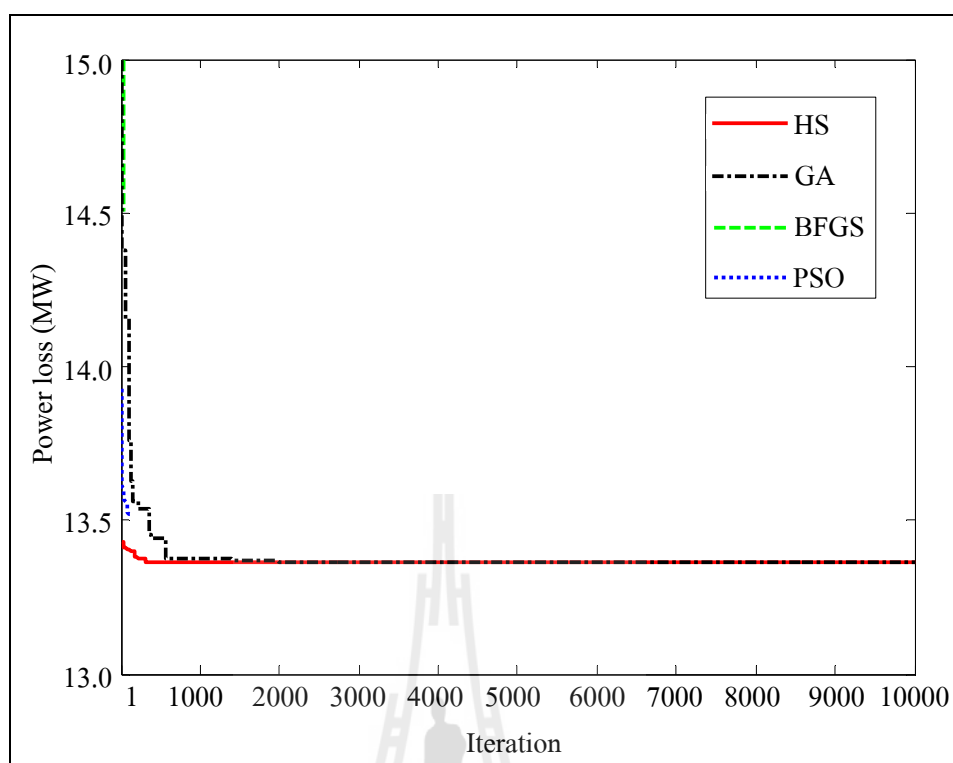
รูปที่ 6.36 เปรียบเทียบแรงดันบัสทั้ง 9 บัสแต่ละวิธีและแรงดันก่อนการปรับปรุงระบบของกรณีที่ 6

จากผลการจำลองของระบบทดสอบ 9 บัส เมื่อทำการจำลอง 30 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟ แรงดันที่บัส 1 2 3 4 5 6 และ 7 จะมีค่าไม่ถึงหนึ่ง ทำให้เกิดแรงดันตก แต่เมื่อมีการจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะช่วยชดเชยแรงดันไม่ให้เกิดแรงดันตก และทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ภายใต้การทำงานที่ปลอดภัย ส่วนบัสที่ 8 และ 9 ไม่เกิดแรงดันตกจึงไม่มีการชดเชยแรงดันที่บัสนี้ จากรูปที่ 6.36 จะเห็นว่าวิธี GA PSO และ HS จะชดเชยแรงดันได้ใกล้เคียงกันทุกบัส ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 6.15

ตารางที่ 6.15 กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัสของกรณีที่ 6

ขั้นตอนวิธี	กำลังงานสูญเสีย (MW)				เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	13.3635	28.7358	15.5831	3.1960	0.4731
PSO	13.3635	13.3692	13.3640	0.0013	82.9693
GA	13.3635	13.3635	13.3635	0.0000	498.4388
HS	13.3635	13.3635	13.3635	0.0000	10.1588
Basecase	23.7510				

จากผลการจำลองกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดในตารางที่ 6.15 ซึ่งทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล จะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี HS และ GA จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ รองลงมาจะเป็นวิธี PSO และ BFGS ตามลำดับ แต่วิธี HS จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าวิธี GA และในการจำลองนี้ วิธี BFGS จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยที่สุดส่วนวิธี GA จะใช้เวลามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการลู่เข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีได้ดังรูปที่ 6.37



รูปที่ 6.37 กราฟการลู่เข้าของแต่ละวิธีในกรณีที่ 6

จากกราฟเมื่อทำการจำลอง 1 ครั้งโดยใช้จำนวนรอบเท่ากันที่ 10000 รอบ จะเห็นว่าวิธี HS จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้เร็วที่สุดรองลงมาจะเป็นวิธี GA PSO และ BFGS ตามลำดับ แต่วิธี HS และ GA จะลู่เข้าสู่จุดค่าตอบได้ดีที่สุด

6.5 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลการจำลองโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบได้แก่ ระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส และ 169 บัส (กฟผ.) ซึ่งได้ผลการจำลองในด้านค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตโดยรวมคือ วิธี HS จะได้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดรองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ วิธี PSO ตามลำดับต่อไป ใช้ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดควาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบได้แก่ระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส และ 30 บัส จะได้ว่าระบบทดสอบ 6 บัส วิธีที่มีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี HS รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ ระบบทดสอบ 14 บัส วิธีที่มีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี BFGS รองลงมาเป็นวิธี HS PSO และวิธี BFGS ตามลำดับ ระบบทดสอบ 30 บัส วิธี GA มีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด รองลงมาเป็นวิธี PSO HS และวิธี BFGS ตามลำดับต่อไป

เมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 9 บัส (115 kV นครราชสีมา 2) โดยแบ่งออกเป็น 5 กรณี ดังนี้ (1) โหลดปกติ (2) เพิ่มโหลดหนึ่งเท่า (3) เพิ่มโหลดสองเท่า (5) เพิ่มโหลดสองเท่าพร้อมทั้งขยายขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส 5 และ 6 (6) เพิ่มโหลดสามเท่าพร้อมทั้งขยายขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส 5 และ 6 จะเห็นได้ว่าวิธีที่มีค่าเฉลี่ยของกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดคือวิธี HS และวิธี GA รองลงมาเป็นวิธี PSO และวิธี BFGS ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ (4) เพิ่มโหลดสามเท่า วิธี HS มีค่าเฉลี่ยของกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุด รองลงมาเป็นวิธี GA PSO และ BFGS ตามลำดับ ซึ่งจากผลการจำลองจะเห็นได้ว่ากรณีที่ 3 กับกรณีที่ 5 มีการเพิ่มโหลดเป็นสองเท่าเหมือนกัน แต่กรณีที่ 5 มีการขยายขอบเขตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส 5 และ 6 ซึ่งจะทำให้ได้กำลังสูญเสียของสายส่งน้อยกว่ากรณีที่ 3 และในกรณีที่ 4 กับกรณีที่ 6 ก็มีการเพิ่มโหลดเป็นสามเท่าเหมือนกัน โดยกรณีที่ 6 มีขยายขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส 5 และ 6 ดังนั้นจึงทำให้กรณีที่ 6 มีกำลังงานสูญเสียน้อยกว่ากรณีที่ 4



บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้การค้นหาค่าความบรรสานในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ระบบไฟฟ้าเกิดความสมดุล โดยการนำเอาวิธีการจ่ายโหลดอย่างประหยัดและการจัดสรรกำลังไฟฟ้าวีอาร์แอกทีฟเข้าด้วยกัน เพื่อให้ต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ภายใต้การทำงานที่ต่อเนื่องและปลอดภัย ในการจำลองนี้จะใช้ระบบทดสอบมาตรฐาน (IEEE) 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส ระบบทดสอบจริงของนครราชสีมา 9 บัส (115kV นครราชสีมา 2) และระบบทดสอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยของภาคกลางตอนบนและภาคกลางด้านตะวันตกรวม 169 บัส โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบ (smooth quadratic function) และฟังก์ชันที่มีจุดเปิดควาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ (non-smooth valve point loading function) ภายใต้เงื่อนไขบังคับที่เป็นสมการและอสมการ โดยใช้วิธีการปรับโทพแปลงการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขไปเป็นปัญหาค่าที่เหมาะสมแบบไม่มีเงื่อนไข แล้วดำเนินการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการเลือกจุดการทำงานที่เหมาะสมกับระบบทดสอบด้วยวิธี HS เปรียบเทียบกับวิธี BFGS GA และ PSO ซึ่งทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยทำการแบ่งวิทยานิพนธ์ออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

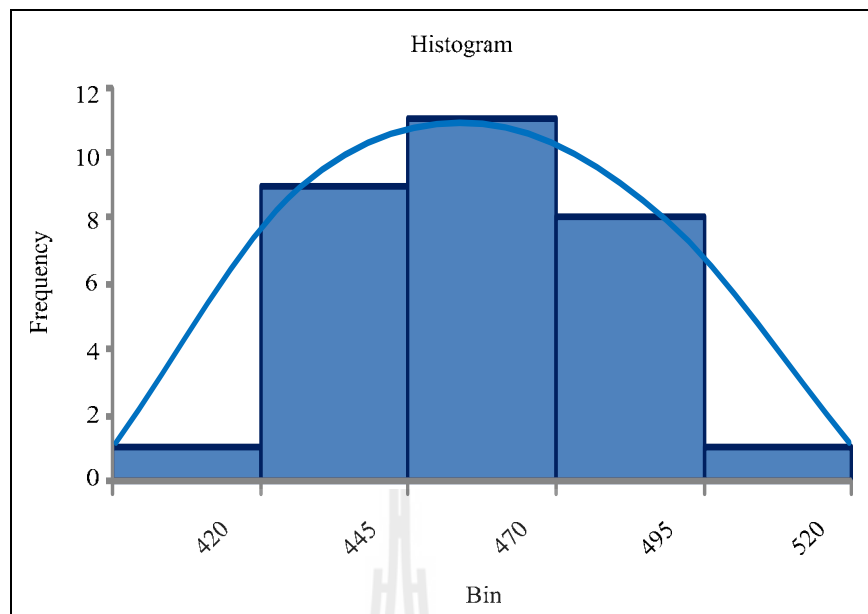
1. การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยการจ่ายโหลดอย่างประหยัด โดยใช้วิธี HS เปรียบเทียบกับวิธี BFGS GA และ PSO โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำลังสองแบบราบเรียบ (smooth quadratic function) และใช้ระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส และ 169 บัส ซึ่งจะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระบบทดสอบว่าเหมาะสมกับวิธีไหน จากผลการจำลอง วิธี GA จะใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่าวิธีอื่น ๆ และวิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ

2. การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ด้วยวิธี HS เปรียบเทียบกับวิธี BFGS GA และ PSO โดยใช้ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดควาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ (non-smooth valve point loading function) เนื่องจากรูปแบบของปัญหามีความซับซ้อนมากขึ้นนั่นคือในกรณีที่หน่วยการผลิตกำลังไฟฟ้าเป็นแบบกักหนื่อน้ำหลายวาล์ว

(multi-valve stream turbine) ซึ่งจุดที่มีการเปิดวาล์วจะต้องใช้พลังงานความร้อนสูงขึ้น ดังนั้นจึงไม่สามารถจำลองโดยใช้สมการกำลังสองได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการจำลองโดยใช้ระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส และ 30 บัส

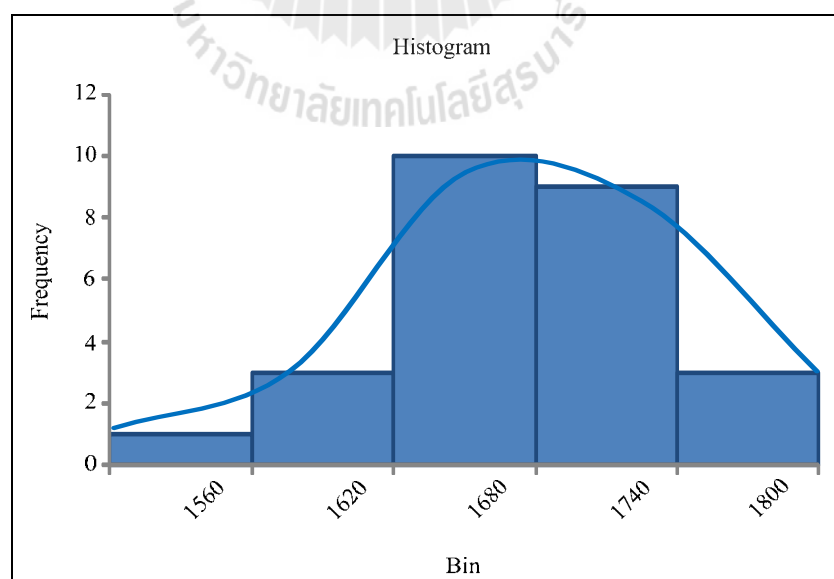
3. การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อเลือกจุดการทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุดภายใต้การทำงานในขอบเขตที่ปลอดภัย โดยการควบคุมแรงดันบัสที่บัสควบคุม ซึ่งควบคุมค่าแท็ปหม้อแปลงในระบบส่งจ่าย รวมทั้งพิจารณาถึงการติดตั้งตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยใช้ระบบทดสอบ 9 บัส (115kV นครราชสีมา 2) ซึ่งแบ่งเป็น 6 กรณี คือ (1) กรณีโหลดปกติ (2) กรณีเพิ่มโหลดเป็นหนึ่งเท่า (3) กรณีเพิ่มโหลดเป็นสองเท่า (4) กรณีเพิ่มโหลดเป็นสามเท่า (5) กรณีที่เพิ่มขอบเขตเงื่อนไขข้อสมการของโหลดสามเท่า และ (6) กรณีที่เพิ่มขอบเขตเงื่อนไขข้อสมการของโหลดสี่เท่า แล้วทำการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของทั้ง 6 กรณีด้วยวิธี HS เปรียบเทียบกับวิธี BFGS GA และ PSO

ซึ่งจากผลการจำลองที่ได้วิธี HS จะมีจุดเด่นคือจะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูลน้อยกว่าวิธี BFGS GA และ PSO เมื่อทำการจำลอง 30 ครั้ง ที่เลือกทำการจำลอง 30 ครั้ง เนื่องจากเป็นการสุ่มขนาดตัวอย่างใหญ่ (Large Sample : $n \geq 30$) ซึ่งจะทำให้การแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าเฉลี่ยตัวอย่างที่สุ่มมาจะเข้าใกล้การแจกแจงปกติ คือ ค่าเฉลี่ย มัชฐานและฐานนิยมอยู่ที่จุดเดียวกัน ($\text{mean}=\text{median}=\text{mode}$) โดยไม่ว่าจะทำการสุ่มกี่ครั้งก็จะได้ค่าออกมาเหมือนกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกทำการจำลองที่ค่าน้อยที่สุดคือ 30 ครั้ง (ทวิรัตน์า ศิวคุลย์, 2539) โดยสามารถแสดงเป็นรูปกราฟการแจกแจงปกติได้ดังนี้



รูปที่ 7.1 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัคของระบบทดสอบ 6 บิต แบบราบเรียบ

จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าการแจกแจงใกล้เคียงการแจกแจงปกติ เนื่องจากกราฟมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ปลายโค้งทั้งสองข้างไม่จรดกับฐาน และมีจุดโค้งสูงสุดเพียงจุดเดียวคือจุดที่มีความถี่สูงสุดอยู่ที่ค่าเฉลี่ย โดยในกราฟรูปนี้จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 470



รูปที่ 7.2 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัคของระบบทดสอบ 14 บิต แบบราบเรียบ

จากกราฟจะเห็นได้ว่าการแจกแจงของข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ซ้ายนั้นแสดงว่า มัธยฐานจะเป็นค่ากลางที่ดีที่สุด ซึ่งกราฟมีลักษณะเป็นรูปประหลาดว่า ปลายโค้งทั้งสองข้างไม่จรดกับฐาน และมีจุดโค้งสูงสุดเพียงจุดเดียวคือ ค่าต้นทุนการผลิตมีความถี่มากที่สุดอยู่ที่ 1680

ซึ่งสามารถสรุปผลการจำลองของระบบทดสอบมาตรฐาน (IEEE) 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส ระบบทดสอบของนครราชสีมา 9 บัส (115kV นครราชสีมา2) และระบบทดสอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยของภาคกลางตอนบนและภาคกลางด้านตะวันตก รวม 169 บัส โดยแบ่งเป็นสรุปในด้านจำนวนรอบที่ลู่อเข้า ค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิต เวลาเฉลี่ยของต้นทุนการผลิต และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตได้ดังนี้

ตารางที่ 7.1 จำนวนรอบที่ลู่อเข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธี

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	กรณีศึกษา	จำนวนครั้งที่ลู่อเข้า (Trial)			
		BFGS	PSO	GA	HS
Smooth	IEEE 6 bus	30	30	30	30
	IEEE 14 bus	30	28	30	30
	IEEE 30 bus	30	2	30	30
	IEEE 57 bus	30	0	30	30
	IEEE 118 bus	8	9	30	30
	EGAT 169 bus	5	3	30	30
Non-Smooth	IEEE 6 bus	30	30	30	30
	IEEE 14 bus	30	27	30	30
	IEEE 30 bus	30	8	30	30

จากตารางที่ 7.1 แสดงจำนวนรอบที่ลู่อเข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีของระบบทดสอบทั้งหมด จะได้ว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นกำลังสองแบบราบเรียบเมื่อทำการจำลองทั้งหมด 30 ครั้ง ซึ่งระบบทดสอบที่ใช้ วิธี BFGS แล้วลู่อเข้าสู่คำตอบ 30 ครั้ง ได้แก่ ระบบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส และ 57 บัส ส่วนระบบทดสอบ 118 บัส และ 169 บัส จะลู่อเข้าสู่คำตอบ 8 ครั้ง และ 5 ครั้ง ตามลำดับต่อไประบบทดสอบที่ใช้วิธี PSO แล้วลู่อเข้าสู่คำตอบ 30 ครั้ง ได้แก่ ระบบ 6 บัส ส่วนระบบทดสอบ 14 บัส 30 บัส 118 บัส และ 169 บัส จะลู่อเข้าสู่คำตอบ 28 2 9 และ 3 ครั้ง ตามลำดับ ซึ่งระบบ 57 บัสจะไม่ลู่อเข้าสู่คำตอบเลย ระบบทดสอบที่ใช้วิธี GA และ HS แล้วลู่อเข้าสู่คำตอบ 30 ครั้ง ได้แก่ระบบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส

ตารางที่ 7.2 สรุปการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสีย
ของแต่ละวิธี (ต่อ)

ขั้นตอนวิธี ปัญหา	วิธีคล้ายนิวตัน (BFGS)				วิธีเชิงพันธุกรรม (GA)				วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO)				วิธีค้นหาความ บรรสาน (HS)			
	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
-กรณี 1 โหลดปกติ			✓		✓					✓			✓			
-กรณี 2 เพิ่มโหลด 1 เท่า			✓		✓					✓			✓			
-กรณี 3 เพิ่มโหลด 2 เท่า			✓		✓					✓			✓			
-กรณี 4 เพิ่มโหลด 3 เท่า				✓	✓						✓		✓			
-กรณี 5 เพิ่มโหลด 2 เท่า และขยายขอบเขต Q_{cs}, Q_{c6}			✓		✓					✓			✓			
-กรณี 6 เพิ่มโหลด 3 เท่า และขยายขอบเขต Q_{cs}, Q_{c6}			✓		✓					✓			✓			

หมายเหตุ : หมายเหตุ : 1 = ปรับปรุง 2 = พอใช้ 3 = ดี 4 = ดีมาก

จากตารางที่ 7.2 เป็นการเปรียบเทียบการหาค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียของแต่ละวิธีโดยใช้เกณฑ์การตัดสินของแต่ละระบบทดสอบดังนี้ ปรับปรุง หมายถึงมีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียของระบบมากที่สุด พอใช้ หมายถึงมีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียของระบบน้อยกว่าระดับปรับปรุง ดี หมายถึงมีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียของระบบน้อยกว่าระดับพอใช้ ดีมาก หมายถึงมีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียของระบบน้อยที่สุด ซึ่งสามารถสรุปจากตารางได้ว่า เมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำลังสองแบบราบเรียบของระบบทดสอบมาตรฐาน 6 บัส จะเห็นได้ว่าวิธี BFGS มีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด (4 = ดีมาก) รองลงมาเป็นวิธี GA (3 = ดี) HS (2 = พอใช้) และ PSO (1 = ปรับปรุง) ตามลำดับ ระบบทดสอบ 14 บัส วิธี HS มีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด รองลงมาเป็นวิธี BFGS PSO และ GA ตามลำดับ ระบบทดสอบ 30 บัส วิธี HS มีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดรองลงมาเป็นวิธี GA PSO และ BFGS ตามลำดับ ระบบทดสอบ 57 บัส วิธีที่มีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี HS รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS

และ PSO ตามลำดับ ระบบทดสอบ 118 บัส วิธีที่มีค่าเฉลี่ยต้นทุนของการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี HS รองลงมาเป็นวิธี GA PSO และ BFGS ตามลำดับ ระบบทดสอบ 169 บัส (กฟผ.) วิธีที่มีค่าเฉลี่ยต้นทุนของการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี HS รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ ต่อไปใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีจุดเปิดควาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ โดยใช้ระบบทดสอบ 6 บัส วิธีที่มีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี HS รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ ระบบทดสอบ 14 บัส วิธีที่มีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี BFGS รองลงมาเป็นวิธี HS PSO และ GA ตามลำดับ ระบบทดสอบ 30 บัส วิธี GA มีค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด รองลงมาเป็นวิธี PSO HS และวิธี BFGS ตามลำดับ ต่อไปเมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 9 บัส (115 kV นครราชสีมา 2) โดยแบ่งเป็น 6 กรณี ดังนี้ กรณีที่ (1) โหลดปกติ (2) เพิ่มโหลดหนึ่งเท่า (3) เพิ่มโหลดสองเท่า (4) เพิ่มโหลดสองเท่าพร้อมทั้งขยายขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส 5 และ 6 (5) เพิ่มโหลดสามเท่าพร้อมทั้งขยายขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส 5 และ 6 จะมีค่าเฉลี่ยของกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดคือวิธี HS และวิธี GA รองลงมาเป็นวิธี PSO และวิธี BFGS ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ (6) เพิ่มโหลดสามเท่า วิธี HS มีค่าเฉลี่ยของกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุด รองลงมาเป็นวิธี GA PSO และ BFGS ตามลำดับ ซึ่งแต่ละวิธีใช้เวลาในการประมวลผลดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 สรุปการเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผลของต้นทุนการผลิต
และกำลังงานสูญเสียของแต่ละวิธี

ขั้นตอนวิธี ปัญหา	วิธีกล้วยนิวตัน (BFGS)				วิธีเชิงพันธุกรรม (GA)				วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO)				วิธีค้นหาความ บรรสาน (HS)			
	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ กำลังสองแบบราบเรียบ																
-ระบบทดสอบ 6 บัส	✓							✓		✓					✓	
-ระบบทดสอบ 14 บัส	✓							✓		✓					✓	
-ระบบทดสอบ 30 บัส	✓							✓			✓			✓		
-ระบบทดสอบ 57 บัส			✓					✓		✓			✓			
-ระบบทดสอบ 118 บัส			✓					✓		✓			✓			
-ระบบทดสอบ 169 บัส			✓					✓		✓			✓			

ตารางที่ 7.3 สรุปการเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผลของต้นทุนการผลิต
และกำลังงานสูญเสียของแต่ละวิธี (ต่อ)

ขั้นตอนวิธี ปัญหา	วิธีคล้ายนิวตัน (BFGS)				วิธีเชิงพันธุกรรม (GA)				วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO)				วิธีค้นหาความ บรรสาน (HS)			
	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ กำลังสองแบบไม่ ราบเรียบ																
-ระบบทดสอบ 6 บัต์	✓							✓		✓					✓	
-ระบบทดสอบ 14 บัต์	✓							✓		✓					✓	
-ระบบทดสอบ 30 บัต์	✓							✓		✓					✓	
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ กำลังงานสูญเสีย																
-กรณี 1 โหลดปกติ	✓							✓			✓			✓		
-กรณี 2 เพิ่มโหลด 1 เท่า	✓							✓			✓			✓		
-กรณี 3 เพิ่มโหลด 2 เท่า	✓							✓			✓			✓		
-กรณี 4 เพิ่มโหลด 3 เท่า	✓							✓			✓			✓		
-กรณี 5 เพิ่มโหลด 2 เท่า และขยายขอบเขต Q_{c5}, Q_{c6}	✓							✓			✓			✓		
-กรณี 6 เพิ่มโหลด 3 เท่า และขยายขอบเขต Q_{c5}, Q_{c6}	✓							✓			✓			✓		

หมายเหตุ : 1 = ปรับปรุง 2 = พอใช้ 3 = ดี 4 = ดีมาก

จากตารางที่ 7.3 เป็นการเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผลของการหาต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียของแต่ละวิธี โดยใช้เกณฑ์การตัดสินของแต่ละระบบทดสอบ ดังนี้ ปรับปรุง หมายถึงมีค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของระบบมากที่สุด พอใช้ หมายถึงมีค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของระบบน้อยกว่าระดับปรับปรุง

ตารางที่ 7.4 สรุปการเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิต
และกำลังงานสูญเสียของแต่ละวิธี (ต่อ)

ขั้นตอนวิธี ปัญหา	วิธีคล้ายนิวตัน (BFGS)				วิธีเชิงพันธุกรรม (GA)				วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO)				วิธีค้นหาความ บรรสาน (HS)			
	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
-กรณี 6 เพิ่มโหลด 3 เท่า และขยายขอบเขต Q_{c5}, Q_{c6}			✓		✓					✓			✓			

หมายเหตุ : 1 = ปรับปรุง 2 = พอใช้ 3 = ดี 4 = ดีมาก

จากตารางที่ 7.4 เป็นการเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียแต่ละวิธี โดยใช้เกณฑ์การตัดสินของแต่ละระบบทดสอบดังนี้ ปรับปรุง หมายถึงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียของระบบมากที่สุด พอใช้ หมายถึงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียของระบบน้อยกว่าระดับปรับปรุง ดี หมายถึงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียของระบบน้อยกว่าระดับพอใช้ ดีมาก หมายถึงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียของระบบน้อยกว่าที่สุด ซึ่งสามารถสรุปจากตารางได้ว่า เมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำลังสองแบบราบเรียบของระบบทดสอบมาตรฐาน 6 บั๊ต จะเห็นได้ว่าวิธี HS จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด (4 = ดีมาก) รองลงมาเป็นวิธี PSO (3 = ดี) BFGS (2 = พอใช้) และ GA (1 = ปรับปรุง) ตามลำดับ ระบบทดสอบ 14 บั๊ต วิธี HS มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ ระบบทดสอบ 30 บั๊ต วิธี HS มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด รองลงมาเป็นวิธี GA PSO และ BFGS ตามลำดับ ระบบทดสอบ 57 บั๊ต วิธีที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี HS รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และวิธี PSO ตามลำดับ ระบบทดสอบ 118 บั๊ต วิธีที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี HS รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ ระบบทดสอบ 169 บั๊ต (กฟผ.) วิธีที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี HS รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และ PSO ตามลำดับ ต่อไปใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ โดยใช้ระบบทดสอบ 6 บั๊ต วิธีที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี HS รองลงมาเป็นวิธี GA BFGS และวิธี PSO ตามลำดับ ระบบทดสอบ 14 บั๊ต วิธีที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือวิธี HS รองลงมาเป็น

วิธี GA BFGS และ PSO ระบบทดสอบ 30 บัส วิธี HS มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด รองลงมาเป็นวิธี GA PSO และ BFGS ตามลำดับ ต่อไปเมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 9 บัส (115 kV นครราชสีมา 2) โดยแบ่งเป็น 6 กรณี ดังนี้ กรณีที่ (1) โหลดปกติ (2) เพิ่มโหลดหนึ่งเท่า (3) เพิ่มโหลดสองเท่า (5) เพิ่มโหลดสองเท่าพร้อมทั้งขยายขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส 5 และ 6 (6) เพิ่มโหลดสามเท่าพร้อมทั้งขยายขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส 5 และ 6 จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดคือวิธี HS และวิธี GA รองลงมาเป็นวิธี PSO และวิธี BFGS ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ (4) เพิ่มโหลดสามเท่า วิธี HS มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุด รองลงมาเป็นวิธี GA PSO และวิธี BFGS ตามลำดับ

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าจากผลการจำลองการหาต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน วิธีคล้ายนิวตัน วิธีเชิงพันธุกรรม และวิธีฝูงอนุภาค โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับแต่ละวิธี เมื่อทำการจำลองผลทั้งหมด 30 ครั้ง วิธีการค้นหาความบรรสานจะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีคล้ายนิวตัน วิธีเชิงพันธุกรรม และวิธีฝูงอนุภาค รวมทั้งค่าตัวแปรที่ทำการควบคุมจะอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการค้นหาความบรรสานจะเหมาะกับระบบทดสอบที่มีขนาดใหญ่ (ระบบทดสอบ 57 บัส 118 บัส และ 169 บัส) เนื่องจากใช้เวลาในการประมวลผลและค่าต้นทุนการผลิตมีค่าน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. การจำลองการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยการจ่ายโหลดอย่างประหยัดและการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อเลือกจุดการทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุด ซึ่งจะทำให้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน เปรียบเทียบกับวิธีคล้ายนิวตัน วิธีเชิงพันธุกรรม และวิธีฝูงอนุภาค จะต้องปรับตั้งค่าพารามิเตอร์และจำนวนรอบของแต่ละวิธีให้เหมือนกัน เพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน

2. การหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องทำการปรับตั้งให้เหมาะสมกับของแต่ละวิธี ดำเนินการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับวิธีนั้น ๆ และต้องกำหนดค่าเริ่มต้นและขอบเขตให้เหมาะสมกับวิธีที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ เพื่อให้การหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดและใช้เวลาไม่มากนัก

3. ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์การปรับโทษ (penalty parameter : ρ) ของวิธีการปรับโทษที่ใช้ในการแปลงปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ (constraint optimization) ให้เป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ (unconstraint optimization) ให้เหมาะสมกับระบบที่นำมาทำการจำลอง

รายการอ้างอิง

- ทวิรัตน์ ศิวคุลย์ (2539). สถิติและความน่าจะเป็น. ชุดประกอบการเรียนภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 249-254.
- ธนัชชัย กุลวรรณิพงษ์ (2550). เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 130-139.
- ธนัชชัย กุลวรรณิพงษ์ (2551). การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. เอกสารประกอบการสอน
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 130-139.
- ธนัชชัย กุลวรรณิพงษ์ (2542). การทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้การตัดสินใจแบบ
ฟัซซี่. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 21-26
- ปรเมศ อิงสุวรรณ และ สมชาติ จิรวิภากร (2551). การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการ
แก้ปัญหาลอการิธึมการหาเส้นทาง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า.
- พัฒนะ พงษ์จรรยา (2545). การประยุกต์ใช้เงินเนติกันตอนวิธีในการจำลองตลาดซื้อขายไฟฟ้า.
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภาสุระ อังกุลานนท์ และ พงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (2552). การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการแก้ไขปัญห
ด้วยวิธีฮิวริสติก และวิธีฟลูมดสำหรับปัญหาชนิดไม่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทาง
ทรัพยากร. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มศว. ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 หน้า 28-30.
- อภิรักษ์ สกุลพงษ์ (2550). การจัดเรียงสายป้อนเพื่อการลดค่ากำลังงานสูญเสียและเพื่อการปรับปรุง
คุณค่าความเชื่อถือในระบบจำหน่ายโดยใช้เทคนิคการจำลองแอนนิลลิง. วิทยานิพนธ์
มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan, G.V. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm :
Harmony Search. Simulation 76(2) 60-68.
- Geem, Z.W., Lee, K.S., and Park, Y. (2005). Application of Harmony Search to Vehicle Routing
American Journal of Applied Sciences 2(12) : 1552-1557
- Geem, Z.W., Lee, K.S., and Tseng, C.L. (2005). Harmony Search for Structural Design.
Washington, DC, USA., June 25-29.

- Geem, Z.W. (2005) State-of-the-Art in the Structure of Harmony Search Algorithm. **Environmental Planning and Management Program**, Johns Hopkins University Baltimore Maryland USA.
- Geem, Z.W., Tseng, C.L., and Park, Y. (2005). Harmony Search for Generalized Orienteering Problem : Best Touring in China. **Lecture Notes in Computer Science** 3612 : 741-750.
- Geem, Z.W. (2007). Harmony Search Algorithm for Solving Sudoku. **Lecture Notes in Artificial Intelligence** 4692 : 371-378.
- Geem, Z.W. (2008). Harmony Search Applications in Industry. **In Soft Computing Applications in Industry**, Bhanu Prasad, Ed. Germany : Springer-Verlag pp. 117-134.
- Geem, Z.W. (2009). Harmony search algorithms for structural design optimization. **Springer Berlin**.
- Kazemi, A., Parizad, A., Baghaee , H.R. (2009). On The Use Of Harmony Search Algorithm In Optimal Placement Of Facts Devices To Improve Power System Security. **IEEE Trans Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST)**
- Lee, K.S., and Geem, Z.W. (2004). A new structural optimization method based on the harmonysearch algorithm. **Computers and Structures** 82(9-10):781-798.
- Mahdavi, M., Fesanghary, M., and Damangir, E. (2007). An improved harmony search algorithm for Solving optimization problems. **Applied Mathematics and Computation** 188:1567–1579.
- Muriithi, M.G. (1996). Optimal Power Flow For High Voltage Network Of The Kenya Power System. **IEEE Department of Electrical and Electronics Engineering, Kenya College Of Communications Technology**
- Ngonkham, S., and Buasri, P. (2010). Harmony search algorithm to improve cost reduction in power generation system integrating large scale wind energy conversion system. **Department of Electrical Engineering, Khonkaen University**.
- Ravikumar Pandi, V., Panigrahi, B.K., Mallick, M.K., Abraham, A., and Das, S. (2009). Improved Harmony Search for Economic Power Dispatch. **IEEE**.



ภาคผนวก ก

MATLAB และ Histogram ของการแจกแจงปกติ

ก.1 เกริ่นนำ MATLAB

MATLAB เป็นโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยส่วนมากจะใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ซึ่งมีพื้นฐานการคำนวณอยู่ในรูปของเวกเตอร์หรือเมตริกซ์ โปรแกรม MATLAB มีจุดเด่นคือ มีชุดคำสั่งมากมายสำหรับการประมวลผลข้อมูลที่บรรจุอยู่ในเมตริกซ์ และสามารถใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งการใช้งาน MATLAB จะแบ่งเป็นสองส่วนคือ simulink และ การเขียนโปรแกรมใน M-File แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้การเขียนโปรแกรมใน M-File ในการแก้ปัญหาคircuit ใหลดกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดดังนี้

ก.2 โปรแกรมที่ใช้ในการแก้ปัญหาค่าการไหลกำลังไฟฟ้า

ฟังก์ชัน systemdata เป็นข้อมูลที่ใช้ในระบบทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย busdata เป็นข้อมูลแรงดันแต่ละบัส มุมของแต่ละบัส กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โหลดที่เป็นกำลังไฟฟ้าจริง และโหลดที่เป็นกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ส่วน ldata เป็นข้อมูลแสดงอิมพีแดนซ์ของสายส่งแต่ละเส้น แอดมิตแตนซ์ครึ่งสาย และค่าเทปหม้อแปลง gencost เป็นข้อมูลแสดงสัมประสิทธิ์ค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องของการจ่ายโหลดอย่างประหยัด โดยมีโปรแกรมดังนี้

- ข้อมูลของระบบทดสอบ (system data)

```

ldata=[
    1      1      6      0.123    0.518    0      1.000
    2      1      4      0.080    0.370    0      1.000
    3      4      6      0.097    0.407    0      1.000
    4      6      5      0.000    0.300    0      1.025
    5      5      2      0.282    0.640    0      1.000
    6      2      3      0.723    1.050    0      1.000
    7      4      3      0.000    0.133    0      1.100

];

MVAbase= 100;

kVbase = 230;

%Bus NO.      PGmin      PGmax      QGmin      QGmax
               (MW)        (MW)        (MVAR)    (MVAR)
               ai          bi          ci

gencost=[
    1      50      200      -20      150      0      100      100
    2      20      80       -20      60       0      500      100

];

return

```

เมื่อได้ข้อมูลระบบทดสอบแล้ว ทำการหาค่า Ybus จากฟังก์ชัน build_ybus ของระบบทดสอบจากข้อมูล ldata และ แอดมิตแตนซ์คริ่งสาย (line_charge) โดยมีโปรแกรมดังนี้

- การสร้าง ybus ของระบบทดสอบ

```

=====
                        build_ybus.m
=====

function ybus = build_ybus()

global busdata ldata MVABase Qlimit n_PV Vsch kVbase gencost ybus rho

ybus = [];
u = max(ldata(:,2));
v = max(ldata(:,3));
n_bus = max(u,v);
n_line = size(ldata,1);
ybus(n_bus,n_bus) = 0;
for k=1:n_line
    p = ldata(k,2);
    q = ldata(k,3);
    Ypq = 1/(ldata(k,4) + ldata(k,5)*i);
    line_charge = ldata(k,6)*i;
    t = ldata(k,7);

    ybus(p,q) = ybus(p,q)-t*Ypq;
    ybus(q,p) = ybus(p,q);
    ybus(p,p) = ybus(p,p)+t*Ypq+t*(t-1)*Ypq+line_charge;
    ybus(q,q) = ybus(q,q)+t*Ypq+(1-t)*Ypq+line_charge;
end

return

```

สร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากฟังก์ชัน fpen โดยใช้ข้อมูลจาก systemdata ซึ่งประกอบด้วยการเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากข้อมูล gencost การสร้างเงื่อนไขบังคับที่เป็นสมการและอสมการ แล้วใช้วิธีปรับโทชแปลงปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขไปเป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไข ดังนี้

- การสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

```

=====
                                fpen.m
=====

function f=fpen(x)

global busdata ldata MVABase kVbase gencost ybus rho

%      PG1  PG2   Qc4  Qc6   V1  V2      δ1  δ2      T34  T56
Amax=[gencost(:,3); gencost(:,5); 1.1*ones(6,1); 30*ones(6,1); 1.1*ones(2,1)];
Amin=[gencost(:,2); gencost(:,4); 0.9*ones(6,1); -30*ones(6,1); 0.9*ones(2,1)];

busdata(1,4)=x(1);%PG1
busdata(2,4)=x(2);%PG2
busdata(4,5)=x(5);%Qc4
busdata(6,5)=x(6);%Qc6

aa=0;
%----mag V
for rr=1:6
aa(rr,1)=x(4+rr);
end
busdata(:,2)=aa(:,1);
qq=0;
%----angle V
for ss=1:6
qq(ss,1)=x(10+ss);
end
end

```

```

busdata(:,3)=qq(:,1);
ldata(7,7)=x(17); %T34
ldata(4,7)=x(18); %T56

ybus = build_ybus;

mag_V=[busdata(:,2)];
ang_V=[busdata(:,3)];

%*****make Function Cost*****

PG=[busdata(1,4),busdata(2,4)] / MVAbase;
FT=0;
NG=length(gencost(:,1));
for k=1:NG
    FT=FT+gencost(k,8)+(gencost(k,7)*PG(k))+(gencost(k,6)*((PG(k))^2));
end
%*****end make Function Cost*****

%*****Equality Constraints*****

sum_Ps=0;
sum_Qs=0;
sum_P=0;
sum_Q=0;
NB=length(busdata(:,1));
for k=1:NB
    %Psch=Pg-Pd
    Psch=busdata(k,4)/MVAbase-busdata(k,6)/MVAbase;
    Qsch=busdata(k,5)/MVAbase-busdata(k,7)/MVAbase;

```

```

dP(k)=Psch;
dQ(k)=Qsch;
for j=1:NB
    dP(k) = dP(k)-(mag_V(k)*mag_V(j)*abs(ybus(k,j))*cos(angle(ybus(k,j))+ang_V(j)*pi/180
        - ang_V(k)*pi/180));
    dQ(k) = dQ(k)+(mag_V(k)*mag_V(j)*abs(ybus(k,j))*sin(angle(ybus(k,j))+ang_V(j)*pi/180
        -ang_V(k)*pi/180));
end
    sum_Ps=sum_Ps+(dP(k));
    sum_Qs=sum_Qs+(dQ(k));
end
%*****end equality constraints*****
%*****inequality constraints*****
Var=[x];
PT=0;
for k=1:length(Amax)
    up(k)=0;
    down(k)=0;
    if Var(k)>Amax(k)
        up(k)=rho*(Var(k)-Amax(k))^2;
    elseif Amin(k)>Var(k)
        down(k)=rho*(Amin(k)-Var(k))^2;
    end
    PT=PT+up(k)+down(k);
end
% *****end inequality constraints*****

```

ทำการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสานโดยใช้ฟังก์ชัน harmony ซึ่งเป็นการหาค่าเหมาะที่สุดโดยการเลียนแบบพฤติกรรมของนักดนตรีในการเล่นดนตรีเพื่อให้เกิดความไพเราะมากที่สุด โดยใช้โปรแกรมดังนี้

- การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสาน

```

=====
harmony.m
=====

function [xbest,fbest] = harmony(f,xL,xU,Hparams)

% HARMONY basic Harmony Search minimization for continuous variables

% Unpack the parameter vector
HMS  = Hparams.HMS;
MaxImp = Hparams.MaxImp;
HMCR  = Hparams.HMCR;
PAR   = Hparams.PAR;
b     = Hparams.b;

N  = length(xL); % Number of decision variables
HM = zeros(HMS,N);
F  = zeros(HMS,1);
xnew = zeros(1,N);

% Randomly initialize HM, taking care to keep each variable within bounds.

% Evaluate the corresponding objective function values.
for j = 1:HMS
    HM(j,:) = xL + (xU-xL).*rand(1,N);
    F(j) = f(HM(j,:));
end

% Loop through MaxImp improvisations

```



```

for j = 1:MaxImp

    % Improvise a new harmony: loop though each variable

    for i = 1:N

        % Randomly perform one of the three HS operations

        if rand < HMCR

            % Memory considering: randomly select a note stored in HM

            xnew(i) = HM(ceil(rand*HMS),i);

            if rand < PAR

                % Pitch adjusting: randomly adjust the pitch slightly

                % within +/- b(i), and ensure bounds are satisfied

                xnew(i) = xnew(i) + (2*rand-1)*b(i);

            else

                xnew(i) = xnew(i);

            end

            xnew(i) = min(max(xnew(i),xL(i)),xU(i));

        else

            % Random playing: randomly select any pitch within bounds

            xnew(i) = xL(i) + rand*(xU(i)-xL(i));

        end

    end % Finished improvising a new harmony

    % HM update: check whether the new harmony is better than the worst

    % harmony currently in HM

    fnew = f(xnew);

    [fworst,idxworst] = max(F);

    if fnew < fworst

        HM(idxworst,:) = xnew;

        F(idxworst) = fnew;

    end

end

```

```
end % Maximum number of improvisations reached
```

```
% Return the best harmony found
```

```
[fbest,idxbest] = min(F);
```

```
xbest = HM(idxbest,:);
```

```
return
```

ทำการประมวลผลการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการค้นหาความบรรสานโดยใช้ไฟล์ run_hs ซึ่งจะใช้ฟังก์ชัน fpen และ harmony มาประมวลผล แล้วทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรมจากนั้นทำการประมวลผลทั้งหมด 30 ครั้ง ดังนี้



- โปรแกรมการประมวลผล

```

=====
run_hs.m
=====

% HS: Harmony Search minimization

clc;clear all;

global busdata ldata MVABase Qlimit n_PV Vsch kVbase gencost ybus rho

run('systemdata')

rho=10^(6);

Cost_int=inf;

max_iter=30;

disp(['rho=' num2str(rho)])

rand('twister',5489);% Comment out to start rand from current position

f = @fpen;

xL = [gencost(:,2); gencost(:,4); 0.9*ones(6,1); -30*ones(6,1); 0.9*ones(2,1)];
xU = [gencost(:,3); gencost(:,5); 1.1*ones(6,1); 30*ones(6,1); 1.1*ones(2,1)];

% Set HS algorithm parameters

HSparams.HMS =10;

HSparams.MaxImp =50000;

HSparams.HMCR =0.8;

HSparams.PAR =0.4;

HSparams.b =(xU-xL)/1000;

for k=1:max_iter

    iiter(k)=k;

    rand('state',sum(100*clock))

    tic;

```

```

[xbest,fbest] = harmony(f,xL,xU,HSparams);    % Perform minimization

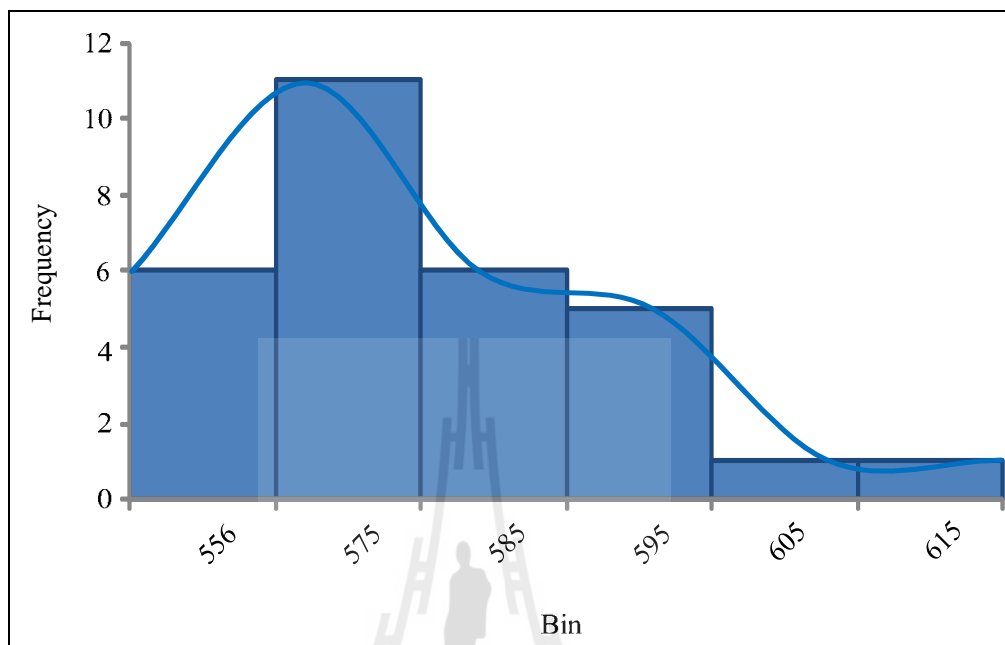
T(k)=toc;

PG1(k)=xbest(1);
PG2(k)=xbest(2);
mag_V1(k)=xbest(3);
mag_V2(k)=xbest(4);
ang_V1(k)=xbest(5);
ang_V2(k)=xbest(6);
Qc4(k)=xbest(7);
Qc6(k)=xbest(8);
T34(k)=xbest(9);
T56(k)=xbest(10);
Cost(k)=fbest;
if Cost(k)<=Cost_int
    min_Cost=Cost(k);
    Ans_xopt=xbest;
    Cost_int=Cost(k);
    iter=k;
end
end
end

```

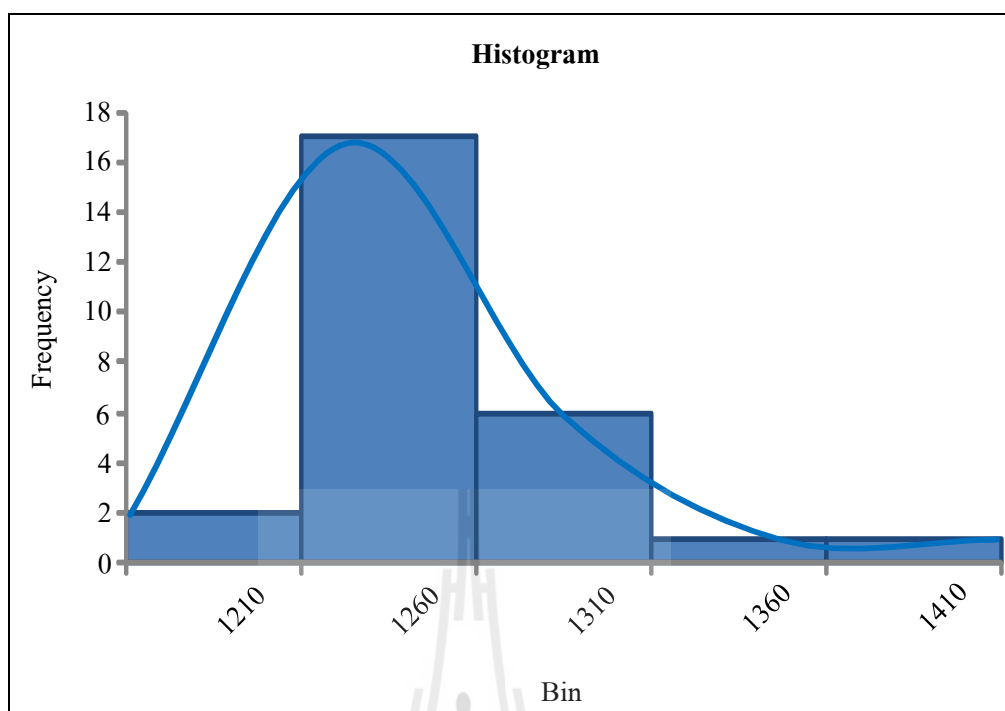


ก.3 กราฟ Histogram การแจกแจงปกติของระบบทดสอบ



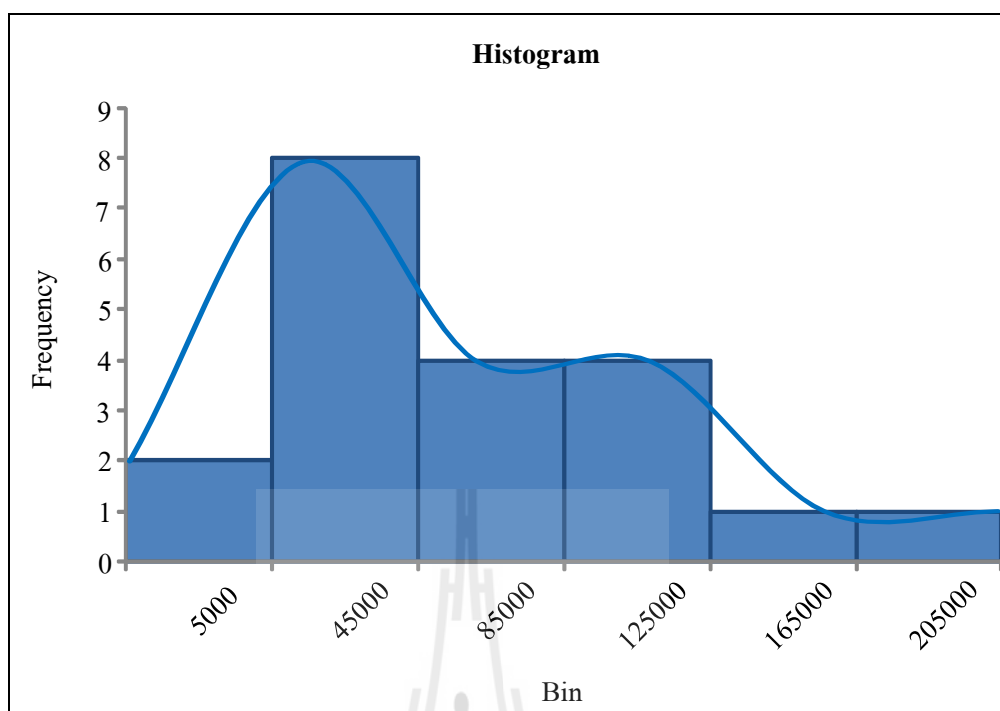
รูปที่ ก.1 ฮิสโตแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบทดสอบ 6 บัส แบบไม่ราบเรียบ

จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าการแจกแจงของข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ขวานั้นแสดงว่า มัชยฐานจะเป็นค่ากลางที่ดีที่สุด ซึ่งรูปกราฟมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ปลายโค้งทั้งสองข้างไม่จรดกับฐาน และมีจุดโค้งสูงสุดเพียงจุดเดียวคือ ค่าต้นทุนการผลิตมีความถี่มากที่สุดอยู่ที่ 575



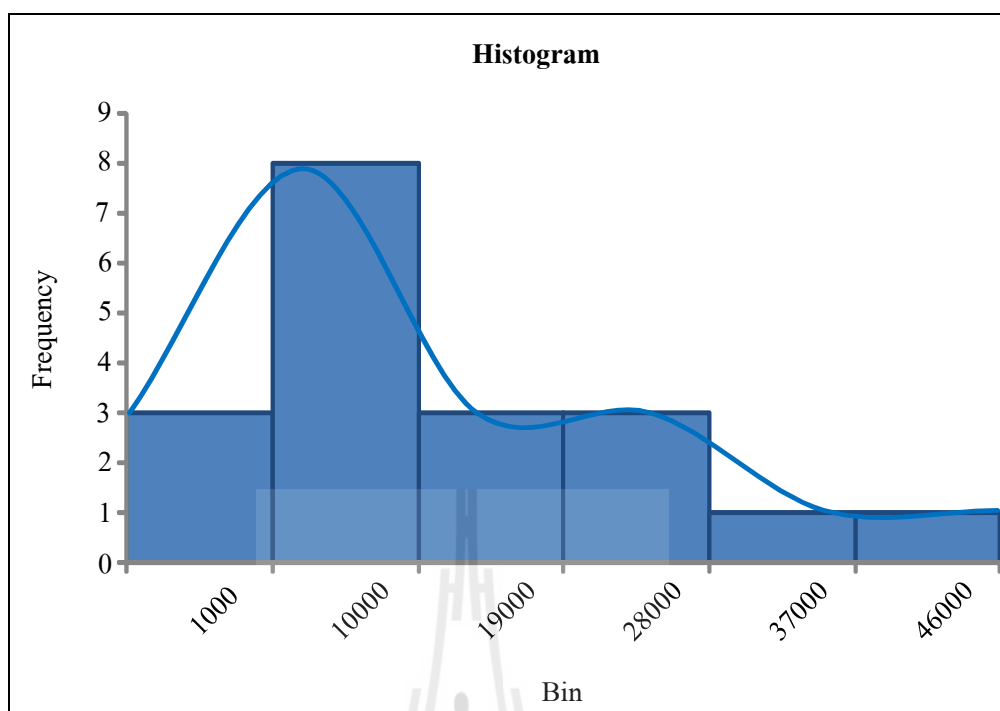
รูปที่ ก.2 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัคของระบบทดสอบ 14 บัส แบบไม่ราบเรียบ

จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าการแจกแจงของข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ขวานั้นแสดงว่า มัธยฐานจะเป็นค่ากลางที่ดีที่สุด ซึ่งรูปกราฟมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ปลายโค้งทั้งสองข้างไม่จรดกับฐาน และมีจุดโค้งสูงสุดเพียงจุดเดียวคือ ค่าต้นทุนการผลิตมีความถี่มากที่สุดอยู่ที่ 1260



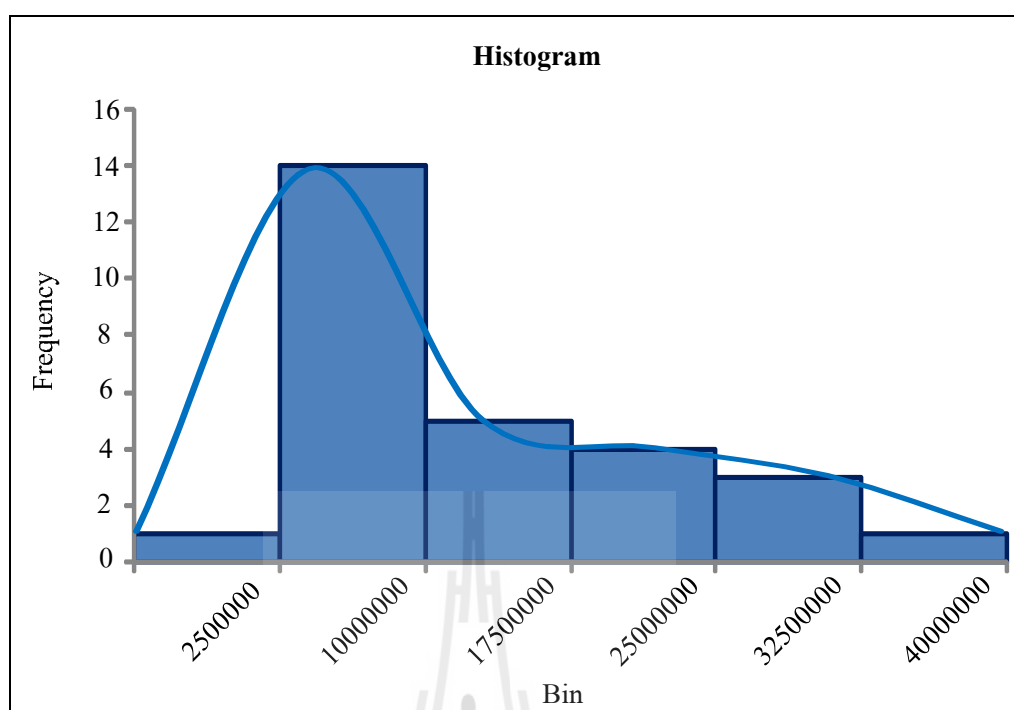
รูปที่ ก.3 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบทดสอบ 30 บัส แบบราบเรียบ

จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าการแจกแจงของข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ขวานั้นแสดงว่า มัธยฐานจะเป็นค่ากลางที่ดีที่สุด ซึ่งรูปกราฟมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ปลายโค้งทั้งสองข้างไม่จรดกับฐาน และมีจุดโค้งสูงสุดเพียงจุดเดียวคือ ค่าต้นทุนการผลิตมีความถี่มากที่สุดอยู่ที่ 45000



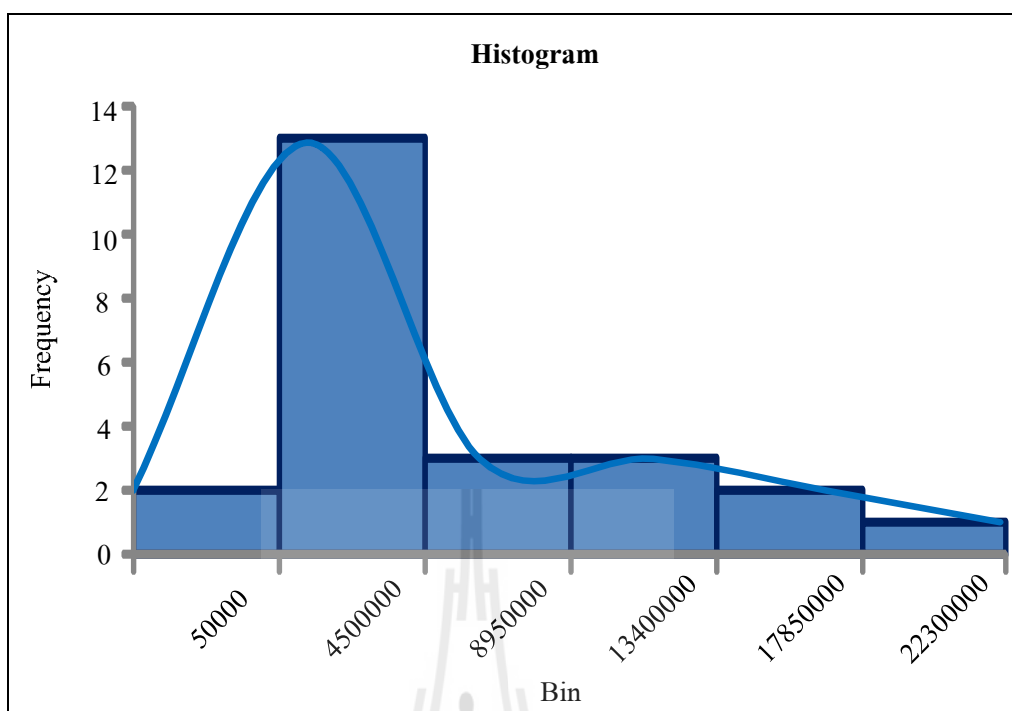
รูปที่ ก.4 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบทดสอบ 30 บัส แบบไม่ราบเรียบ

จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าการแจกแจงของข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ขวานั้นแสดงว่า มัธยฐานจะเป็นค่ากลางที่ดีที่สุด ซึ่งรูปกราฟมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ปลายโค้งทั้งสองข้างไม่จรดกับฐาน และมีจุดโค้งสูงสุดเพียงจุดเดียวคือ ค่าต้นทุนการผลิตมีความถี่มากที่สุดอยู่ที่ 10000



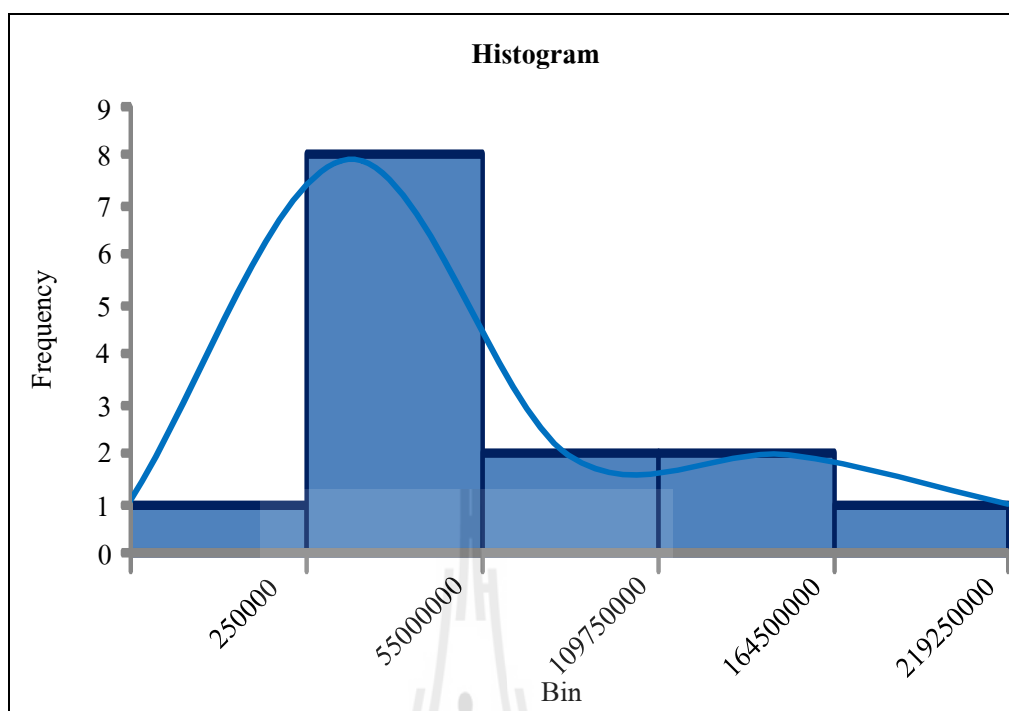
รูปที่ ก.5 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบทดสอบ 57 บัส แบบราบเรียบ

จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าการแจกแจงของข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ขวานั้นแสดงว่า มัธยฐานจะเป็นค่ากลางที่ดีที่สุด ซึ่งรูปกราฟมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ปลายโค้งทั้งสองข้างไม่จรดกับฐาน และมีจุดโค้งสูงสุดเพียงจุดเดียวคือ ค่าต้นทุนการผลิตมีความถี่มากที่สุดอยู่ที่ 10000000



รูปที่ ก.6 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบทดสอบ 118 บัส แบบราบเรียบ

จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าการแจกแจงของข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ขวานั้นแสดงว่า มัธยฐานจะเป็นค่ากลางที่ดีที่สุด ซึ่งรูปกราฟมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ปลายโค้งทั้งสองข้างไม่จรดกับฐาน และมีจุดโค้งสูงสุดเพียงจุดเดียวคือ ค่าต้นทุนการผลิตมีความถี่มากที่สุดอยู่ที่ 4500000



รูปที่ ก.7 ฮิสโทแกรมการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบทดสอบ 169 บัส แบบราบเรียบ

จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าการแจกแจงของข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ขวานั้นแสดงว่า มัธยฐานจะเป็นค่ากลางที่ดีที่สุด ซึ่งรูปกราฟมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ปลายโค้งทั้งสองข้างไม่จรดกับฐาน และมีจุดโค้งสูงสุดเพียงจุดเดียวคือ ค่าต้นทุนการผลิตมีความถี่มากที่สุดอยู่ที่ 55000000



ภาคผนวก ข

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบที่นำมาทำการจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยระบบทดสอบ 7 ระบบ คือระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ (9 บัส นครราชสีมา 2) และระบบทดสอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งประกอบด้วยภาคกลางตอนบนและภาคตะวันตกรวม 169 บัส รายละเอียดของระบบทดสอบแสดงได้ดังนี้

ข.1 ระบบทดสอบ 6 บัส

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 6 บัส

บัส	แรงดันบัส (p.u.)	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอกทีฟ (MVar)
1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	1.0000	0.0000	50.0000	0.0000	0.0000
3	1.0000	0.0000	0.0000	55.0000	13.0000
4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	1.0000	0.0000	0.0000	30.0000	18.0000
6	1.0000	0.0000	0.0000	50.0000	5.0000

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 6 บัส

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u.)
1	1	6	$0.1230+j0.5180$	1.0000
2	1	4	$0.0800+j0.3700$	1.0000
3	4	6	$0.0970+j0.4070$	1.0000
4	6	5	$0.0000+j0.3000$	1.0250
5	5	2	$0.2820+j0.6400$	1.0000
6	2	3	$0.7230+j1.0500$	1.0000
7	4	3	$0.0000+j0.1330$	1.1000

ตารางที่ ข.3 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	$P_{\min}$ (MW)	$P_{\max}$ (MW)
1	1	0.0000	100.0000	100.0000	50.0000	200.0000
2	2	0.0000	500.0000	100.0000	20.0000	80.0000

ตารางที่ ข.4 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	$P_{\min}$ (MW)	$P_{\max}$ (MW)
1	1	150.0000	2.0000	0.0016	50.0000	0.0630	50.0000	200.0000
2	2	25.0000	2.5000	0.0100	40.0000	0.0980	20.0000	80.0000

ทำการปรับตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการควบคุมตัวแปรเพื่อให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด แล้วใช้วิธีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยคำตอบที่ได้ต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ดังตารางที่ ก.5

ตารางที่ ข.5 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 6 บัส

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
P_1 (MW)	50.0000	200.0000
P_2 (MW)	20.0000	80.0000
Q_1 (MVar)	0.0000	50.0000
Q_2 (MVar)	0.0000	50.0000
V_1 - V_6 (p.u.)	0.9000	1.1000
δ_1 - δ_6 (degree)	-30.0000	30.0000
T_{3-4} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{5-6} (p.u.)	0.9000	1.1000
Q_{C4} (MVar)	0.0000	50.0000
Q_{C6} (MVar)	0.0000	50.0000

ข.2 ระบบทดสอบ 14 บัส

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 14 บัส

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)
1	1.0000	232.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	1.0000	40.0000	-42.4000	21.7000	12.7000
3	1.0000	0.0000	0.0000	94.2000	19.0000
4	1.0000	0.0000	0.0000	47.8000	0.0000
5	1.0000	0.0000	0.0000	7.6000	1.6000
6	1.0000	0.0000	0.0000	11.2000	7.5000
7	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	1.0000	0.0000	0.0000	29.5000	16.6000
10	1.0000	0.0000	0.0000	9.0000	5.8000
11	1.0000	0.0000	0.0000	3.5000	1.8000
12	1.0000	0.0000	0.0000	6.1000	1.6000
13	1.0000	0.0000	0.0000	13.5000	5.8000
14	1.0000	0.0000	0.0000	14.9000	5.0000

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 14 บัส

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u.)
1	1	2	0.0194+j0.0592	1.0000
2	1	5	0.0540+j0.2230	1.0000
3	2	3	0.0470+j0.1980	1.0000
4	2	4	0.0581+j0.1763	1.0000
5	2	5	0.0570+j0.1739	1.0000
6	3	4	0.0670+j0.1710	1.0000
7	4	5	0.0134+j0.0421	1.0000

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 14 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u.)
8	4	7	0.0000+j0.2091	0.9500
9	4	9	0.0000+j0.5562	0.9500
10	5	6	0.0000+j0.2520	0.9500
11	6	11	0.0950+j0.1989	1.0000
12	6	12	0.1229+j0.2558	1.0000
13	6	13	0.0662+j0.1303	1.0000
14	7	8	0.0000+j0.1762	0.9500
15	7	9	0.0000+j0.1100	0.9500
16	9	10	0.0318+j0.0845	1.0000
17	9	14	0.1271+j0.2704	1.0000
18	10	11	0.0820+j0.1921	1.0000
19	12	13	0.2209+j0.1999	1.0000
20	13	14	0.1709+j0.3480	1.0000

ตารางที่ ข.8 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)
1	1	150.0000	2.4500	0.0150	50.0000	200.0000
2	2	44.4000	3.5100	0.0225	20.0000	80.0000
3	3	55.0000	2.7500	0.0175	15.0000	50.0000
4	6	40.6000	3.8900	0.0130	10.0000	30.0000
5	8	75.0000	2.8500	0.0275	10.0000	35.0000

ตารางที่ ข.9 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 14 บัสโดยใช้ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุด
แบบไม่ราบเรียบ

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	$P_{\min}$ (MW)	$P_{\max}$ (MW)
1	1	150.0000	2.0000	0.0016	50.0000	0.0630	50.0000	200.0000
2	2	25.0000	2.5000	0.0100	40.0000	0.0980	20.0000	80.0000
3	3	55.0000	2.7500	0.0175	0.0000	0.0000	15.0000	50.0000
4	6	40.6000	3.8900	0.0130	0.0000	0.0000	10.0000	30.0000
5	8	75.0000	2.8500	0.0275	0.0000	0.0000	10.0000	35.0000

ตารางที่ ข.10 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 14 บัส

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
P_1 (MW)	50.0000	200.0000
P_2 (MW)	20.0000	80.0000
P_3 (MW)	15.0000	50.0000
P_6 (MW)	10.0000	30.0000
P_8 (MW)	10.0000	35.0000
Q_1 (MVar)	-20.0000	150.0000
Q_2 (MVar)	-20.0000	60.0000
Q_3 (MVar)	-15.0000	44.0000
Q_6 (MVar)	-15.0000	62.5000
Q_8 (MVar)	-10.0000	40.0000
V_1 - V_{14} (p.u.)	0.9000	1.1000
δ_1 - δ_{14} (degree)	-30.0000	30.0000
T_{4-7} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{4-9} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{5-6} (p.u.)	0.9000	1.1000

ตารางที่ ข.10 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 14 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
T_{7-8} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{7-9} (p.u.)	0.9000	1.1000

ข.3 ระบบทดสอบ 30 บัส

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 30 บัส

บัส	แรงดันบัส (p.u.)	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอกทีฟ (MVar)
1	1.0000	23.5400	0.0000	0.0000	0.0000
2	1.0000	60.9700	0.0000	21.7000	12.7000
3	1.0000	0.0000	0.0000	2.4000	1.2000
4	1.0000	0.0000	0.0000	7.6000	1.6000
5	1.0000	37.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	1.0000	0.0000	0.0000	22.8000	10.9000
8	1.0000	21.5900	0.0000	30.0000	30.0000
9	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	1.0000	0.0000	0.0000	5.8000	2.0000
11	1.0000	19.2000	0.0000	0.0000	0.0000
12	1.0000	0.0000	0.0000	11.2000	7.5000
13	1.0000	26.9100	0.0000	0.0000	0.0000
14	1.0000	0.0000	0.0000	6.2000	1.6000
15	1.0000	0.0000	0.0000	8.2000	2.5000
16	1.0000	0.0000	0.0000	3.5000	1.8000
17	1.0000	0.0000	0.0000	9.0000	5.8000
18	1.0000	0.0000	0.0000	3.2000	0.9000

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 30 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
19	1.0000	0.0000	0.0000	9.5000	3.4000
20	1.0000	0.0000	0.0000	2.2000	0.7000
21	1.0000	0.0000	0.0000	17.5000	11.2000
22	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	1.0000	0.0000	0.0000	3.2000	1.6000
24	1.0000	0.0000	0.0000	8.7000	6.7000
25	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	1.0000	0.0000	0.0000	3.5000	2.3000
27	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29	1.0000	0.0000	0.0000	2.4000	0.9000
30	1.0000	0.0000	0.0000	10.6000	1.9000

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 30 บัส

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u.)
1	1	2	0.0200+j0.0600	1.0000
2	1	3	0.0500+j0.1900	1.0000
3	2	4	0.0600+j0.1700	1.0000
4	3	4	0.0100+j0.0400	1.0000
5	2	5	0.0500+j0.200	1.0000
6	2	6	0.0600+j0.1800	1.0000
7	4	6	0.0100+j0.0400	1.0000
8	4	12	0.0000+j0.2600	1.0000
9	5	7	0.0500+j0.1200	1.0000
10	6	7	0.0300+j0.0800	1.0000

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 30 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u.)
11	6	8	0.0100+j0.0400	1.0000
12	6	9	0.0000+j0.2100	1.0000
13	6	28	0.0200+j0.0600	1.0000
14	6	10	0.0000+j0.5600	1.0000
15	8	28	0.0600+j0.2000	1.0000
16	9	11	0.0000+j0.2100	1.0000
17	9	10	0.0000+j0.1100	1.0000
18	10	20	0.0900+j0.2100	1.0000
19	10	17	0.0300+j0.0800	1.0000
20	10	21	0.0300+j0.0700	1.0000
21	10	22	0.0700+j0.1500	1.0000
22	12	13	0.0000+j0.1400	1.0000
23	12	14	0.1200+j0.2600	1.0000
24	12	15	0.0700+j0.1300	1.0000
25	12	16	0.0900+j0.200	1.0000
26	14	15	0.2200+j0.2000	1.0000
27	15	18	0.1100+j0.2200	1.0000
28	15	23	0.1000+j0.2000	1.0000
29	16	17	0.0800+j0.1900	1.0000
30	18	19	0.0600+j0.1300	1.0000
31	19	20	0.0300+j0.0700	1.0000
32	21	22	0.0100+j0.0200	1.0000
33	22	24	0.1200+j0.1800	1.0000
34	23	24	0.1300+j0.2700	1.0000

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 30 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u.)
35	24	25	$0.1900+j0.3300$	1.0000
36	25	26	$0.2500+j0.3800$	1.0000
37	25	27	$0.1100+j0.2100$	1.0000
38	28	27	$0.0000+j0.4000$	1.0000
39	27	29	$0.2200+j0.4200$	1.0000
40	27	30	$0.3200+j0.600$	1.0000
41	29	30	$0.2400+j0.4500$	1.0000

ตารางที่ ข.13 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)
1	1	150.0000	2.4500	0.0150	50.0000	200.0000
2	2	44.4000	3.5100	0.0225	20.0000	80.0000
3	5	55.0000	2.7500	0.0175	15.0000	50.0000
4	8	75.0000	2.8500	0.0130	10.0000	35.0000
5	11	40.6000	3.8900	0.02575	10.0000	30.0000
6	13	90.5000	3.3000	0.0165	20.0000	40.0000

ตารางที่ ข.14 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดวาล์วหลายจุด
แบบไม่ราบเรียบ

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	$P_{\min}$ (MW)	$P_{\max}$ (MW)
1	1	150.0000	2.0000	0.0016	50.0000	0.0630	50.0000	200.0000
2	2	25.0000	2.5000	0.0100	40.0000	0.0980	20.0000	80.0000
3	5	0.0000	1.0000	0.0625	0.0000	0.0000	15.0000	50.0000
4	8	0.0000	3.2500	0.00834	0.0000	0.0000	10.0000	35.0000
5	11	0.0000	3.0000	0.02575	0.0000	0.0000	10.0000	30.0000
6	13	0.0000	3.0000	0.0250	0.0000	0.0000	12.0000	40.0000

ตารางที่ ข.15 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 30 บัส

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
P_1 (MW)	50.0000	200.0000
P_2 (MW)	20.0000	80.0000
P_5 (MW)	15.0000	50.0000
P_8 (MW)	10.0000	35.0000
P_{11} (MW)	10.0000	30.0000
P_{13} (MW)	12.0000	40.0000
Q_1 (MVar)	-20.0000	150.0000
Q_2 (MVar)	-20.0000	60.0000
Q_5 (MVar)	-15.0000	44.7000
Q_8 (MVar)	-15.0000	62.5000
Q_{11} (MVar)	-10.0000	40.0000
Q_{13} (MVar)	-15.0000	48.7000
$V_1 - V_{30}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$\delta_1 - \delta_{30}$ (degree)	-30.0000	30.0000

ตารางที่ ข.15 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 30 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
T_{4-12} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{6-9} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{6-10} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{9-11} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{9-10} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{12-13} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{27-28} (p.u.)	0.9000	1.1000

ข.4 ระบบทดสอบ 57 บัส

ตารางที่ ข.16 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 57 บัส

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
1	1.0400	478.9000	-16.1000	55.0000	17.0000
2	1.0100	0.0000	-0.8000	3.0000	88.0000
3	0.9850	40.0000	-1.0000	41.0000	21.0000
4	0.9810	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.9760	0.0000	0.0000	13.0000	4.0000
6	0.9800	0.0000	0.8000	75.0000	2.0000
7	0.9840	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	1.0050	450.0000	62.1000	150.0000	22.0000

ตารางที่ ข.16 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 57 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
9	0.9800	0.0000	2.2000	121.0000	26.0000
10	0.9860	0.0000	0.0000	5.0000	2.0000
11	0.9740	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	1.0150	310.0000	128.5000	377.0000	24.0000
13	0.9790	0.0000	0.0000	18.0000	2.3.0000
14	0.9700	0.0000	0.0000	10.5000	5.3.0000
15	0.9880	0.0000	0.0000	22.0000	5.0000
16	1.0130	0.0000	0.0000	43.0000	3.0000
17	1.0170	0.0000	0.0000	42.0000	8.0000
18	1.0010	0.0000	0.0000	27.2000	9.8.0000
19	0.9700	0.0000	0.0000	3.3000	0.6.0000
20	0.9640	0.0000	0.0000	2.3000	1.0000
21	1.0080	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	1.0100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	1.0080	0.0000	0.0000	6.3000	2.1.0000
24	0.9990	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	0.9820	0.0000	0.0000	6.3000	3.2000
26	0.9590	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27	0.9820	0.0000	0.0000	9.3000	0.5000
28	0.9970	0.0000	0.0000	4.6000	2.3000
29	1.0100	0.0000	0.0000	17.0000	2.6000
30	0.9620	0.0000	0.0000	3.6000	1.8000
31	0.9360	0.0000	0.0000	5.8000	2.9000

ตารางที่ ข.16 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 57 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
32	0.9490	0.0000	0.0000	1.6000	0.8000
33	0.9470	0.0000	0.0000	3.8000	1.9000
34	0.9590	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
35	0.9660	0.0000	0.0000	6.0000	3.0000
36	0.9760	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
37	0.9850	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
38	1.0130	0.0000	0.0000	14.0000	7.0000
39	0.9830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	0.9730	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
41	0.9960	0.0000	0.0000	6.3000	3.0000
42	0.9660	0.0000	0.0000	7.1000	4.4000
43	1.0100	0.0000	0.0000	2.0000	1.0000
44	1.0170	0.0000	0.0000	12.0000	1.8000
45	1.0360	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
46	1.0500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
47	1.0330	0.0000	0.0000	29.7000	11.6000
48	1.0270	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
49	1.0360	0.0000	0.0000	18.0000	8.5000
50	1.0230	0.0000	0.0000	21.0000	10.5000
51	1.0520	0.0000	0.0000	18.0000	5.3000
52	0.9800	0.0000	0.0000	4.9000	2.2000
53	0.9710	0.0000	0.0000	20.0000	10.0000
54	0.9960	0.0000	0.0000	4.1000	1.4000

ตารางที่ ข.16 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 57 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
55	1.0310	0.0000	0.0000	6.8000	3.4000
56	0.9680	0.0000	0.0000	7.6000	2.2000
57	0.9650	0.0000	0.0000	6.7000	2.0000

ตารางที่ ข.17 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 57 บัส

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	เทปหุ้มฉนวน (p.u.)
1	1	2	0.0083+j0.028	1.0000
2	2	3	0.0298+j0.085	1.0000
3	3	4	0.0112+j0.0366	1.0000
4	4	5	0.0625+j0.132	1.0000
5	4	6	0.0430+j0.1480	1.0000
6	6	7	0.0200+j0.1020	1.0000
7	6	8	0.0339+j0.1730	1.0000
8	8	9	0.0099+j0.0505	1.0000
9	9	10	0.0369+j0.1679	1.0000
10	9	11	0.0258+j0.0848	1.0000
11	9	12	0.0648+j0.2950	1.0000
12	9	13	0.0481+j0.1580	1.0000
13	13	14	0.0132+j0.0434	1.0000
14	13	15	0.0269+j0.0869	1.0000
15	1	15	0.0178+j0.0910	1.0000
16	1	16	0.0454+j0.2060	1.0000
17	1	17	0.0238+j0.1080	1.0000

ตารางที่ ข.17 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 57 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
18	3	15	0.0162+j0.0530	1.0000
19	4	18	0.0000+j0.5550	0.9700
20	4	18	0.0000+j0.4300	0.9780
21	5	6	0.0302+j0.0641	1.0000
22	7	8	0.0139+j0.0712	1.0000
23	10	12	0.0277+j0.1262	1.0000
24	11	13	0.0223+j0.0732	1.0000
25	12	13	0.0178+j0.0580	1.0000
26	12	16	0.0180+j0.0813	1.0000
27	12	17	0.0397+j0.1790	1.0000
28	14	15	0.0171+j0.0547	1.0000
29	18	19	0.4610+j0.6850	1.0000
30	19	20	0.2830+j0.4340	1.0000
31	21	20	0.0000+j0.7767	1.0430
32	21	22	0.0736+j0.1170	1.0000
33	22	23	0.0099+j0.0152	1.0000
34	23	24	0.1660+j0.2560	1.0000
35	24	25	0.0000+j1.1820	1.0000
36	24	25	0.0000+j1.2300	1.0000
37	24	26	0.0000+j0.0473	1.0430
38	26	27	0.1650+j0.2540	1.0000
39	27	28	0.0618+j0.0954	1.0000
40	28	29	0.0418+j0.0587	1.0000
41	7	29	0.0000+j0.0648	0.9670

ตารางที่ ข.17 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 57 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	เทปหุ้มฉนวน (p.u.)
42	25	30	0.1350+j0.2020	1.0000
43	30	31	0.3260+j0.4970	1.0000
44	31	32	0.5070+j0.7550	1.0000
45	32	33	0.0392+j0.0360	1.0000
46	34	32	0.0000+j0.9530	0.9750
47	34	35	0.0520+j0.0780	1.0000
48	35	36	0.0430+j0.0537	1.0000
49	36	37	0.029+j0.0366	1.0000
50	37	38	0.0651+j0.1009	1.0000
51	37	39	0.0239+j0.0379	1.0000
52	36	40	0.0300+j0.0466	1.0000
53	22	38	0.0192+j0.0295	1.0000
54	11	41	0.0000+j0.7490	0.9550
55	41	42	0.2070+j0.3520	1.0000
56	41	43	0.0000+j0.4120	1.0000
57	38	44	0.0289+j0.0585	1.0000
58	15	45	0.0000+j0.1042	0.9550
59	14	46	0.0000+j0.0735	0.9000
60	46	47	0.0230+j0.0680	1.0000
61	47	48	0.0182+j0.0233	1.0000
62	48	49	0.0834+j0.1290	1.0000
63	49	50	0.0801+j0.1280	1.0000
64	50	51	0.1386+j0.2200	1.0000
65	10	51	0.0000+j0.0712	0.9300

ตารางที่ ข.17 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 57 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปปหมีแปลง (p.u.)
66	13	49	0.0000+j0.1910	0.8950
67	29	52	0.1442+j0.1870	1.0000
68	52	53	0.0762+j0.0984	1.0000
69	53	54	0.1878+j0.2320	1.0000
70	54	55	0.1732+j0.2265	1.0000
71	11	43	0.0000+j0.1530	0.9580
72	44	45	0.0624+j0.1242	1.0000
73	40	56	0.0000+j1.1950	0.9580
74	56	41	0.5530+j0.5490	1.0000
75	56	42	0.2125+j0.3540	1.0000
76	39	57	0.0000+j1.3550	0.9800
77	57	56	0.1740+j0.2600	1.0000
78	38	49	0.1150+j0.1770	1.0000
79	38	48	0.0312+j0.0482	1.0000
80	9	55	0.0000+j0.1205	0.9400

ตารางที่ ข.18 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 57 บัส โดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)
1	1	105.0000	2.4500	0.0150	20.0000	300.0000
2	2	90.5000	3.2500	0.0225	10.0000	150.0000
3	3	44.4000	3.8900	0.0175	25.0000	100.0000
4	6	50.5000	2.7500	0.0155	15.0000	300.0000
5	8	95.0000	2.8500	0.0210	15.0000	200.0000
6	9	120.0000	3.4000	0.0185	20.0000	200.0000
7	12	40.6000	3.5100	0.0130	10.0000	250.0000

ตารางที่ ข.19 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 57 บัส

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
P_1 (MW)	20.0000	300.0000
P_2 (MW)	10.0000	150.0000
P_3 (MW)	25.0000	100.0000
P_6 (MW)	15.0000	300.0000
P_8 (MW)	15.0000	200.0000
P_9 (MW)	20.0000	200.0000
P_{12} (MW)	10.0000	250.0000
Q_1 (MVar)	-200.0000	300.0000
Q_2 (MVar)	-17.0000	50.0000
Q_3 (MVar)	-10.0000	60.0000
Q_6 (MVar)	-8.0000	25.0000
Q_8 (MVar)	140.0000	200.0000
Q_9 (MVar)	-3.0000	9.0000
Q_{12} (MVar)	-150.0000	155.0000
$V_1 - V_{57}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$\delta_1 - \delta_{57}$ (degree)	-30.0000	30.0000
T_{4-18} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{4-18} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{21-20} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{24-25} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{24-25} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{24-26} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{7-29} (p.u.)	0.9000	1.1000

ตารางที่ ข.19 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 57 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
T_{34-32} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{11-41} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{41-43} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{15-45} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{14-46} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{10-51} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{13-49} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{11-43} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{40-56} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{39-57} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{9-55} (p.u.)	0.9000	1.1000

ข.5 ระบบทดสอบ 118 บัส

ตารางที่ ข.20 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 บัส

บัส	แรงดันบัส (p.u.)	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอกทีฟ (MVar)
1	0.9550	0.0000	0.0000	51.0000	27.0000
2	0.9710	0.0000	0.0000	20.0000	9.0000
3	0.9680	0.0000	0.0000	39.0000	10.0000
4	0.9980	0.0000	0.0000	39.0000	12.0000
5	1.0020	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.9900	0.0000	0.0000	52.0000	22.0000
7	0.9890	0.0000	0.0000	19.0000	2.0000

ตารางที่ ข.20 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
8	1.0150	0.0000	0.0000	28.0000	0.0000
9	1.0430	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	1.0500	450.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	0.9850	0.0000	0.0000	70.0000	23.0000
12	0.9900	85.0000	0.0000	47.0000	10.0000
13	0.9680	0.0000	0.0000	34.0000	16.0000
14	0.9840	0.0000	0.0000	14.0000	1.0000
15	0.9700	0.0000	0.0000	90.0000	30.0000
16	0.9840	0.0000	0.0000	25.0000	10.0000
17	0.9950	0.0000	0.0000	11.0000	3.0000
18	0.9730	0.0000	0.0000	60.0000	34.0000
19	0.9630	0.0000	0.0000	45.0000	25.0000
20	0.9580	0.0000	0.0000	18.0000	3.0000
21	0.9590	0.0000	0.0000	14.0000	8.0000
22	0.9700	0.0000	0.0000	10.0000	5.0000
23	1.0000	0.0000	0.0000	7.0000	3.0000
24	0.9920	0.0000	0.0000	13.0000	0.0000
25	1.0500	220.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	1.0150	314.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27	0.9680	0.0000	0.0000	71.0000	13.0000
28	0.9620	0.0000	0.0000	17.0000	7.0000
29	0.9630	0.0000	0.0000	24.0000	4.0000
30	0.9680	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ข.20 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
31	0.9670	7.0000	0.0000	43.0000	27.0000
32	0.9640	0.0000	0.0000	59.0000	23.0000
33	0.9720	0.0000	0.0000	23.0000	9.0000
34	0.9860	0.0000	0.0000	59.0000	26.0000
35	0.9810	0.0000	0.0000	33.0000	9.0000
36	0.9800	0.0000	0.0000	31.0000	17.0000
37	0.9920	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
38	0.9620	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
39	0.9700	0.0000	0.0000	27.0000	11.0000
40	0.9700	0.0000	0.0000	66.0000	23.0000
41	0.9670	0.0000	0.0000	37.0000	10.0000
42	0.9850	0.0000	0.0000	96.0000	23.0000
43	0.9780	0.0000	0.0000	18.0000	7.0000
44	0.9850	0.0000	0.0000	16.0000	8.0000
45	0.9870	0.0000	0.0000	53.0000	22.0000
46	1.0050	19.0000	0.0000	28.0000	10.0000
47	1.0170	0.0000	0.0000	34.0000	0.0000
48	1.0210	0.0000	0.0000	20.0000	11.0000
49	1.0250	204.0000	0.0000	87.0000	30.0000
50	1.0010	0.0000	0.0000	17.0000	4.0000
51	0.9670	0.0000	0.0000	17.0000	8.0000
52	0.9570	0.0000	0.0000	18.0000	5.0000
53	0.9460	0.0000	0.0000	23.0000	11.0000

ตารางที่ ข.20 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
54	0.9550	48.0000	0.0000	113.0000	32.0000
55	0.9520	0.0000	0.0000	63.0000	22.0000
56	0.9540	0.0000	0.0000	84.0000	18.0000
57	0.9710	0.0000	0.0000	12.0000	3.0000
58	0.9590	0.0000	0.0000	12.0000	3.0000
59	0.9850	155.0000	0.0000	277.0000	113.0000
60	0.9930	0.0000	0.0000	78.0000	3.0000
61	0.9950	160.0000	0.0000	0.0000	0.0000
62	0.9980	0.0000	0.0000	77.0000	14.0000
63	0.9690	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
64	0.9840	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
65	1.0050	391.0000	0.0000	0.0000	0.0000
66	1.0500	392.0000	0.0000	39.0000	18.0000
67	1.0200	0.0000	0.0000	28.0000	7.0000
68	1.0030	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
69	1.0350	516.4000	0.0000	0.0000	0.0000
70	0.9840	0.0000	0.0000	66.0000	20.0000
71	0.9870	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
72	0.9800	0.0000	0.0000	12.0000	0.0000
73	0.9910	0.0000	0.0000	6.0000	0.0000
74	0.9580	0.0000	0.0000	68.0000	27.0000
75	0.9670	0.0000	0.0000	47.0000	11.0000
76	0.9430	0.0000	0.0000	68.0000	36.0000

ตารางที่ ข.20 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
77	1.0060	0.0000	0.0000	61.0000	28.0000
78	1.0030	0.0000	0.0000	71.0000	26.0000
79	1.0090	0.0000	0.0000	39.0000	32.0000
80	1.0400	477.0000	0.0000	130.0000	26.0000
81	0.9970	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
82	0.9890	0.0000	0.0000	54.0000	27.0000
83	0.9850	0.0000	0.0000	20.0000	10.0000
84	0.9800	0.0000	0.0000	11.0000	7.0000
85	0.9850	0.0000	0.0000	24.0000	15.0000
86	0.9870	0.0000	0.0000	21.0000	10.0000
87	1.0150	4.0000	0.0000	0.0000	0.0000
88	0.9870	0.0000	0.0000	48.0000	10.0000
89	1.0050	607.0000	0.0000	0.0000	0.0000
90	0.9850	0.0000	0.0000	163.0000	42.0000
91	0.9800	0.0000	0.0000	10.0000	0.0000
92	0.9930	0.0000	0.0000	65.0000	10.0000
93	0.9870	0.0000	0.0000	12.0000	7.0000
94	0.9910	0.0000	0.0000	30.0000	16.0000
95	0.9810	0.0000	0.0000	42.0000	31.0000
96	0.9930	0.0000	0.0000	38.0000	15.0000
97	1.0110	0.0000	0.0000	15.0000	9.0000
98	1.0240	0.0000	0.0000	34.0000	8.0000
99	1.0100	0.0000	0.0000	42.0000	0.0000

ตารางที่ ข.20 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
100	1.0170	252.0000	0.0000	37.0000	18.0000
101	0.9930	0.0000	0.0000	22.0000	15.0000
102	0.9910	0.0000	0.0000	5.0000	3.0000
103	1.0010	40.0000	0.0000	23.0000	16.0000
104	0.9710	0.0000	0.0000	38.0000	25.0000
105	0.9650	0.0000	0.0000	31.0000	26.0000
106	0.9620	0.0000	0.0000	43.0000	16.0000
107	0.9520	0.0000	0.0000	50.0000	12.0000
108	0.9670	0.0000	0.0000	2.0000	1.0000
109	0.9670	0.0000	0.0000	8.0000	3.0000
110	0.9730	0.0000	0.0000	39.0000	30.0000
111	0.9800	36.0000	0.0000	0.0000	0.0000
112	0.9750	0.0000	0.0000	68.0000	13.0000
113	0.9930	0.0000	0.0000	6.0000	0.0000
114	0.9600	0.0000	0.0000	8.0000	3.0000
115	0.9600	0.0000	0.0000	22.0000	7.0000
116	1.0050	0.0000	0.0000	184.0000	0.0000
117	0.9740	0.0000	0.0000	20.0000	8.0000
118	0.9490	0.0000	0.0000	33.0000	15.0000

ตารางที่ ข.21 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
1	1	2	0.0303+j0.0999	0.0999
2	1	3	0.0129+j0.0424	0.0424
3	4	5	0.0018+j0.008	0.0080
4	3	5	0.0241+j0.1080	0.1080
5	5	6	0.0119+j0.0540	0.0540
6	6	7	0.0046+j0.0208	0.0208
7	8	9	0.0024+j0.0305	0.0305
8	8	5	0.0000+j0.0267	0.0267
9	9	10	0.0026+j0.0322	0.0322
10	4	11	0.0209+j0.0688	0.0688
11	5	11	0.0203+j0.0682	0.0682
12	11	12	0.0060+j0.0196	0.0196
13	2	12	0.0187+j0.0616	0.0616
14	3	12	0.0484+j0.1600	0.1600
15	7	12	0.0086+j0.0340	0.0340
16	11	13	0.0222+j0.0731	0.0731
17	12	14	0.0215+j0.0707	0.0707
18	13	15	0.0744+j0.2444	0.2444
19	14	15	0.0595+j0.1950	0.1950
20	12	16	0.0212+j0.0834	0.0834
21	15	17	0.0132+j0.0437	0.0437
22	16	17	0.0454+j0.1801	0.1801
23	17	18	0.0123+j0.0505	0.0505
24	18	19	0.0112+j0.0493	0.0493

ตารางที่ ข.21 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปปหมีแปลง (p.u.)
25	19	20	0.0252+j0.1170	0.1170
26	15	19	0.0120+0.0394	0.0394
27	20	21	0.0183+j0.0849	0.0849
28	21	22	0.0209+j0.0970	0.0970
29	22	23	0.0342+j0.1590	0.1590
30	23	24	0.0135+j0.0492	0.0492
31	23	25	0.0156+j0.0800	0.0800
32	26	25	0.0000+j0.0382	0.0382
33	25	27	0.0318+j0.1630	0.1630
34	27	28	0.0191+j0.0855	0.0855
35	28	29	0.0237+j0.0943	0.0943
36	30	17	0.0000+j0.0388	0.0388
37	8	30	0.0043+j0.0504	0.0504
38	26	30	0.0080+j0.0860	0.0860
39	17	31	0.0474+j0.1563	0.1563
40	29	31	0.0108+j0.0331	0.0331
41	23	32	0.0317+j0.1153	0.1153
42	31	32	0.0298+j0.0985	0.0985
43	27	32	0.0229+j0.0755	0.0755
44	15	33	0.0380+j0.1244	0.1244
45	19	34	0.0752+j0.2470	0.2470
46	35	36	0.0022+j0.0102	0.0102
47	35	37	0.0110+j0.0497	0.0497
48	33	37	0.0415+j0.1420	0.1420

ตารางที่ ข.21 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปปหุ้มแปลง (p.u.)
49	34	36	0.0087+j0.0268	0.0268
50	34	37	0.0026+j0.0094	0.0094
51	38	37	0.0000+j0.0375	0.0375
52	37	39	0.0321+j0.1060	0.1060
53	37	40	0.0593+j0.1680	0.1680
54	30	38	0.0046+j0.0540	0.0540
55	39	40	0.0184+j0.0605	0.0605
56	40	41	0.0145+j0.0487	0.0487
57	40	42	0.0555+j0.1830	0.1830
58	41	42	0.0410+j0.1350	0.1350
59	43	44	0.0608+j0.2454	0.2454
60	34	43	0.0413+j0.1681	0.1681
61	44	45	0.0224+j0.0901	0.0901
62	45	46	0.0400+j0.1356	0.1356
63	46	47	0.0380+j0.1270	0.1270
64	46	48	0.0601+j0.1890	0.1890
65	47	49	0.0191+j0.0625	0.0625
66	42	49	0.0715+j0.3230	0.3230
67	42	49	0.0715+j0.3230	0.3230
68	45	49	0.0684+j0.1860	0.1860
69	48	49	0.0179+j0.0505	0.0505
70	49	50	0.0267+j0.0752	0.0752
71	49	51	0.0486+j0.1370	0.1370
72	51	52	0.0203+j0.0588	0.0588

ตารางที่ ข.21 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	เทปหุ้มฉนวน (p.u.)
73	52	53	0.0405+j0.1635	0.1635
74	53	54	0.0263+j0.1220	0.1220
75	49	54	0.0730+j0.2890	0.2890
76	49	54	0.0869+j0.2910	0.2910
77	54	55	0.0169+j0.0707	0.0707
78	54	56	0.0027+j0.0095	0.0095
79	55	56	0.0049+j0.0151	0.0151
80	56	57	0.0343+j0.0966	0.0966
81	50	57	0.0474+j0.1340	0.1340
82	56	58	0.0343+j0.0966	0.0966
83	51	58	0.0255+j0.0719	0.0719
84	54	59	0.0503+j0.2293	0.2293
85	56	59	0.0825+j0.2510	0.2510
86	56	59	0.0803+j0.2390	0.2390
87	55	59	0.0474+j0.2158	0.2158
88	59	60	0.0317+j0.1450	0.1450
89	59	61	0.0328+j0.1500	0.1500
90	60	61	0.0026+j0.0135	0.0135
91	60	62	0.0123+j0.0561	0.0561
92	61	62	0.0082+j0.0376	0.0376
93	63	59	0.0000+j0.0386	0.0386
94	63	64	0.0017+j0.0200	0.0200
95	64	61	0.0000+j0.0268	0.0268
96	38	65	0.0090+j0.0986	0.0986

ตารางที่ ข.21 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	เทปหุ้มฉนวน (p.u.)
97	64	65	0.0027+j0.0302	0.0302
98	49	66	0.0180+j0.0919	0.0919
99	49	66	0.0180+j0.0919	0.0919
100	62	66	0.0482+j0.2180	0.2180
101	62	67	0.0258+j0.1170	0.1170
102	65	66	0.0000+j0.0370	0.0370
103	66	67	0.0224+j0.1015	0.1015
104	65	68	0.0014+j0.0160	0.0160
105	47	69	0.0844+j0.2778	0.2778
106	49	69	0.0985+j0.3240	0.3240
107	68	69	0.0000+j0.0370	0.0370
108	69	70	0.0300+j0.1270	0.1270
109	24	70	0.0022+j0.4115	0.4115
110	70	71	0.0088+j0.0355	0.0355
111	24	72	0.0488+j0.1960	0.1960
112	71	72	0.0446+j0.1800	0.1800
113	71	73	0.0087+j0.0454	0.0454
114	70	74	0.0401+j0.1323	0.1323
115	70	75	0.0428+j0.1410	0.1410
116	69	75	0.0405+j0.1220	0.1220
117	74	75	0.0123+j0.0406	0.0406
118	76	77	0.0444+j0.1480	0.1480
119	69	77	0.0309+j0.1010	0.1010
120	75	77	0.0601+j0.1999	0.1999

ตารางที่ ข.21 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปปหุ้มแปลง (p.u.)
121	77	78	0.0038+j0.0124	0.0124
122	78	79	0.0055+j0.0244	0.0244
123	77	80	0.0170+j0.0485	0.0485
124	77	80	0.0294+j0.1050	0.1050
125	79	80	0.0156+j0.0704	0.0704
126	68	81	0.0018+j0.0202	0.0202
127	81	80	0.0000+j0.0370	0.0370
128	77	82	0.0298+j0.0853	0.0853
129	82	83	0.0112+j0.0367	0.0367
130	83	84	0.0625+j0.1320	0.1320
131	83	85	0.0430+j0.1480	0.1480
132	84	85	0.0302+j0.0641	0.0641
133	85	86	0.0350+j0.1230	0.1230
134	86	87	0.0283+j0.2074	0.2074
135	85	88	0.0200+j0.1020	0.1020
136	85	89	0.0239+j0.1730	0.1730
137	88	89	0.0139+j0.0712	0.0712
138	89	90	0.0518+j0.1880	0.1880
139	89	90	0.0238+j0.0997	0.0997
140	90	91	0.0254+j0.0836	0.0836
141	89	92	0.0099+j0.0505	0.0505
142	89	92	0.0393+j0.1581	0.1581
143	91	92	0.0387+j0.1272	0.1272
144	92	93	0.0258+j0.0848	0.0848

ตารางที่ ข.21 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปปหมีแปลง (p.u.)
145	92	94	0.0481+j0.1580	0.1580
146	93	94	0.0223+j0.0732	0.0732
147	94	95	0.0132+j0.0434	0.0434
148	80	96	0.0356+j0.1820	0.1820
149	82	96	0.0162+j0.0530	0.0530
150	94	96	0.0269+j0.0869	0.0869
151	80	97	0.0183+j0.0934	0.0934
152	80	98	0.0238+j0.1080	0.1080
153	80	99	0.0454+j0.2060	0.2060
154	92	100	0.0648+j0.2950	0.2950
155	94	100	0.0178+j0.0580	0.0580
156	95	96	0.0171+j0.0547	0.0547
157	96	97	0.0173+j0.0885	0.0885
158	98	100	0.0397+j0.1790	0.1790
159	99	100	0.0180+j0.0813	0.0813
160	100	101	0.0277+j0.1262	0.1262
161	92	102	0.0123+j0.0559	0.0559
162	101	102	0.0246+j0.1120	0.1120
163	100	103	0.016+j0.0525	0.0525
164	100	104	0.0451+j0.2040	0.2040
165	103	104	0.0466+j0.1584	0.1584
166	103	105	0.0535+j0.1625	0.1625
167	100	106	0.0605+j0.2290	0.2290
168	104	105	0.0099+j0.0378	0.0378

ตารางที่ ข.21 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปปหมีแปลง (p.u.)
169	105	106	0.0140+j0.0547	0.0547
170	105	107	0.0530+j0.1830	0.1830
171	105	108	0.0261+j0.0703	0.0703
172	106	107	0.0530+j0.1830	0.1830
173	108	109	0.0105+j0.0288	0.0288
174	103	110	0.0391+j0.1813	0.1813
175	109	110	0.0278+j0.0762	0.0762
176	110	111	0.0220+j0.0755	0.0755
177	110	112	0.0247+j0.0640	0.0640
178	17	113	0.0091+j0.0301	0.0301
179	32	113	0.0615+j0.2030	0.2030
180	32	114	0.0135+j0.0612	0.0612
181	27	115	0.0164+j0.0741	0.0741
182	114	115	0.0023+j0.0104	0.0104
183	68	116	0.0003+j0.0040	0.0040
184	12	117	0.0329+j0.1400	0.1400
185	75	118	0.0145+j0.0481	0.0481
186	76	118	0.0164+j0.0544	0.0544

ตารางที่ ข.22 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 118 บัสโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)
1	1	55.0000	1.2000	0.0187	5.0000	30.0000
2	4	35.0000	2.1750	0.0275	5.0000	30.0000

ตารางที่ ข.22 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 118 บัสโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสอง
แบบราบเรียบ (ต่อ)

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	P_{min}	P_{max}
					(MW)	(MW)
3	6	30.0000	2.1250	0.0500	5.0000	30.0000
4	8	80.0000	2.2250	0.0417	5.0000	30.0000
5	10	125.0000	3.1430	0.0135	150.0000	500.0000
6	12	60.0000	3.1250	0.0125	100.0000	300.0000
7	15	54.0000	2.1950	0.0276	10.0000	30.0000
8	18	45.0000	2.2200	0.0220	25.0000	100.0000
9	19	36.0000	2.1250	0.0318	5.0000	30.0000
10	24	90.0000	2.1300	0.0125	5.0000	30.0000
11	25	83.0000	2.2300	0.0365	100.0000	300.0000
12	26	44.0000	3.1430	0.0156	100.0000	350.0000
13	27	120.0000	3.1400	0.0333	8.0000	30.0000
14	31	66.0000	3.1550	0.0225	8.0000	30.0000
15	32	82.0000	2.1600	0.0350	25.0000	100.0000
16	34	44.0000	3.1450	0.0125	8.0000	30.0000
17	36	35.0000	3.1270	0.0225	25.0000	100.0000
18	40	60.0000	2.1520	0.0165	8.0000	30.0000
19	42	35.0000	2.1750	0.0175	8.0000	30.0000
20	46	30.0000	1.1250	0.0450	25.0000	100.0000
21	49	35.0000	1.2250	0.0315	50.0000	250.0000
22	54	40.0000	2.1430	0.0225	50.0000	250.0000
23	55	75.0000	2.1250	0.0135	25.0000	100.0000
24	56	54.0000	1.1950	0.0276	25.0000	100.0000
25	59	80.0000	1.2200	0.0220	50.0000	200.0000
26	61	60.0000	2.1500	0.0318	50.0000	200.0000

ตารางที่ ข.22 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 118 บัสโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสอง
แบบราบเรียบ (ต่อ)

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	P_{min}	P_{max}
					(MW)	(MW)
27	62	90.0000	2.1000	0.0125	25.0000	100.0000
28	65	83.0000	3.2300	0.0365	100.0000	420.0000
29	66	50.0000	2.1450	0.0156	100.0000	420.0000
30	69	110.0000	1.5400	0.0352	80.0000	300.0000
31	70	75.0000	2.1550	0.0525	30.0000	80.0000
32	72	82.0000	2.1600	0.0350	10.0000	30.0000
33	73	95.0000	2.1440	0.0125	5.0000	20.0000
34	74	50.0000	1.7700	0.0213	5.0000	20.0000
35	76	135.0000	2.2300	0.0187	25.0000	100.0000
36	77	65.0000	2.1750	0.0275	25.0000	100.0000
37	80	70.0000	2.1250	0.0325	150.0000	500.0000
38	85	50.0000	2.2250	0.0417	10.0000	30.0000
39	87	115.0000	1.1540	0.0125	200.0000	650.0000
40	89	75.0000	1.7250	0.0125	150.0000	500.0000
41	90	70.0000	2.1950	0.0276	8.0000	20.0000
42	91	65.0000	1.2500	0.0220	20.0000	50.0000
43	92	100.0000	2.1250	0.0318	100.0000	300.0000
44	99	90.0000	2.1350	0.0125	100.0000	300.0000
45	100	83.0000	2.2300	0.0365	100.0000	300.0000
46	103	70.0000	2.1250	0.0175	8.0000	20.0000
47	104	120.0000	3.1450	0.0335	25.0000	100.0000
48	105	80.0000	3.1550	0.0225	25.0000	100.0000
49	107	55.0000	1.8600	0.0350	8.0000	20.0000

ตารางที่ ข.22 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 118 บัสโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสอง

แบบราบเรียบ (ต่อ)

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	$P_{\min}$	$P_{\max}$
					(MW)	(MW)
50	110	45.0000	2.1450	0.0125	25.0000	50.0000
51	111	35.0000	2.4500	0.0225	25.0000	100.0000
52	112	85.0000	2.1600	0.0135	25.0000	100.0000
53	113	40.0000	2.1550	0.0125	25.0000	100.0000
54	116	65.0000	2.4500	0.0115	25.0000	50.0000

ตารางที่ ข.23 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 118 บัส

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
P_1 (MW)	5.0000	30.0000
P_4 (MW)	5.0000	30.0000
P_6 (MW)	5.0000	30.0000
P_8 (MW)	5.0000	30.0000
P_{10} (MW)	150.0000	500.0000
P_{12} (MW)	100.0000	300.0000
P_{15} (MW)	10.0000	30.0000
P_{18} (MW)	25.0000	100.0000
P_{19} (MW)	5.0000	30.0000
P_{24} (MW)	5.0000	30.0000
P_{25} (MW)	100.0000	300.0000
P_{26} (MW)	100.0000	350.0000
P_{27} (MW)	8.0000	30.0000
P_{31} (MW)	8.0000	30.0000

ตารางที่ ข.23 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
P_{32} (MW)	25.0000	100.0000
P_{34} (MW)	8.0000	30.0000
P_{36} (MW)	25.0000	100.0000
P_{40} (MW)	8.0000	30.0000
P_{42} (MW)	8.0000	30.0000
P_{46} (MW)	25.0000	100.0000
P_{49} (MW)	50.0000	250.0000
P_{54} (MW)	50.0000	250.0000
P_{55} (MW)	25.0000	100.0000
P_{59} (MW)	50.0000	200.0000
P_{61} (MW)	50.0000	200.0000
P_{62} (MW)	25.0000	100.0000
P_{65} (MW)	100.0000	420.0000
P_{66} (MW)	100.0000	420.0000
P_{69} (MW)	80.0000	300.0000
P_{70} (MW)	30.0000	80.0000
P_{72} (MW)	10.0000	30.0000
P_{73} (MW)	5.0000	20.0000
P_{74} (MW)	5.0000	20.0000
P_{76} (MW)	25.0000	100.0000
P_{77} (MW)	25.0000	100.0000
P_{80} (MW)	150.0000	500.0000
P_{85} (MW)	10.0000	30.0000

ตารางที่ ข.23 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
P_{87} (MW)	200.0000	650.0000
P_{89} (MW)	150.0000	500.0000
P_{90} (MW)	8.0000	20.0000
P_{91} (MW)	20.0000	50.0000
P_{92} (MW)	100.0000	300.0000
P_{99} (MW)	100.0000	300.0000
P_{100} (MW)	100.0000	300.0000
P_{103} (MW)	8.0000	20.0000
P_{104} (MW)	25.0000	100.0000
P_{105} (MW)	25.0000	100.0000
P_{107} (MW)	8.0000	20.0000
P_{110} (MW)	25.0000	50.0000
P_{111} (MW)	25.0000	100.0000
P_{112} (MW)	25.0000	100.0000
P_{113} (MW)	25.0000	100.0000
P_{116} (MW)	25.0000	50.0000
Q_1 (MVar)	-5.0000	15.0000
Q_4 (MVar)	-300.0000	300.0000
Q_6 (MVar)	-13.0000	50.0000
Q_8 (MVar)	-300.0000	300.0000
Q_{10} (MVar)	-147.0000	200.0000
Q_{12} (MVar)	-35.0000	120.0000
Q_{15} (MVar)	-10.0000	30.0000
Q_{18} (MVar)	-16.0000	50.0000

ตารางที่ ข.23 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
Q_{19} (MVar)	-8.0000	24.0000
Q_{24} (MVar)	-300.0000	300.0000
Q_{25} (MVar)	-47.0000	140.0000
Q_{26} (MVar)	-1000.0000	1000.0000
Q_{27} (MVar)	-300.0000	300.0000
Q_{31} (MVar)	-300.0000	300.0000
Q_{32} (MVar)	-14.0000	42.0000
Q_{34} (MVar)	-8.0000	24.0000
Q_{36} (MVar)	-8.0000	24.0000
Q_{40} (MVar)	-300.0000	300.0000
Q_{42} (MVar)	-300.0000	300.0000
Q_{46} (MVar)	-100.0000	100.0000
Q_{49} (MVar)	-85.0000	210.0000
Q_{54} (MVar)	-300.0000	300.0000
Q_{55} (MVar)	-8.0000	23.0000
Q_{56} (MVar)	-8.0000	15.0000
Q_{59} (MVar)	-60.0000	180.0000
Q_{61} (MVar)	-100.0000	300.0000
Q_{62} (MVar)	-20.0000	20.0000
Q_{65} (MVar)	-67.0000	200.0000
Q_{66} (MVar)	-67.0000	200.0000
Q_{69} (MVar)	-300.0000	300.0000
Q_{70} (MVar)	-10.0000	32.0000
Q_{72} (MVar)	-100.0000	100.0000

ตารางที่ ข.23 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
Q_{73} (MVar)	-100.0000	100.0000
Q_{74} (MVar)	-6.0000	9.0000
Q_{76} (MVar)	-8.0000	23.0000
Q_{77} (MVar)	-20.0000	70.0000
Q_{80} (MVar)	-165.0000	280.0000
Q_{85} (MVar)	-8.0000	23.0000
Q_{87} (MVar)	-100.0000	1000.0000
Q_{89} (MVar)	-210.0000	300.0000
Q_{90} (MVar)	-300.0000	300.0000
Q_{91} (MVar)	-100.0000	100.0000
Q_{92} (MVar)	-3.0000	9.0000
Q_{99} (MVar)	-100.0000	100.0000
Q_{100} (MVar)	-50.0000	155.0000
Q_{103} (MVar)	-15.0000	40.0000
Q_{104} (MVar)	-8.0000	23.0000
Q_{105} (MVar)	-8.0000	23.0000
Q_{107} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{110} (MVar)	-8.0000	23.0000
Q_{111} (MVar)	-100.0000	1000.0000
Q_{112} (MVar)	-100.0000	1000.0000
Q_{113} (MVar)	-100.0000	200.0000
Q_{116} (MVar)	-1000.0000	1000.0000
$V_1 - V_{118}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$\delta_1 - \delta_{118}$ (degree)	-30.0000	30.0000

ตารางที่ ข.23 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

T_{26-25} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{30-17} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{38-37} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{63-59} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{64-61} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{65-66} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{68-69} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{81-80} (p.u.)	0.9000	1.1000

ข.6 ระบบทดสอบ 169 บัส (ภาคกลางตอนบนและภาคตะวันตกของ กฟผ.)

ตารางที่ ข.24 ชื่อบัสของระบบทดสอบ 169 บัส

No.	ชื่อบัสภาษาอังกฤษ	ชื่อบัสภาษาไทย	พื้นที่
1	TW-230	ท่าวัง	ภาคกลางตอนบน
2	TL3-230	ท่าลาน 3	ภาคกลางตอนบน
3	AT1-230	อ่างทอง 1	ภาคกลางตอนบน
4	AT1_6-69	อ่างทอง 1	ภาคกลางตอนบน
5	BI2-230	บางปะอิน 2	ภาคกลางตอนบน
6	AT2-230	อ่างทอง 2	ภาคกลางตอนบน
7	TW-115	ท่าวัง	ภาคกลางตอนบน
8	AT1-115	อ่างทอง 1	ภาคกลางตอนบน
9	LB1-115KV	ลพบุรี 1	ภาคกลางตอนบน
10	SI-115	สิงห์บุรี	ภาคกลางตอนบน
11	AY1-115	อยุธยา 1	ภาคกลางตอนบน
12	SP-115	สุพรรณบุรี	ภาคกลางตอนบน
13	DBN-115	เดิมบางนางบวช	ภาคกลางตอนบน

ตารางที่ ข.24 ชื่อ巴士ของระบบทดสอบ 169巴士 (ต่อ)

No.	ชื่อ巴士ภาษาอังกฤษ	ชื่อ巴士ภาษาไทย	พื้นที่
14	LB2-115	ลพบุรี 2	ภาคกลางตอนบน
15	CBD-115	ชัยบาดาล	ภาคกลางตอนบน
16	SP-1-22	สุพรรณบุรี	ภาคกลางตอนบน
17	SP-2-22	สุพรรณบุรี	ภาคกลางตอนบน
18	DBN-1-22	เดิมบางนางบวช	ภาคกลางตอนบน
19	DBN-2-22	เดิมบางนางบวช	ภาคกลางตอนบน
20	LB2-1-22	ลพบุรี 2	ภาคกลางตอนบน
21	LB2-2-22	ลพบุรี 2	ภาคกลางตอนบน
22	AT2-4-22	อ่างทอง 2	ภาคกลางตอนบน
23	CBD-2-22	ชัยบาดาล	ภาคกลางตอนบน
24	CBD-1-22	ชัยบาดาล	ภาคกลางตอนบน
25	TNS-22	อุตสาหกรรมน้ำตาล ที่ เอ็น	ภาคกลางตอนบน
26	AY1-2-22	อยุธยา 1	ภาคกลางตอนบน
27	AY1-1-22	อยุธยา 1	ภาคกลางตอนบน
28	LB1-1-22	ลพบุรี 1	ภาคกลางตอนบน
29	LB1-2-22	ลพบุรี 1	ภาคกลางตอนบน
30	SI-2-22	สิงห์บุรี	ภาคกลางตอนบน
31	SI-3-22	สิงห์บุรี	ภาคกลางตอนบน
32	TL1-115	ท่าลาน 1	ภาคกลางตอนบน
33	TL1-6-22	ท่าลาน 1	ภาคกลางตอนบน
34	TL-SIAM-115	ท่าลาน	ภาคกลางตอนบน
35	AY2-115	อยุธยา 2	ภาคกลางตอนบน
36	BI1-115	บางปะอิน 1	ภาคกลางตอนบน

ตารางที่ ข.24 ชื่อ巴士ของระบบทดสอบ 169巴士 (ต่อ)

No.	ชื่อ巴士ภาษาอังกฤษ	ชื่อ巴士ภาษาไทย	พื้นที่
37	BI-1-22	บางปะอิน	ภาคกลางตอนบน
38	BI-2-22	บางปะอิน	ภาคกลางตอนบน
39	TL3-115	ท่าลาน 3	ภาคกลางตอนบน
40	SR1-115	สระบุรี 1	ภาคกลางตอนบน
41	SR1-1-22	สระบุรี 1	ภาคกลางตอนบน
42	SR1-2-22	สระบุรี 1	ภาคกลางตอนบน
43	TL2-115	ท่าลาน 2	ภาคกลางตอนบน
44	GCC-115	บริษัท กัลฟ์ โคเจนเนอเรชั่น จำกัด	ภาคกลางตอนบน
45	PTB-115	พระพุทธรบาท	ภาคกลางตอนบน
46	PTB-1-22	พระพุทธรบาท	ภาคกลางตอนบน
47	PTB-2-22	พระพุทธรบาท	ภาคกลางตอนบน
48	AY2_6-69	อยุธยา 2	ภาคกลางตอนบน
49	PH_6-69	ผักไห่	ภาคกลางตอนบน
50	PH-1-22	ผักไห่	ภาคกลางตอนบน
51	AY2-2-22	อยุธยา 2	ภาคกลางตอนบน
52	AY2-1-22	อยุธยา 2	ภาคกลางตอนบน
53	BI2-115	บางปะอิน 2	ภาคกลางตอนบน
54	SR4-2-22	สระบุรี 4	ภาคกลางตอนบน
55	SR4-1-22	สระบุรี 4	ภาคกลางตอนบน
56	WN-CC1-230	วังน้อย	ภาคกลางตอนบน
57	NY-115	นครนายก	ภาคกลางตอนบน
58	NY-1-22	นครนายก	ภาคกลางตอนบน
59	NY-2-22	นครนายก	ภาคกลางตอนบน

ตารางที่ ข.24 ชื่อ巴士ของระบบทดสอบ 169巴士 (ต่อ)

No.	ชื่อ巴士ภาษาอังกฤษ	ชื่อ巴士ภาษาไทย	พื้นที่
60	SR2-230	สระบุรี 2	ภาคกลางตอนบน
61	WN-500	วังน้อย	ภาคกลางตอนบน
62	SR2-5-22	สระบุรี 2	ภาคกลางตอนบน
63	SR3-115	สระบุรี 3	ภาคกลางตอนบน
64	SR3-1-22	สระบุรี 3	ภาคกลางตอนบน
65	SR3-2-22	สระบุรี 3	ภาคกลางตอนบน
66	SR3-3-22	สระบุรี 3	ภาคกลางตอนบน
67	BP2-230	บ้านโป่ง 2	ภาคตะวันตก
68	SN4-230	สมุทรสาคร 4	ภาคตะวันตก
69	BSP2-230	บางสะพาน 2	ภาคตะวันตก
70	BP2-4-22	บ้านโป่ง 2	ภาคตะวันตก
71	BP2-6-22	บ้านโป่ง 2	ภาคตะวันตก
72	TM-115	ท่าม่วง	ภาคตะวันตก
73	TM-1-22	ท่าม่วง	ภาคตะวันตก
74	TM-2-22	ท่าม่วง	ภาคตะวันตก
75	BSP2-500	บางสะพาน 2	ภาคตะวันตก
76	KB-115	กาญจนบุรี	ภาคตะวันตก
77	KB-1-22	กาญจนบุรี	ภาคตะวันตก
78	KB2-22	กาญจนบุรี 2	ภาคตะวันตก
79	KB3-22	กาญจนบุรี 3	ภาคตะวันตก
80	KS-115	กำแพงแสน	ภาคตะวันตก
81	KS-1-22	กำแพงแสน	ภาคตะวันตก
82	KS-2-22	กำแพงแสน	ภาคตะวันตก

ตารางที่ ข.24 ชื่อ巴士ของระบบทดสอบ 169巴士 (ต่อ)

No.	ชื่อ巴士ภาษาอังกฤษ	ชื่อ巴士ภาษาไทย	พื้นที่
83	KB2-115	กาญจนบุรี 2	ภาคตะวันตก
84	BP1-115	บ้านโป่ง 1	ภาคตะวันตก
85	BP1-1-22	บ้านโป่ง 1	ภาคตะวันตก
86	BP1-2-22	บ้านโป่ง 1	ภาคตะวันตก
87	BP1-3-22	บ้านโป่ง 1	ภาคตะวันตก
88	RB2-230	ราชบุรี 2	ภาคตะวันตก
89	CBG-500	จอมบึง	ภาคตะวันตก
90	KB2-230	กาญจนบุรี 2	ภาคตะวันตก
91	SNR-115	เขื่อนศรีนครินทร์	ภาคตะวันตก
92	SNR-2-22	เขื่อนศรีนครินทร์	ภาคตะวันตก
93	RB2-115	ราชบุรี 2	ภาคตะวันตก
94	RB2-2-22	ราชบุรี 2	ภาคตะวันตก
95	RB2-3-22	ราชบุรี 2	ภาคตะวันตก
96	TECO-230	บริษัท ไตร เอนเนอจี จำกัด	ภาคตะวันตก
97	VRK-115	เขื่อนวชิราลงกรณ์	ภาคตะวันตก
98	VRK-3-22	เขื่อนวชิราลงกรณ์	ภาคตะวันตก
99	RB3-WP-115	ราชบุรี 3	ภาคตะวันตก
100	RWP-1-22	โรงไฟฟ้าราชบุรี	ภาคตะวันตก
101	HH-230	หัวหิน	ภาคตะวันตก
102	HH-115	หัวหิน	ภาคตะวันตก
103	HH-2-22	หัวหิน	ภาคตะวันตก
104	PB-115	เพชรบุรี	ภาคตะวันตก
105	PB-1-22	เพชรบุรี	ภาคตะวันตก

ตารางที่ ข.24 ชื่อ巴士ของระบบทดสอบ 169巴士 (ต่อ)

No.	ชื่อ巴士ภาษาอังกฤษ	ชื่อ巴士ภาษาไทย	พื้นที่
106	PB-2-22	เพชรบุรี	ภาคตะวันตก
107	RB1-115	ราชบุรี 1	ภาคตะวันตก
108	RB1-1-22	ราชบุรี 1	ภาคตะวันตก
109	RB1-2-22	ราชบุรี 1	ภาคตะวันตก
110	NCS-230	นครชัยศรี	ภาคตะวันตก
111	NCS-115	นครชัยศรี	ภาคตะวันตก
112	NCS-1-22	นครชัยศรี	ภาคตะวันตก
113	NCS-2-22	นครชัยศรี	ภาคตะวันตก
114	NCS-3-22	นครชัยศรี	ภาคตะวันตก
115	NCS-4-22	นครชัยศรี	ภาคตะวันตก
116	SM-115	สมุทรสงคราม	ภาคตะวันตก
117	SM-1-22	สมุทรสงคราม	ภาคตะวันตก
118	SM-2-22	สมุทรสงคราม	ภาคตะวันตก
119	SM-3-22	สมุทรสงคราม	ภาคตะวันตก
120	CA-115	ชะอำ	ภาคตะวันตก
121	CA-1-22	ชะอำ	ภาคตะวันตก
122	CA-2-22	ชะอำ	ภาคตะวันตก
123	KKC-3-22	แก่งกระจาง	ภาคตะวันตก
124	PRB-115	ปราณบุรี	ภาคตะวันตก
125	PRB-1-22	ปราณบุรี	ภาคตะวันตก
126	PRB-2-22	ปราณบุรี	ภาคตะวันตก
127	SA2-115	สามพราน 2	ภาคตะวันตก
128	SA2-1-22	สามพราน 2	ภาคตะวันตก

ตารางที่ ข.24 ชื่อ巴士ของระบบทดสอบ 169巴士 (ต่อ)

No.	ชื่อ巴士ภาษาอังกฤษ	ชื่อ巴士ภาษาไทย	พื้นที่
129	SA2-2-22	สามพราน 2	ภาคตะวันตก
130	SN3-115	สมุทรสาคร 3	ภาคตะวันตก
131	SN3-1-22	สมุทรสาคร 3	ภาคตะวันตก
132	SN3-2-22	สมุทรสาคร 3	ภาคตะวันตก
133	SN3-3-22	สมุทรสาคร 3	ภาคตะวันตก
134	PKK-115	ประจวบคีรีขันธ์	ภาคตะวันตก
135	PKK-1-22	ประจวบคีรีขันธ์	ภาคตะวันตก
136	PKK-4-22	ประจวบคีรีขันธ์	ภาคตะวันตก
137	PKK-230	ประจวบคีรีขันธ์	ภาคตะวันตก
138	SA1-115	สามพราน 1	ภาคตะวันตก
139	SA1-5-22	สามพราน 1	ภาคตะวันตก
140	SA1-6-22	สามพราน 1	ภาคตะวันตก
141	SA1-7-22	สามพราน 1	ภาคตะวันตก
142	SN4-115	สมุทรสาคร 4	ภาคตะวันตก
143	SA1-230	สามพราน 1	ภาคตะวันตก
144	SN2-115	สมุทรสาคร 2	ภาคตะวันตก
145	SN2-1-22	สมุทรสาคร 2	ภาคตะวันตก
146	SN2-2-22	สมุทรสาคร 2	ภาคตะวันตก
147	SN2-3-22	สมุทรสาคร 2	ภาคตะวันตก
148	BSP1-115	บางสะพาน 1	ภาคตะวันตก
149	BSP1-3-22	บางสะพาน 1	ภาคตะวันตก
150	BSP1-5-22	บางสะพาน 1	ภาคตะวันตก
151	BSP1-230	บางสะพาน 1	ภาคตะวันตก

ตารางที่ ข.24 ชื่อ巴士ของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

No.	ชื่อ巴士ภาษาอังกฤษ	ชื่อ巴士ภาษาไทย	พื้นที่
152	SN1-115	สมุทรสาคร 1	ภาคตะวันตก
153	SN1-1-22	สมุทรสาคร 1	ภาคตะวันตก
154	SN1-2-22	สมุทรสาคร 1	ภาคตะวันตก
155	SN1-3-22	สมุทรสาคร 1	ภาคตะวันตก
156	AT2-115	อ่างทอง 2	ภาคกลางตอนบน
157	RP-115	โรจนะ เพาเวอร์	ภาคกลางตอนบน
158	SR4-115	สระบุรี 4	ภาคกลางตอนบน
159	WN-B-230	วังน้อย	ภาคกลางตอนบน
160	WN-A-230	วังน้อย	ภาคกลางตอนบน
161	SR2-115	สระบุรี 2	ภาคกลางตอนบน
162	BP2-115	บ้านโป่ง 2	ภาคตะวันตก
163	RB3-230	ราชบุรี 3	ภาคตะวันตก
164	RB3-500	ราชบุรี 3	ภาคตะวันตก
165	TN-115	ท่าทุ่งนา	ภาคตะวันตก
166	SNR-230	เขื่อนศรีนครินทร์	ภาคตะวันตก
167	VRK-230	เขื่อนวชิราลงกรณ์	ภาคตะวันตก
168	KKC-115	แก่งกระจาง	ภาคตะวันตก
169	KKI-230	แก่งคอย	ภาคกลางตอนบน

ตารางที่ ข.25 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 169 บัส

บัส	แรงดันบัส (p.u.)	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอกทีฟ (MVar)
1	1.0232	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	1.0221	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	1.0467	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	1.0449	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	1.0246	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	1.0210	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	1.0176	0.0000	0.0000	50.2542	14.7864
8	1.0205	0.0000	0.0000	67.9399	29.8626
9	1.0163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	1.0157	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	1.0322	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	1.0163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.9780	0.0000	0.0000	51.5106	21.6480
14	1.0137	0.0000	0.0000	53.4435	20.0051
15	1.0066	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16	1.0238	0.0000	0.0000	10.3408	3.1892
17	1.0158	0.0000	0.0000	22.7111	8.9878
18	0.9870	0.0000	0.0000	8.6012	2.7060
19	1.0011	0.0000	0.0000	9.0844	1.7396
20	1.0070	0.0000	0.0000	12.9501	4.7355
21	0.9953	0.0000	0.0000	6.6684	3.4791
22	1.0023	0.0000	0.0000	23.6775	14.7864
23	1.0203	0.0000	0.0000	13.7233	3.6724

ตารางที่ ข.25 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
24	1.0058	0.0000	0.0000	18.1688	18.2655
25	1.0058	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	1.0396	0.0000	0.0000	13.3367	3.2859
27	1.0477	0.0000	0.0000	5.1221	0.2899
28	1.0608	0.0000	0.0000	7.5381	2.9959
29	1.0296	0.0000	0.0000	10.0509	6.1851
30	1.0189	0.0000	0.0000	19.0386	10.4374
31	1.0726	0.0000	0.0000	16.6226	10.0509
32	1.0225	0.0000	0.0000	15.1729	6.3784
33	1.0335	0.0000	0.0000	6.7650	1.5463
34	1.0225	0.0000	0.0000	27.3499	12.7569
35	1.0315	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
36	1.0317	0.0000	0.0000	108.8198	41.2665
37	1.0383	0.0000	0.0000	14.1099	3.5758
38	1.0294	0.0000	0.0000	8.4079	5.2187
39	1.0246	0.0000	0.0000	407.9292	200.4371
40	1.0227	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
41	1.0170	0.0000	0.0000	3.8657	2.3194
42	1.0191	0.0000	0.0000	19.1353	7.3449
43	1.0196	0.0000	0.0000	37.9806	19.1353
44	1.0246	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
45	1.0235	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
46	1.0086	0.0000	0.0000	6.6684	2.8993

ตารางที่ ข.25 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
47	1.0392	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
48	1.0064	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
49	1.0053	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50	1.0429	0.0000	0.0000	1.0631	0.0000
51	1.0122	0.0000	0.0000	4.6389	2.8026
52	1.0034	0.0000	0.0000	20.4883	10.8240
53	1.0333	0.0000	0.0000	392.0798	236.5816
54	1.0042	0.0000	0.0000	2.6094	0.2899
55	0.9996	0.0000	0.0000	8.9878	2.0295
56	1.0333	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
57	1.0021	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
58	1.0281	0.0000	0.0000	12.9501	5.7986
59	1.0021	0.0000	0.0000	13.4102	6.7051
60	1.0476	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
61	1.0175	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
62	1.0052	0.0000	0.0000	7.1516	4.9288
63	1.0154	0.0000	0.0000	74.3183	34.7914
64	1.0154	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
65	1.0154	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
66	1.0154	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
67	1.0085	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
68	0.9986	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
69	1.0432	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ข.25 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
70	1.0135	0.0000	0.0000	17.9127	8.3822
71	1.0204	0.0000	0.0000	10.1046	3.4448
72	1.0229	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
73	1.0229	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
74	1.0019	0.0000	0.0000	27.9025	5.5116
75	1.0407	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
76	1.0259	0.0000	0.0000	0.0317	0.0317
77	1.0039	0.0000	0.0000	12.2863	7.1192
78	1.0239	0.0000	0.0000	24.4578	9.6453
79	1.0039	0.0000	0.0000	12.2863	7.1192
80	0.9939	0.0000	0.0000	20.3241	8.4971
81	0.9776	0.0000	0.0000	25.2616	15.5014
82	0.9751	0.0000	0.0000	18.4869	13.3197
83	1.0253	0.0000	0.0000	33.6438	15.1569
84	1.0317	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
85	1.0301	0.0000	0.0000	8.8415	2.2965
86	1.0301	0.0000	0.0000	8.8415	2.2965
87	1.0358	0.0000	0.0000	9.5305	2.4113
88	1.0177	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
89	1.0184	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
90	1.0177	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
91	1.0319	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
92	0.9853	0.0000	0.0000	1.7224	2.7558

ตารางที่ ข.25 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
93	1.0217	0.0000	0.0000	288.4411	150.7656
94	1.0228	0.0000	0.0000	18.1424	7.1192
95	1.0150	0.0000	0.0000	5.6264	3.2151
96	1.0225	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
97	1.0265	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
98	0.9645	0.0000	0.0000	14.9273	9.9898
99	1.0228	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
100	1.0228	0.0000	0.0000	0.0025	0.0025
101	1.0230	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
102	1.0258	0.0000	0.0000	90.4823	32.2659
103	1.0258	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
104	1.0169	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
105	1.0287	0.0000	0.0000	21.3575	9.1860
106	1.0287	0.0000	0.0000	19.9796	9.1860
107	1.0212	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
108	1.0216	0.0000	0.0000	15.9607	7.4636
109	1.0313	0.0000	0.0000	8.2674	4.2485
110	1.0022	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
111	1.0193	0.0000	0.0000	269.4949	124.3558
112	0.9943	0.0000	0.0000	9.6453	4.8227
113	0.9943	0.0000	0.0000	9.6453	4.8227
114	1.0262	0.0000	0.0000	8.0378	-2.8706
115	1.0118	0.0000	0.0000	10.2195	2.8706

ตารางที่ ข.25 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
116	1.0103	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
117	1.0070	0.0000	0.0000	11.1381	4.2485
118	1.0070	0.0000	0.0000	11.1381	4.2485
119	1.0115	0.0000	0.0000	14.5828	3.2151
120	1.0182	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
121	1.0252	0.0000	0.0000	2.9855	2.8706
122	1.0246	0.0000	0.0000	9.9898	4.8227
123	0.9252	0.0000	0.0000	7.3488	11.3677
124	1.0130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
125	1.0022	0.0000	0.0000	13.8939	7.6933
126	1.0169	0.0000	0.0000	18.8313	8.4971
127	1.0214	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
128	1.0116	0.0000	0.0000	31.9214	17.4534
129	0.9984	0.0000	0.0000	16.5348	8.7267
130	1.0094	0.0000	0.0000	98.5201	43.4040
131	0.9942	0.0000	0.0000	26.5246	15.9607
132	0.9890	0.0000	0.0000	32.6104	17.3386
133	1.0195	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
134	1.0248	0.0000	0.0000	25.8357	6.4302
135	0.9980	0.0000	0.0000	16.0755	8.1526
136	1.0248	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
137	1.0359	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
138	1.0203	0.0000	0.0000	443.3404	215.2974

ตารางที่ ข.25 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
139	1.0085	0.0000	0.0000	24.9171	11.5974
140	1.0240	0.0000	0.0000	15.8459	6.2006
141	1.0363	0.0000	0.0000	4.5930	3.6744
142	1.0157	0.0000	0.0000	167.7597	83.2483
143	0.9882	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
144	1.0070	0.0000	0.0000	154.4400	81.1815
145	1.0080	0.0000	0.0000	27.2136	4.8227
146	1.0280	0.0000	0.0000	16.7645	-0.6890
147	0.9681	0.0000	0.0000	25.6060	19.7499
148	1.0245	0.0000	0.0000	70.5027	-19.9796
149	1.0245	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
150	1.0245	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
151	1.0440	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
152	1.0136	0.0000	0.0000	0.0025	0.0025
153	1.0380	0.0000	0.0000	10.3343	1.8372
154	1.0117	0.0000	0.0000	17.6831	6.6599
155	1.0274	0.0000	0.0000	13.4346	2.2965
156	1.0364	42.4000	0.9000	95.6764	56.9226
157	1.0334	58.1000	8.5000	90.0000	6.8000
158	1.0049	0.0000	0.0000	188.5501	138.8757
159	1.0141	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
160	1.0333	1179.6000	275.3000	0.0000	0.0000
161	1.0208	0.0000	0.0000	299.1052	172.8361

ตารางที่ ข.25 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส	กำลังไฟฟ้าจริง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	โหลดจริง	โหลดรีแอกทีฟ
	(p.u.)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
162	1.0314	0.0000	0.0000	167.0708	51.2121
163	1.0182	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
164	1.0200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
165	1.0350	33.2000	3.0000	0.0000	0.0000
166	1.0350	191.1000	35.7000	0.0000	0.0000
167	1.0425	66.2000	10.9000	0.0000	0.0000
168	1.0161	-0.7000	-0.2000	0.0000	0.0000
169	1.0470	1159.2000	125.8000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u.)
1	1	2	0.0005+j0.0056	1.0000
2	1	7	0.0000+j0.0775	1.0750
3	1	7	0.0000+j0.0775	1.0500
4	2	6	0.0022+j0.0173	1.0000
5	2	6	0.0022+j0.0173	1.0000
6	2	39	0.0000+j0.0761	1.0000
7	2	39	0.0000+j0.0731	1.0000
8	2	39	0.0000+j0.0731	1.0000
9	2	39	0.0000+j0.0794	1.0000
10	2	169	0.0003+j0.0033	1.0000
11	2	169	0.0003+j0.0033	1.0000
12	3	8	0.0000+j0.0763	1.0250

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
13	3	8	0.0000+j0.0769	1.0250
14	3	8	0.0000+j0.0755	1.0250
15	3	4	0.0000+j0.4725	1.0250
16	3	4	0.0000+j0.2862	1.0250
17	3	5	0.0021+j0.0162	1.0000
18	3	5	0.0021+j0.0162	1.0000
19	5	53	0.0000+j0.0661	1.0125
20	5	53	0.0000+j0.0661	1.0125
21	5	53	0.0000+j0.0660	1.0125
22	5	53	0.0000+j0.0640	1.0125
23	5	160	0.0002+j0.0028	1.0000
24	5	160	0.0002+j0.0028	1.0000
25	6	156	0.0000+j0.0489	0.9565
26	6	156	0.0000+j0.0498	0.9565
27	7	9	0.0223+j0.0338	1.0000
28	7	10	0.0182+j0.0276	1.0000
29	8	10	0.0060+j0.0281	1.0000
30	8	32	0.0137+j0.0410	1.0000
31	8	32	0.0137+j0.0410	1.0000
32	8	32	0.0140+j0.0424	1.0000
33	156	32	0.0755+j0.1165	1.0000
34	156	12	0.0462+j0.0713	1.0000
35	156	13	0.0153+j0.0450	1.0000
36	156	11	0.0157+j0.0456	1.0000

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
37	156	11	0.0157+j0.0456	1.0000
38	156	14	0.0176+j0.0511	1.0000
39	156	14	0.0176+j0.0511	1.0000
40	156	22	0.0000+j0.6753	1.0125
41	9	28	0.0000+j0.3655	1.0125
42	9	29	0.0000+j0.3655	1.0000
43	10	30	0.0000+j0.3655	1.0125
44	10	31	0.0000+j0.3655	1.0400
45	11	35	0.0012+j0.0054	1.0000
46	11	35	0.0012+j0.0054	1.0000
47	11	36	0.0086+j0.0249	1.0000
48	11	36	0.0086+j0.0249	1.0000
49	11	27	0.0000+j0.1885	1.0000
50	11	26	0.0000+j0.1847	1.0000
51	12	16	0.0000+j0.1847	1.0000
52	12	17	0.0000+j0.1847	1.0000
53	13	18	0.0000+j0.7309	1.0250
54	13	19	0.0000+j0.7309	0.9675
55	14	15	0.0335+j0.0990	1.0000
56	14	20	0.0000+j1.2329	1.0200
57	14	21	0.0000+j0.7475	1.0000
58	15	24	0.0000+j0.1830	1.0200
59	15	23	0.0000+j0.1830	1.0000
60	24	25	0.0000+j0.0000	1.0000

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
61	32	33	0.0000+j0.1830	1.0000
62	32	34	0.0000+j0.0001	1.0000
63	35	48	0.0000+j2.3925	0.9750
64	35	51	0.0000+j0.1958	1.0283
65	35	52	0.0000+j0.1960	1.0139
66	36	53	0.0002+j0.0010	1.0000
67	36	53	0.0002+j0.0010	1.0000
68	36	37	0.0000+j0.1847	1.0000
69	36	38	0.0000+j0.1847	1.0000
70	39	40	0.0028+j0.0128	1.0000
71	39	40	0.0028+j0.0128	1.0000
72	39	43	0.0012+j0.0054	1.0000
73	39	158	0.0042+j0.0194	1.0000
74	39	158	0.0042+j0.0194	1.0000
75	39	158	0.0079+j0.0234	1.0000
76	39	161	0.0135+j0.0404	1.0000
77	39	161	0.0135+j0.0404	1.0000
78	39	44	0.0000+j0.0001	1.0000
79	39	45	0.0086+j0.0258	1.0000
80	40	41	0.0000+j0.1830	1.0000
81	40	42	0.0000+j0.1830	1.0000
82	45	46	0.0000+j0.7309	1.0000
83	45	47	0.0000+j0.7309	1.0000
84	48	49	0.0521+j0.0802	1.0000

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
85	49	50	0.0000+j0.9017	1.0375
86	157	53	0.0021+j0.0118	1.0000
87	158	54	0.0000+j0.1830	1.0000
88	158	55	0.0000+j0.1830	1.0000
89	158	57	0.0105+j0.0309	1.0000
90	169	60	0.0001+j0.0008	1.0000
91	169	60	0.0001+j0.0008	1.0000
92	56	160	0.0000+j0.0000	1.0000
93	159	61	0.0000+j0.0091	1.0370
94	57	58	0.0000+j0.1830	1.0250
95	57	59	0.0000+j0.1830	1.0000
96	60	161	0.0000+j0.0450	1.0750
97	60	161	0.0000+j0.0447	1.0750
98	60	161	0.0000+j0.0400	1.0750
99	60	160	0.0008+j0.0089	1.0000
100	60	160	0.0008+j0.0089	1.0000
101	160	61	0.0000+j0.0091	1.0370
102	61	89	0.0003+j0.0056	1.0000
103	161	62	0.0000+j0.2878	1.0000
104	161	63	0.0003+j0.0018	1.0000
105	63	64	0.0000+j0.1830	1.0000
106	63	65	0.0000+j0.1830	1.0000
107	63	66	0.0000+j0.1830	1.0000
108	67	110	0.0004+j0.0046	1.0000

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
109	67	110	0.0004+j0.0046	1.0000
110	67	166	0.0047+j0.0356	1.0000
111	67	166	0.0047+j0.0358	1.0000
112	67	166	0.0047+j0.0358	1.0000
113	67	90	0.0022+j0.0168	1.0000
114	67	162	0.0000+j0.0775	1.0125
115	67	162	0.0000+j0.0775	1.0125
116	67	162	0.0000+j0.0775	1.0125
117	67	88	0.0001+j0.0021	1.0000
118	67	88	0.0001+j0.0021	1.0000
119	68	163	0.0004+j0.0045	1.0000
120	68	163	0.0004+j0.0045	1.0000
121	68	142	0.0008+j0.0782	0.9625
122	68	142	0.0008+j0.0782	0.9625
123	68	142	0.0008+j0.0782	0.9625
124	68	142	0.0008+j0.0782	0.9625
125	69	151	0.0000+j0.0001	1.0000
126	69	75	0.0003+j0.0044	1.0106
127	162	70	0.0000+j0.2882	1.0100
128	162	71	0.0000+j0.2855	1.0000
129	162	72	0.0135+j0.0399	1.0000
130	162	80	0.009+j0.0266	1.0000
131	162	84	0.0032+j0.0093	1.0000
132	72	73	0.0000+j0.2867	1.0000

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
133	72	74	0.0000+j0.2867	1.0000
134	72	76	0.0052+j0.0153	1.0000
135	163	164	0.0008+j0.0055	0.9844
136	163	164	0.0008+j0.0055	0.9844
137	163	88	0.0001+j0.0012	1.0000
138	163	88	0.0001+j0.0012	1.0000
139	164	89	0.0000+j0.0007	1.0000
140	164	89	0.0000+j0.0007	1.0000
141	75	89	0.0003+j0.0069	1.0000
142	76	83	0.0006+j0.0043	1.0000
143	76	83	0.0006+j0.0043	1.0000
144	76	77	0.0000+j0.7296	1.0000
145	76	78	0.0000+j0.1847	1.0000
146	76	79	0.0000+j0.7296	1.0000
147	80	81	0.0000+j0.1847	1.0200
148	80	82	0.0000+j0.1847	1.0100
149	83	165	0.0131+j0.0387	1.0000
150	83	90	0.0000+j0.0775	0.9875
151	165	91	0.0126+j0.0371	1.0000
152	84	85	0.0000+j0.7476	1.0000
153	84	87	0.0000+j0.1847	1.0100
154	84	86	0.0000+j0.7476	1.0000
155	84	99	0.0127+j0.0386	1.0000
156	88	93	0.0000+j0.0492	0.9750

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
157	88	93	0.0000+j0.0492	0.9750
158	88	93	0.0000+j0.0492	0.9750
159	88	96	0.0001+j0.0008	1.0000
160	88	96	0.0001+j0.0008	1.0000
161	88	101	0.0053+j0.0401	1.0000
162	88	101	0.0053+j0.0401	1.0000
163	90	166	0.0025+j0.0187	1.0000
164	91	92	0.0000+j0.5846	1.0000
165	91	166	0.0035+j0.2992	1.0500
166	93	94	0.0000+j0.1847	1.0200
167	93	95	0.0000+j0.7476	1.0100
168	93	107	0.0010+j0.0044	1.0000
169	93	107	0.0010+j0.0044	1.0000
170	93	104	0.0024+j0.0162	1.0000
171	93	104	0.0024+j0.0162	1.0000
172	166	167	0.0036+j0.0272	1.0000
173	166	167	0.0036+j0.0272	1.0000
174	167	97	0.0052+j0.6212	1.0000
175	97	98	0.0000+j0.7085	0.9900
176	99	100	0.0000+j2.9824	1.0000
177	99	107	0.0023+j0.0070	1.0000
178	101	102	0.0008+j0.0782	0.9880
179	101	102	0.0008+j0.0782	0.9880
180	101	137	0.0042+j0.0322	1.0000

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
181	101	137	0.0042+j0.0322	1.0000
182	102	120	0.0118+j0.0349	1.0000
183	102	103	0.0000+j0.1847	1.0000
184	102	124	0.0105+j0.0310	1.0000
185	104	105	0.0000+j0.1847	1.0200
186	104	106	0.0000+j0.1847	1.0200
187	104	120	0.0132+j0.0400	1.0000
188	107	108	0.0000+j0.1847	1.0200
189	107	109	0.0000+j0.7476	1.0000
190	107	116	0.0160+j0.0491	1.0000
191	110	111	0.0000+j0.0514	0.9875
192	110	111	0.0000+j0.0514	0.9875
193	110	111	0.0000+j0.0514	0.9875
194	111	112	0.0000+j0.7202	1.0000
195	111	113	0.0000+j0.7202	1.0000
196	111	114	0.0000+j0.1847	1.0000
197	111	115	0.0000+j0.1847	1.0000
198	111	127	0.0001+j0.0011	1.0000
199	111	127	0.0001+j0.0011	1.0000
200	116	117	0.0000+j0.7290	1.0200
201	116	118	0.0000+j0.7290	1.0200
202	116	119	0.0000+j0.1847	1.0100
203	116	142	0.0047+j0.0144	1.0000
204	120	121	0.0000+j0.1847	1.0100

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
205	120	122	0.0000+j0.1847	1.0200
206	120	168	0.0293+j0.0634	1.0000
207	168	123	0.0000+j2.9824	1.0500
208	124	125	0.0000+j0.2061	1.0000
209	124	126	0.0000+j0.2061	1.0300
210	124	134	0.0257+j0.0760	1.0000
211	127	128	0.0000+j0.1847	1.0400
212	127	129	0.0000+j0.1847	1.0000
213	127	138	0.0004+j0.0025	1.0000
214	127	138	0.0004+j0.0025	1.0000
215	130	131	0.0000+j0.1847	1.0300
216	130	132	0.0000+j0.1847	1.0300
217	130	133	0.0000+j0.1847	1.0100
218	130	138	0.0007+j0.0048	1.0000
219	130	152	0.0003+j0.0022	1.0000
220	134	135	0.0000+j0.2867	1.0000
221	134	136	0.0000+j0.2866	1.0000
222	134	137	0.0035+j0.3075	1.0000
223	134	137	0.0035+j0.3075	1.0000
224	134	148	0.0240+j0.0699	1.0000
225	134	148	0.0240+j0.0699	1.0000
226	137	151	0.0026+j0.0196	1.0000
227	137	151	0.0026+j0.0196	1.0000
228	138	143	0.0008+j0.0782	0.9250

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	แท็ปหม้อแปลง (p.u)
229	138	143	0.0008+j0.0782	0.9250
230	138	143	0.0008+j0.0782	0.9250
231	138	143	0.0008+j0.0782	0.9250
232	138	139	0.0000+j0.1847	1.0200
233	138	140	0.0000+j0.1847	1.0200
234	138	141	0.0000+j0.1847	1.0250
235	138	152	0.0005+j0.0033	1.0000
236	142	144	0.0006+j0.0038	1.0000
237	142	144	0.0006+j0.0038	1.0000
238	144	145	0.0000+j0.1847	1.0000
239	144	146	0.0000+j0.1847	1.0200
240	144	147	0.0000+j0.1847	1.0000
241	148	149	0.0000+j0.7290	1.0000
242	148	150	0.0000+j0.7290	1.0000
243	148	151	0.0008+j0.0782	1.0250
244	148	151	0.0008+j0.0782	1.0250
245	152	153	0.0000+j0.1847	1.0100
246	152	154	0.0000+j0.1847	0.9900
247	152	155	0.0000+j0.1847	1.0200

ตารางที่ ข.27 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบ 169 บัสโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ

GEN.	Bus NO.	a_i	b_i	c_i	P_{min}	P_{max}
					(MW)	(MW)
1	156	55.0000	1.2000	0.0187	20.0000	530.0000
2	157	35.0000	2.1750	0.0275	50.0000	520.0000
3	158	30.0000	2.1250	0.0500	30.0000	310.0000
4	159	44.0000	3.1450	0.0125	50.0000	380.0000
5	160	60.0000	3.1250	0.0125	100.0000	1500.0000
6	161	54.0000	2.1950	0.0276	10.0000	320.0000
7	162	45.0000	2.2200	0.0220	50.0000	400.0000
8	163	36.0000	2.1250	0.0318	60.0000	280.0000
9	164	90.0000	2.1300	0.0125	50.0000	350.0000
10	165	83.0000	2.2300	0.0365	80.0000	500.0000
11	166	44.0000	3.1430	0.0156	70.0000	450.0000
12	167	35.0000	2.1750	0.0175	90.0000	410.0000
13	168	66.0000	3.1550	0.0225	20.0000	360.0000
14	169	80.0000	2.2250	0.0417	100.0000	1500.0000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
P_{156} (MW)	20.0000	530.0000
P_{157} (MW)	50.0000	520.0000
P_{158} (MW)	30.0000	310.0000
P_{159} (MW)	50.0000	380.0000
P_{160} (MW)	100.0000	1500.0000
P_{161} (MW)	10.0000	320.0000
P_{162} (MW)	50.0000	400.0000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
P_{163} (MW)	60.0000	280.0000
P_{164} (MW)	50.0000	350.0000
P_{165} (MW)	80.0000	500.0000
P_{166} (MW)	70.0000	450.0000
P_{167} (MW)	90.0000	410.0000
P_{168} (MW)	20.0000	360.0000
P_{169} (MW)	100.0000	1500.0000
Q_{156} (MVar)	-5.0000	100.0000
Q_{157} (MVar)	-50.0000	160.0000
Q_{158} (MVar)	-13.0000	120.0000
Q_{159} (MVar)	-147.0000	220.0000
Q_{160} (MVar)	-35.0000	130.0000
Q_{161} (MVar)	-10.0000	200.0000
Q_{162} (MVar)	-16.0000	250.0000
Q_{163} (MVar)	-8.0000	240.0000
Q_{164} (MVar)	-300.0000	300.0000
Q_{165} (MVar)	-47.0000	140.0000
Q_{166} (MVar)	-10.0000	200.0000
Q_{167} (MVar)	-20.0000	180.0000
Q_{168} (MVar)	-300.0000	150.0000
Q_{169} (MVar)	-50.0000	150.0000
$V_1 - V_{169}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$\delta_1 - \delta_{169}$ (degree)	-30.0000	30.0000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
Q_{C2} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C3} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C6} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C10} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C14} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C15} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C16} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C17} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C22} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C23} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C24} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C26} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C27} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C28} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C29} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C30} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C31} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C32} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C33} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C37} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C38} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C41} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C42} (MVar)	-200.0000	200.0000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
Q_{C46} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C47} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C51} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C52} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C58} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C59} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C60} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C63} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C65} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C66} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C77} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C78} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C79} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C81} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C82} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C84} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C85} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C86} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C93} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C102} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C105} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C106} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C109} (MVar)	-200.0000	200.0000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
Q_{C111} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C112} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C113} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C114} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C117} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C118} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C121} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C125} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C127} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C139} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C141} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C144} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C145} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C147} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C153} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C154} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C158} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C161} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C162} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C111} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C112} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C113} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C114} (MVar)	-200.0000	200.0000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
Q_{C117} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C118} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C121} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C125} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C127} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C139} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C141} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C144} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C145} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C147} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C153} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C154} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C158} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C161} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C162} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C117} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C118} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C121} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C125} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C127} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C139} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C141} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C144} (MVar)	-200.0000	200.0000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
Q_{C145} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C147} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C153} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C154} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C158} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C161} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C162} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C145} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C147} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C153} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C154} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C158} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C161} (MVar)	-200.0000	200.0000
Q_{C162} (MVar)	-200.0000	200.0000
T_{1-7} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{1-7} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{2-39} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{2-39} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{2-39} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{2-39} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{2-39} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{3-8} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{3-8} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{3-8} (p.u.)	0.9000	1.1000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
T_{3-4} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{3-4} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{5-53} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{5-53} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{5-53} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{5-53} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{5-53} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{6-156} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{6-156} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{22-156} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{9-28} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{9-29} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{10-30} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{10-31} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{11-27} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{11-26} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{12-16} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{12-17} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{13-18} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{13-19} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{14-20} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{14-21} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{15-24} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{15-23} (p.u.)	0.9000	1.1000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
T_{32-33} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{35-48} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{35-51} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{35-52} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{36-37} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{36-38} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{40-41} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{40-42} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{45-46} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{45-47} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{49-50} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{54-158} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{55-158} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{61-159} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{57-58} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{57-59} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{60-161} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{60-161} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{60-161} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{61-160} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{62-161} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{63-64} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{63-65} (p.u.)	0.9000	1.1000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
T_{63-66} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{67-162} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{67-162} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{67-162} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{68-142} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{68-142} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{68-142} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{68-142} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{69-75} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{70-162} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{71-162} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{72-73} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{72-74} (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{163-164}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{163-164}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{76-77} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{76-78} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{76-79} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{80-81} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{80-82} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{83-90} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{84-85} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{84-87} (p.u.)	0.9000	1.1000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
T_{84-86} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{88-93} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{88-93} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{88-93} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{91-92} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{91-166} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{93-94} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{93-95} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{97-167} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{97-98} (p.u.)	0.9000	1.1000
T_{99-100} (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{101-102}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{101-102}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{102-103}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{104-105}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{104-106}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{107-108}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{107-109}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{110-111}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{110-111}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{110-111}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{111-112}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{111-113}$ (p.u.)	0.9000	1.1000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
$T_{111-114}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{111-115}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{116-117}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{116-118}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{116-119}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{120-121}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{120-122}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{123-168}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{124-125}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{124-126}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{127-128}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{127-129}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{130-131}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{130-132}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{130-133}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{134-135}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{134-136}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{134-137}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{134-137}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{138-143}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{138-143}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{138-143}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{138-143}$ (p.u.)	0.9000	1.1000

ตารางที่ ข.28 ตัวแปรที่ทำการควบคุมของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

ตัวแปรที่ควบคุม	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด
$T_{138-139}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{138-140}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{138-141}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{144-145}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{144-146}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{144-147}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{148-149}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{148-150}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{148-151}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{148-151}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{152-153}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{152-154}$ (p.u.)	0.9000	1.1000
$T_{152-155}$ (p.u.)	0.9000	1.1000

ข.7 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ (9 บัส นครราชสีมา 2)

ตารางที่ ข.29 ข้อมูลบัสของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2

บัส	แรงดันบัส (p.u.)	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอกทีฟ (MVar)	ชนิดบัส
1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ
2	1.0000	0.0000	0.0000	9.0000	4.0000	PQ
3	1.0000	0.0000	0.0000	56.0000	24.0000	PQ
4	1.0000	0.0000	0.0000	5.0000	3.0000	PQ
5	1.0000	0.0000	0.0000	20.0000	13.0000	PQ

ตารางที่ ข.29 ข้อมูลบัสของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (ต่อ)

บัส	แรงดันบัส (p.u.)	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอกทีฟ (MVar)	ชนิดบัส
6	1.0000	0.0000	0.0000	27.0000	20.0000	PQ
7	1.0000	0.0000	0.0000	9.0000	3.0000	PQ
8	1.0000	0.0000	0.0000	12.0000	9.0000	PQ
9	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	Slack bus

ตารางที่ ข.30 ข้อมูลสายส่งของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2

No.	จากบัส	ถึงบัส	อิมพีแดนซ์ (p.u.)	เทปหุ้มฉนวน (p.u.)
1	9	2	0.0026+j0.01619	1.0000
2	9	1	0.00185+j0.01154	1.0000
3	2	3	0.00488+j0.03036	1.0000
4	3	4	0.00049+j0.00238	1.0000
5	3	5	0.0104+j0.06477	1.0000
6	1	7	0.00075+j0.00466	1.0000
7	7	8	0.00143+j0.00891	1.0000
8	1	5	0.01105+j0.06882	1.0000
9	5	6	0.0156+j0.09715	1.0000



ภาคผนวก ค

ผลการจำลอง

ผลการจำลองของวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยระบบทดสอบ 7 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส ระบบทดสอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยของภาคกลางตอนบนและภาคกลางด้านตะวันตกรวม 169 บัส และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ (นครราชสีมา 2) ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างแสดงผลการทดสอบของระบบดังนี้

ค.1 ผลการจำลองของการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

ค.1.1 ระบบทดสอบ 6 บัส

- ผลการจำลองโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสองแบบราบเรียบ

ตารางที่ ค.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ของระบบ 6 บัส

ระบบทดสอบ	Population size	Crossover Fraction	Migration Interval	Migration Fraction
6 บัส	30.0000	0.8000	20.0000	0.3000

ตารางที่ ค.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีการค้นหาความบรรสาน (HS) ของระบบ 6 บัส

ระบบทดสอบ	HMS	HMCR	PAR
6 บัส	10.0000	1.0000	0.4000

ตารางที่ ค.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ของระบบ 6 บัส

ระบบทดสอบ	Population	Maxcount	Vmax
6 บัส	200.0000	50.0000	20.0000

ตารางที่ ค.4 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 6 บัส

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
P_1 (MW)	112.7662	103.4791	96.7578	110.5618
P_2 (MW)	32.2965	45.4499	51.7388	39.0203

ตารางที่ ค.4 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 6 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
V_1 (p.u.)	0.9659	1.0217	1.0065	0.9976
V_2 (p.u.)	0.9633	1.0008	0.9977	0.9847
δ_1 (degree)	0.0425	2.6873	-1.1728	-0.4056
δ_2 (degree)	2.4144	-0.3717	1.4716	1.3600
T_{3-4} (p.u.)	0.9835	0.9919	1.0016	0.9871
T_{5-6} (p.u.)	0.9911	1.0002	0.9987	1.0055
Q_{C4} (MVar)	90.6924	103.6948	87.5730	95.3986
Q_{C6} (MVar)	30.9345	26.1831	27.4463	34.6928

ค.1.2 ระบบทดสอบ 169 บัส (กฟผ.)

ตารางที่ ค.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ของระบบ 169 บัส

ระบบทดสอบ	Population size	Crossover Fraction	Migration Interval	Migration Fraction
169 บัส	100.0000	0.9000	20.0000	0.3000

ตารางที่ ค.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีการค้นหาความบรรสาน (HS) ของระบบ 169 บัส

ระบบทดสอบ	HMS	HMCR	PAR
169 บัส	10.0000	1.0000	0.4000

ตารางที่ ค.7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ของระบบ 169 บัส

ระบบทดสอบ	Population	Maxcount	Vmax
169 บัส	200.0000	100.0000	30.0000

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
P_{156} (MW)	438.1381	339.4900	498.1333	524.5367
P_{157} (MW)	403.8612	349.9567	427.8000	513.9233
P_{158} (MW)	211.0620	210.0300	297.1333	306.0767
P_{159} (MW)	272.3348	281.2100	349.1667	376.5033
P_{160} (MW)	1343.3459	1310.0967	1485.0000	1481.3333
P_{161} (MW)	262.3314	210.2833	317.6667	314.6200
P_{162} (MW)	341.3003	262.3567	361.7000	395.4133
P_{163} (MW)	212.0046	164.5800	247.5333	277.0700
P_{164} (MW)	305.1339	240.4633	347.7333	346.9500
P_{165} (MW)	351.8727	337.4600	484.8333	492.2800
P_{166} (MW)	361.2347	322.2567	423.7000	446.3067
P_{167} (MW)	317.6317	284.7984	398.0333	406.8500
P_{168} (MW)	312.6889	220.2940	355.8000	355.2633
P_{169} (MW)	1228.3308	943.9765	1484.3667	1436.1200
V_{156} (p.u.)	1.0250	1.0007	1.0119	0.9588
V_{157} (p.u.)	1.0123	0.9931	1.0097	0.9818
V_{158} (p.u.)	0.9699	1.0052	1.0128	0.9854
V_{159} (p.u.)	0.9902	1.0050	0.9982	0.9735
V_{160} (p.u.)	0.9817	0.9943	0.9962	0.9759
V_{161} (p.u.)	0.9713	0.9922	1.0122	0.9547
V_{162} (p.u.)	0.9843	0.9992	0.9921	0.9547

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
V_{163} (p.u.)	0.9664	1.0032	1.0130	0.9805
V_{164} (p.u.)	0.9614	1.0048	0.9811	0.9723
V_{165} (p.u.)	1.0131	1.0164	1.0133	0.9753
V_{166} (p.u.)	0.9494	1.0127	0.9919	0.9802
V_{167} (p.u.)	0.9579	1.0133	0.9902	0.9800
V_{168} (p.u.)	1.0176	0.9933	1.0021	0.9520
V_{169} (p.u.)	0.9832	0.9935	0.9886	0.9852
δ_{156} (degree)	1.3917	0.3182	-1.0376	0.5632
δ_{157} (degree)	-4.7576	0.0710	-1.9772	-0.9397
δ_{158} (degree)	0.9340	0.2837	-5.0929	0.2647
δ_{159} (degree)	10.5893	0.0204	-5.6973	2.8731
δ_{160} (degree)	4.1084	0.3629	0.3722	2.8540
δ_{161} (degree)	1.9343	0.2980	-3.0508	2.1789
δ_{162} (degree)	-11.5713	-0.3020	0.7044	0.7855
δ_{163} (degree)	5.9077	-0.2992	2.0295	0.5953
δ_{164} (degree)	9.9759	-0.2842	2.9068	1.9268
δ_{165} (degree)	-11.5053	0.0021	-0.3208	-0.2144
δ_{166} (degree)	12.1018	-0.3152	1.6975	1.4792
δ_{167} (degree)	-4.9909	-0.3144	-2.2912	1.5488
δ_{168} (degree)	3.1688	-1.1753	4.7002	1.9379
δ_{169} (degree)	-4.3020	0.4105	0.0443	2.3572

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
T_{1-7} (p.u.)	1.0951	0.9924	1.0159	0.9730
T_{1-7} (p.u.)	1.0721	0.9966	0.9965	0.9642
T_{2-39} (p.u.)	0.9885	1.0047	1.0020	0.9722
T_{2-39} (p.u.)	0.9480	0.9843	1.0113	0.9818
T_{2-39} (p.u.)	0.9701	1.0121	0.9985	0.9694
T_{2-39} (p.u.)	0.9816	1.0082	1.0078	0.9699
T_{3-8} (p.u.)	0.9627	1.0074	1.0028	0.9923
T_{3-8} (p.u.)	0.9977	0.9871	1.0086	0.9752
T_{3-8} (p.u.)	0.9986	1.0039	0.9777	0.9837
T_{3-4} (p.u.)	1.0222	0.9806	0.9842	0.9837
T_{3-4} (p.u.)	1.0273	1.0152	0.9843	0.9857
T_{5-53} (p.u.)	1.0253	1.0010	0.9983	0.9789
T_{5-53} (p.u.)	0.9991	1.0106	1.0219	0.9683
T_{5-53} (p.u.)	1.0133	1.0140	1.0175	0.9799
T_{5-53} (p.u.)	1.0032	1.0097	0.9750	0.9729
T_{6-156} (p.u.)	1.0621	1.0168	0.9932	0.9727
T_{6-156} (p.u.)	1.0436	0.9890	0.9822	0.9694
T_{22-156} (p.u.)	1.0489	0.9998	0.9876	0.9924
T_{9-28} (p.u.)	1.0484	1.0137	0.9986	0.9658
T_{9-29} (p.u.)	1.0759	0.9914	0.9687	0.9897
T_{10-30} (p.u.)	1.0569	1.0043	0.9886	0.9719

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
T_{10-31} (p.u.)	1.0039	0.9956	0.9922	0.9661
T_{11-27} (p.u.)	1.0249	1.0033	0.9818	0.9658
T_{11-26} (p.u.)	1.0518	0.9910	1.0200	1.0022
T_{12-16} (p.u.)	1.0342	0.9849	1.0190	0.9690
T_{12-17} (p.u.)	1.0565	0.9832	0.9926	0.9990
T_{13-18} (p.u.)	1.0130	1.0050	0.9794	0.9928
T_{13-19} (p.u.)	1.0376	0.9873	1.0139	0.9850
T_{14-20} (p.u.)	1.0353	1.0101	1.0058	0.9773
T_{14-21} (p.u.)	1.0537	0.9781	1.0073	0.9910
T_{15-24} (p.u.)	0.9496	1.0021	1.0194	1.0259
T_{15-23} (p.u.)	1.0520	0.9933	1.0176	0.9920
T_{32-33} (p.u.)	0.9752	0.9978	1.0299	0.9631
T_{35-48} (p.u.)	1.0178	1.0204	1.0022	0.9723
T_{35-51} (p.u.)	1.0352	1.0095	1.0334	0.9582
T_{35-52} (p.u.)	1.0585	0.9926	0.9937	1.0042
T_{36-37} (p.u.)	1.0465	0.9774	1.0000	0.9745
T_{36-38} (p.u.)	1.0375	0.9978	0.9988	0.9719
T_{40-41} (p.u.)	1.0278	0.9896	1.0072	0.9717
T_{40-42} (p.u.)	1.0377	0.9973	1.0009	0.9551
T_{45-46} (p.u.)	1.0290	0.9837	1.0303	0.9687
T_{45-47} (p.u.)	0.9990	0.9950	1.0077	0.9739

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
T_{49-50} (p.u.)	1.0041	0.9965	0.9968	0.9873
T_{54-158} (p.u.)	1.0525	1.0027	1.0070	0.9720
T_{55-158} (p.u.)	1.0625	1.0002	0.9976	0.9462
T_{61-159} (p.u.)	1.0339	0.9814	1.0011	1.0096
T_{57-58} (p.u.)	1.0305	1.0108	0.9977	0.9664
T_{57-59} (p.u.)	1.0239	0.9824	0.9807	0.9779
T_{60-161} (p.u.)	1.0389	1.0012	0.9973	0.9582
T_{60-161} (p.u.)	1.0029	0.9774	0.9953	0.9485
T_{60-161} (p.u.)	1.0310	1.0186	0.9849	0.9558
T_{61-160} (p.u.)	1.0516	1.0072	0.9979	0.9736
T_{62-161} (p.u.)	1.0229	1.0003	0.9943	0.9758
T_{63-64} (p.u.)	1.0257	1.0120	1.0104	0.9590
T_{63-65} (p.u.)	1.0380	0.9967	0.9822	0.9687
T_{63-66} (p.u.)	1.0469	1.0061	1.0107	0.9831
T_{67-162} (p.u.)	1.0433	1.0082	0.9916	0.9739
T_{67-162} (p.u.)	1.0424	0.9839	0.9936	0.9754
T_{67-162} (p.u.)	1.0560	0.9833	0.9941	0.9752
T_{68-142} (p.u.)	1.0184	0.9836	1.0016	0.9576
T_{68-142} (p.u.)	1.0541	0.9852	1.0099	0.9587
T_{68-142} (p.u.)	1.0258	0.9887	0.9804	0.9578
T_{68-142} (p.u.)	1.0257	1.0120	1.0104	0.9590

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
T_{69-75} (p.u.)	0.9656	1.0013	1.0128	0.9798
T_{70-162} (p.u.)	1.0177	1.0115	1.0080	0.9887
T_{71-162} (p.u.)	1.0515	1.0223	1.0230	0.9766
T_{72-73} (p.u.)	1.0258	0.9759	0.9864	0.9826
T_{72-74} (p.u.)	1.0421	1.0101	0.9867	1.0081
$T_{163-164}$ (p.u.)	0.9592	1.0019	1.0210	0.9832
$T_{163-164}$ (p.u.)	0.9859	0.9997	0.9885	0.9849
T_{76-77} (p.u.)	1.0633	0.9940	1.0035	0.9736
T_{76-78} (p.u.)	1.0273	0.9966	0.9931	0.9688
T_{76-79} (p.u.)	1.0288	0.9945	0.9869	1.0030
T_{80-81} (p.u.)	1.0334	0.9881	1.0021	0.9845
T_{80-82} (p.u.)	1.0595	0.9955	0.9879	0.9770
T_{83-90} (p.u.)	1.0005	0.9877	1.0067	0.9986
T_{84-85} (p.u.)	1.0338	1.0130	0.9926	0.9837
T_{84-87} (p.u.)	1.0562	0.9885	0.9947	1.0017
T_{84-86} (p.u.)	1.0544	1.0115	1.0033	1.0004
T_{88-93} (p.u.)	1.0038	0.9961	0.9914	0.9679
T_{88-93} (p.u.)	1.0311	1.0136	0.9939	0.9754
T_{88-93} (p.u.)	1.0206	0.9768	0.9931	0.9719
T_{88-93} (p.u.)	0.9884	1.0001	1.0133	0.9787
T_{91-92} (p.u.)	0.9656	1.0013	1.0128	0.9798

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
T_{91-166} (p.u.)	0.9511	1.0144	1.0081	0.9924
T_{93-94} (p.u.)	1.0340	1.0041	1.0137	0.9761
T_{93-95} (p.u.)	1.0430	0.9800	1.0105	0.9595
T_{97-167} (p.u.)	1.0005	0.9900	0.9657	0.9618
T_{97-98} (p.u.)	1.0193	0.9950	0.9787	0.9912
T_{99-100} (p.u.)	1.0162	0.9901	0.9813	0.9741
$T_{101-102}$ (p.u.)	1.0277	1.0161	1.0230	0.9575
$T_{101-102}$ (p.u.)	1.0009	0.9982	0.9940	0.9515
$T_{102-103}$ (p.u.)	1.0448	0.9721	0.9903	0.9911
$T_{104-105}$ (p.u.)	1.0653	0.9977	1.0043	0.9863
$T_{104-106}$ (p.u.)	1.0759	0.9959	1.0155	0.9830
$T_{107-108}$ (p.u.)	1.0516	0.9999	1.0330	0.9975
$T_{107-109}$ (p.u.)	1.0008	0.9932	1.0176	0.9576
$T_{110-111}$ (p.u.)	0.9981	0.9814	0.9847	0.9801
$T_{110-111}$ (p.u.)	1.0137	1.0090	0.9916	0.9709
$T_{110-111}$ (p.u.)	1.0108	1.0014	0.9815	0.9760
$T_{111-112}$ (p.u.)	1.0289	0.9940	1.0116	0.9630
$T_{111-113}$ (p.u.)	1.0293	1.0026	1.0147	0.9817
$T_{111-114}$ (p.u.)	1.0494	0.9991	0.9911	0.9759
$T_{111-115}$ (p.u.)	1.0405	0.9920	0.9992	0.9832
$T_{116-117}$ (p.u.)	1.0283	1.0231	0.9871	0.9963

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
$T_{116-118}$ (p.u.)	1.0193	0.9692	1.0113	0.9859
$T_{116-119}$ (p.u.)	1.0511	1.0062	0.9868	0.9750
$T_{120-121}$ (p.u.)	1.0320	0.9969	0.9939	0.9894
$T_{120-122}$ (p.u.)	1.0520	0.9722	1.0034	0.9981
$T_{123-168}$ (p.u.)	1.0365	0.9939	1.0096	1.0054
$T_{124-125}$ (p.u.)	1.0399	1.0005	1.0220	0.9953
$T_{124-126}$ (p.u.)	1.0208	0.9994	0.9783	0.9867
$T_{127-128}$ (p.u.)	1.0397	1.0264	0.9910	1.0041
$T_{127-129}$ (p.u.)	1.0285	0.9973	1.0064	0.9953
$T_{130-131}$ (p.u.)	1.0529	0.9933	1.0006	0.9957
$T_{130-132}$ (p.u.)	1.0596	0.9969	1.0147	0.9748
$T_{130-133}$ (p.u.)	1.0659	1.0069	1.0007	0.9848
$T_{134-135}$ (p.u.)	1.0465	0.9933	0.9915	0.9794
$T_{134-136}$ (p.u.)	0.9625	1.0122	1.0074	1.0064
$T_{134-137}$ (p.u.)	1.0461	1.0170	1.0092	0.9974
$T_{134-137}$ (p.u.)	0.9537	1.0131	0.9899	1.0236
$T_{138-143}$ (p.u.)	1.0183	0.9918	0.9771	0.9835
$T_{138-143}$ (p.u.)	1.0139	0.9956	0.9747	0.9839
$T_{138-143}$ (p.u.)	1.0327	0.9881	1.0161	0.9828
$T_{138-143}$ (p.u.)	0.9739	1.0206	1.0108	0.9786
$T_{138-139}$ (p.u.)	1.0353	1.0125	1.0006	0.9832

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
$T_{138-140}$ (p.u.)	1.0509	1.0119	0.9964	0.9666
$T_{138-141}$ (p.u.)	1.0456	1.0085	1.0034	0.9803
$T_{144-145}$ (p.u.)	1.0314	0.9819	1.0228	0.9806
$T_{144-146}$ (p.u.)	1.0555	0.9820	1.0056	0.9898
$T_{144-147}$ (p.u.)	1.0292	0.9891	1.0138	0.9719
$T_{148-149}$ (p.u.)	1.0423	0.9995	1.0047	0.9837
$T_{148-150}$ (p.u.)	1.0606	1.0230	1.0157	0.9767
$T_{148-151}$ (p.u.)	0.9656	1.0119	1.0112	1.0236
$T_{148-151}$ (p.u.)	0.9574	0.9983	1.0112	1.0272
$T_{152-153}$ (p.u.)	1.0453	1.0184	0.9981	0.9587
$T_{152-154}$ (p.u.)	1.0388	0.9759	1.0158	0.9756
$T_{152-155}$ (p.u.)	1.0421	0.9906	1.0110	1.0020
Q_{C2} (MVar)	95.5785	-36.9464	-8.8439	154.6969
Q_{C3} (MVar)	104.7062	-3.4912	59.5091	163.8952
Q_{C6} (MVar)	27.2698	3.0761	-131.2950	149.1124
Q_{C10} (MVar)	-6.1507	29.9309	-7.9193	176.5320
Q_{C14} (MVar)	-36.8875	34.4922	45.2812	152.8649
Q_{C15} (MVar)	-14.9650	19.3561	15.6224	163.7691
Q_{C16} (MVar)	-19.1825	28.3865	51.9201	152.4662
Q_{C17} (MVar)	140.9384	6.4462	-11.1818	163.5119
Q_{C22} (MVar)	-70.4242	15.8458	32.6089	165.4798

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
Q_{C23} (MVar)	15.2073	-12.1109	-43.6381	157.7617
Q_{C24} (MVar)	96.5145	7.0902	29.9371	176.7519
Q_{C26} (MVar)	19.5913	13.3793	35.2109	161.8628
Q_{C27} (MVar)	-36.6934	7.4061	75.6838	161.7660
Q_{C28} (MVar)	-39.7011	27.7951	-68.1232	153.1400
Q_{C29} (MVar)	-6.9579	1.8624	34.7467	167.4168
Q_{C30} (MVar)	-42.1050	-20.4352	23.4954	165.9475
Q_{C31} (MVar)	-115.6257	36.1818	13.4951	161.5353
Q_{C32} (MVar)	49.4554	27.4751	23.1828	160.9298
Q_{C33} (MVar)	50.1208	46.4169	16.7673	166.9428
Q_{C37} (MVar)	61.3801	-9.8355	-48.6945	160.3651
Q_{C38} (MVar)	85.7005	24.7468	107.4334	166.4751
Q_{C41} (MVar)	53.6546	10.3520	-75.5149	169.0942
Q_{C42} (MVar)	-6.5185	14.7635	-34.9165	155.0159
Q_{C46} (MVar)	-22.4271	20.0958	1.9920	169.3038
Q_{C47} (MVar)	23.8992	18.5914	15.6490	164.7179
Q_{C51} (MVar)	2.6146	40.7375	-7.8591	151.4335
Q_{C52} (MVar)	52.9624	2.8570	13.0732	164.8522
Q_{C58} (MVar)	-45.9304	-41.3986	59.3334	170.4186
Q_{C59} (MVar)	-4.2877	6.0047	65.0604	159.9038
Q_{C60} (MVar)	52.4875	35.2470	1.4725	172.7457

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
Q_{C63} (MVar)	87.4659	-17.0888	30.7186	158.0380
Q_{C65} (MVar)	83.2619	-11.5348	-24.4017	153.0396
Q_{C66} (MVar)	6.9631	28.9888	-97.7735	158.8460
Q_{C77} (MVar)	17.6372	18.6774	15.5013	171.3130
Q_{C78} (MVar)	17.7487	26.6278	17.9427	172.6117
Q_{C79} (MVar)	11.1087	37.6415	-44.3358	155.3428
Q_{C81} (MVar)	18.4847	2.8410	34.0080	148.4937
Q_{C82} (MVar)	-19.9195	17.9560	77.4647	173.1158
Q_{C84} (MVar)	12.3430	27.5877	27.4053	146.7877
Q_{C85} (MVar)	-26.3936	-26.8960	11.2478	168.2540
Q_{C86} (MVar)	108.2000	14.5358	15.0279	148.0203
Q_{C93} (MVar)	-35.9810	17.1358	-44.1445	165.8123
Q_{C102} (MVar)	5.9939	5.0006	-15.2738	175.2213
Q_{C105} (MVar)	69.0354	45.8813	-105.6048	145.6747
Q_{C106} (MVar)	-46.8649	-16.3802	-41.4592	163.1334
Q_{C109} (MVar)	-20.3662	17.7274	-57.7452	140.1046
Q_{C111} (MVar)	-10.7250	55.0724	-22.1515	166.7794
Q_{C112} (MVar)	-34.0015	-10.4883	18.4216	153.6893
Q_{C113} (MVar)	-25.1120	9.3103	9.5570	167.4395
Q_{C114} (MVar)	94.5359	37.8977	110.5795	168.9985
Q_{C117} (MVar)	-28.7212	61.7531	-28.6403	165.7393

ตารางที่ ค.8 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 169 บัส (ต่อ)

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
Q_{C118} (MVar)	45.1027	18.8739	55.9062	146.8248
Q_{C121} (MVar)	-64.2481	20.8281	8.8401	181.6329
Q_{C125} (MVar)	70.3601	26.1503	22.8652	173.7812
Q_{C127} (MVar)	36.7664	71.6816	-9.4750	156.9641
Q_{C139} (MVar)	133.3316	-33.8256	33.9128	156.9694
Q_{C141} (MVar)	-43.7096	18.1731	42.9218	174.2452
Q_{C144} (MVar)	-67.6185	-12.7815	7.4618	164.6614
Q_{C145} (MVar)	65.9450	-38.9292	36.3206	157.4799
Q_{C147} (MVar)	-3.9555	13.8622	60.6473	159.9252
Q_{C153} (MVar)	-18.6569	26.4848	-35.5112	141.1387
Q_{C154} (MVar)	-34.0454	-6.5350	30.4233	156.6106
Q_{C158} (MVar)	-2.4083	21.5977	24.2292	171.4232
Q_{C161} (MVar)	-34.5699	28.3178	14.8848	153.7141
Q_{C162} (MVar)	103.7299	8.9822	62.8783	168.8510

- ผลการจำลองโดยใช้ฟังก์ชันที่มีจุดเปิดควาล์วหลายจุดแบบไม่ราบเรียบ

ตารางที่ ค.9 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ของระบบ 6 บัส

ระบบทดสอบ	Population size	Crossover Fraction	Migration Interval	Migration Fraction
6 บัส	30.0000	0.8000	20.0000	0.3000

ตารางที่ ค.10 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีการค้นหาความบรรสาน(HS) ของระบบ 6 บัส

ระบบทดสอบ	HMS	HMCR	PAR
6 บัส	10.0000	0.9000	0.4000

ตารางที่ ค.11 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ของระบบ 6 บัส

ระบบทดสอบ	Population	Maxcount	Vmax
6 บัส	200.0000	50.0000	10.0000

ตารางที่ ค.12 เปรียบเทียบค่าเหมาะที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 6 บัส

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
P_1 (MW)	107.3364	107.1286	99.4334	108.5401
P_2 (MW)	40.1797	41.7592	47.8529	43.4309
V_1 (p.u.)	0.9566	0.9924	1.0089	0.9823
V_2 (p.u.)	0.9762	0.9984	0.9970	0.9921
δ_1 (degree)	-1.6702	-0.6301	1.1976	-2.8825
δ_2 (degree)	3.6184	-0.8719	2.2897	-0.9127
T_{3-4} (p.u.)	1.0012	0.9986	0.9948	0.9896
T_{5-6} (p.u.)	0.9984	1.0105	0.9889	1.0184
Q_{C4} (Mvar)	69.4277	102.5441	87.5726	111.7185
Q_{C6} (Mvar)	33.3582	27.7562	17.8017	31.7448

ค.2 ผลการจำลองการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ค.2.1 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ (นครราชสีมา 2) 9 บัส

• กรณีที่ 1

ตารางที่ ค.13 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ของกรณีที่ 1

ระบบทดสอบ	Population size	Crossover Fraction	Migration Interval	Migration Fraction
Case 1	10.0000	0.8000	20.0000	0.2000

ตารางที่ ค.14 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีการค้นหาความบรรสาน (HS) ของกรณีที่ 1

ระบบทดสอบ	HMS	HMCR	PAR
Case 1	10.0000	0.9000	0.4000

ตารางที่ ค.15 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ของกรณีที่ 1

ระบบทดสอบ	Population	Maxcount	Vmax
Case 1	30.0000	150.0000	30.0000

ตารางที่ ค.16 ผลการจำลองก่อนการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ของกรณีที่ 1

Losses	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	Pref
1.0128	0.9978	0.9921	0.9791	0.9790	0.9752	0.9513	0.9984	1.0000	1.0000	139.0128

ตารางที่ ค.17 ผลการจำลองหลังการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ของกรณีที่ 1

ขั้นตอนวิธี	ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเบี่ยงเบน
					มาตรฐาน
BFGS	Losses (MW)	0.7955	0.8092	0.7942	0.0032
	V_1 (p.u.)	1.0009	1.0010	1.0004	0.0001
	V_2 (p.u.)	0.9975	0.9977	0.9966	0.0002

ตารางที่ ค.17 ผลการจำลองหลังการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ของกรณีที่ 1 (ต่อ)

ขั้นตอนวิธี	ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
BFGS	V_3 (p.u.)	0.9898	0.9906	0.9872	0.0007
	V_4 (p.u.)	0.9897	0.9905	0.9872	0.0007
	V_5 (p.u.)	0.9970	0.9989	0.9909	0.0016
	V_6 (p.u.)	0.9932	0.9978	0.9856	0.0020
	V_7 (p.u.)	1.0004	1.0005	1.0001	0.0001
	V_8 (p.u.)	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
	V_9 (p.u.)	1.0025	1.0025	1.0025	0.0000
	Pref (MW)	138.7955	138.8092	138.7942	0.0032
HS	Losses (MW)	0.7942	0.7942	0.7942	0.0000
	V_1 (p.u.)	1.0009	1.0009	1.0009	0.0000
	V_2 (p.u.)	0.9975	0.9975	0.9975	0.0000
	V_3 (p.u.)	0.9899	0.9899	0.9899	0.0000
	V_4 (p.u.)	0.9898	0.9898	0.9898	0.0000
	V_5 (p.u.)	0.9973	0.9973	0.9973	0.0000
	V_6 (p.u.)	0.9934	0.9934	0.9934	0.0000
	V_7 (p.u.)	1.0004	1.0004	1.0004	0.0000
	V_8 (p.u.)	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
	V_9 (p.u.)	1.0025	1.0025	1.0025	0.0000
	Pref (MW)	138.7942	138.7942	138.7942	0.0000
PSO	Losses (MW)	0.7946	0.7980	0.7942	0.0007
	V_1 (p.u.)	1.0009	1.0011	1.0002	0.0002
	V_2 (p.u.)	0.9975	0.9978	0.9963	0.0003
	V_3 (p.u.)	0.9899	0.9905	0.9887	0.0003

ตารางที่ ค.17 ผลการจำลองหลังการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ของกรณีที่ 1 (ต่อ)

ขั้นตอนวิธี	ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
PSO	V_4 (p.u.)	0.9898	0.9904	0.9886	0.0003
	V_5 (p.u.)	0.9974	0.9989	0.9960	0.0006
	V_6 (p.u.)	0.9935	0.9956	0.9880	0.0012
	V_7 (p.u.)	1.0004	1.0006	1.0000	0.0001
	V_8 (p.u.)	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
	V_9 (p.u.)	1.0025	1.0027	1.0013	0.0003
	Pref (MW)	138.7946	138.7980	138.7942	0.0007
GA	Losses (MW)	0.7942	0.7942	0.7942	0.0000
	V_1 (p.u.)	1.0009	1.0009	1.0009	0.0000
	V_2 (p.u.)	0.9975	0.9975	0.9975	0.0000
	V_3 (p.u.)	0.9899	0.9899	0.9899	0.0000
	V_4 (p.u.)	0.9898	0.9898	0.9898	0.0000
	V_5 (p.u.)	0.9973	0.9973	0.9973	0.0000
	V_6 (p.u.)	0.9934	0.9934	0.9934	0.0000
	V_7 (p.u.)	1.0004	1.0005	1.0004	0.0000
	V_8 (p.u.)	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
	V_9 (p.u.)	1.0025	1.0025	1.0025	0.0000
	Pref (MW)	138.7942	138.7942	138.7942	0.0000

ตารางที่ ค.18 เปรียบเทียบค่าเหมาะสมที่สุดของแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 9 บัส

Optimal solution	BFGS	HS	PSO	GA
Q_{C5} (MVar)	23.2382	24.1648	24.3470	24.1667
Q_{C6} (MVar)	19.5380	19.3661	19.4251	19.3645
V_{NM2} (p.u.)	1.0025	1.0025	1.0025	1.0025



ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

น้ำเพชร สิ้นสุพรรณ และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2553). การจำลองระบบสะสมพลังงานด้วย
แบตเตอรี่สำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน.
การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6. 5 - 7 พฤษภาคม 2553
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

Sinsupan, N., Leeton, U., and Kulworawanichpong, T. (2010). **Application of Harmony Search to Optimal Power Flow Problems**. 2010 International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE 2010), Beijing, China, June 19 - 20, 2010, Beijing Jade Palace Hotel.

Sinsuphun, N., Leeton, U., Kwannetr, U., Uthitsunthorn, D., and Kulworawanichpong, T. (2011). **Loss Minimization Using Optimal Power Flow Based on Swarm Intelligences**. ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications Vol.9, NO.1, February 2011

น้ำเพชร สิ้นสุพรรณ และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2554). การแก้ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการค้นหาความบรรสาน. วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ฉบับที่ 2. ก.ค. - ธ.ค. 2554. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6
5 - 7 พฤษภาคม 2553 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การจำลองระบบสะสมพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน

Simulation of a Battery Storage system for Electric Power Distribution systems with renewable energy plants

น้ำเพชร สิ้นสุพรรณ และ ธนัตถ์ กุลวรวานิชพงษ์
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
นครราชสีมา 30000 E-mail: phetchty@hotmail.com

N. Sinsuphun, T. Kulworawanichpong
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima 30000 Thailand E-mail: phetchty@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองและการจำลองของแบตเตอรี่แบบกึ่งเพื่อสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า งานวิจัยนี้ศึกษาการต่อเซลล์แบตเตอรี่แบบขนานและอนุกรมตามลำดับซึ่งเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อให้เพียงพอกับระบบแบตเตอรี่แต่ละเซลล์เป็นชนิดกรดตะกั่ว (Lead-Acid) ขนาด 48 V การออกแบบนี้ประกอบด้วยแบตเตอรี่ 2 แบตเตอรี่ แต่ละแบตเตอรี่ต่อขนานกัน 10 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยแบตเตอรี่ที่อนุกรม 70 ลูก ทำการจำลองระบบสะสมพลังงานด้วยแบตเตอรี่ภายใน 1 วัน เพื่อทดสอบกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยทำการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB software) ผลที่ได้ แบตเตอรี่จะสะสมพลังงานได้เพียงพอกับระบบ และทำให้ระบบเกิดความสมดุล โดยจะแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (ดึงไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อยและการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน) และความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบ

Abstract

This paper presents modeling and simulation of a battery bank for energy storage purpose in electric power distribution systems. This work involves a combination between shunt and series battery cells in order to implement a sufficient battery storage system. Each battery cell is a lead-acid type of 48 V. This design consists of two battery banks. Each bank is a combination of ten shunt-battery modules. One module is built by seventy series-battery cells. To verify the simulated battery storage system, one day operation of an electric power

distribution system was tested. This simulation was performed using MATLAB software. As a result, the battery storage system was sufficient to support and also to balance the energy exchange between the generation (drawn from both substation and renewable energy plants) and the power demand of the entire system.

1. บทนำ

ระบบเก็บสะสมพลังงาน คือ การเก็บสะสมพลังงานส่วนเกินจากที่ผลิตได้ แล้วนำมาใช้ในยามจำเป็นเพื่อรักษาสมดุลของระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับแล้วก็เหมือนกับการสะสมทรัพย์เพื่อเก็บสำรองไว้ใช้ในยามขาดแคลน แต่แตกต่างกันที่รูปแบบเทคโนโลยีของระบบ การเก็บสะสมทางพลังงานนั้นมีหลากหลายรูปแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งพลังงานตั้งต้นกับการนำไปประยุกต์ใช้ โดยในที่นี้จะสนใจการเก็บสะสมพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในระบบพลังงานที่ใช้แพร่หลายทั่วโลก สามารถนำออกมาใช้ได้โดยง่าย และแบตเตอรี่ยังเป็นเซลล์ไฟฟ้าชนิดที่เมื่อใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์ออกไปแล้ว สามารถจ่ายไฟฟ้าเข้ามาในเซลล์เพื่อให้เซลล์มีคุณสมบัติเหมือนเดิม เรียกว่าการคายประจุและการอัดประจุ การออกแบบแบตเตอรี่แบบกึ่งทำให้แบตเตอรี่ไม่ใหญ่เกินความต้องการของการใช้งานมากเกินไป และไม่มีขนาดเล็กเกินไป ในสภาวะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงตามความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า เพื่อนำแบตเตอรี่แบบกึ่งไปใช้กับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานที่มีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ เป็นพลังงานที่สะอาดใช้แล้วไม่มีวันหมดสิ้นไปจากโลกเช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น โดยแบตเตอรี่

จะช่วยรักษาระดับแรงดันไม่ให้แรงดันตกและแรงดันเกินในระบบ [1]

2. ทฤษฎี

2.1 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ แบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลและแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลกระแสไฟฟ้าใหม่ไม่ได้ (ใช้แล้วทิ้ง) ซึ่งในที่นี้จะสนใจแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลกระแสไฟฟ้าใหม่ได้หรือเซลล์ไฟฟ้าแบบทุติยภูมิ ซึ่งเป็นเซลล์ไฟฟ้าชนิดที่เมื่อใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์ออกไปแล้วสามารถจ่ายไฟฟ้าเข้ามาในเซลล์เพื่อให้เซลล์มีคุณสมบัติเหมือนเดิม และแบตเตอรี่ยังเป็นอุปกรณ์ที่สามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ได้โดยการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานเคมี [2] ซึ่งแบ่งเป็น 6 ชนิด ดังนี้

1. กรดตะกั่ว (Lead-acid)

เป็นแบตเตอรี่ที่เห็นทั่วไป ประกอบด้วยแผ่นธาตุขั้วบวกและแผ่นธาตุขั้วลบ แผ่นธาตุทำมาจากผงตะกั่วบริสุทธิ์อัดแน่นในแผ่นตะแกรงตะกั่ว จึงเรียกว่า แบตเตอรี่กรดตะกั่ว (Lead-acid) เช่น แบตเตอรี่รถยนต์ แบตเตอรี่ชนิดนี้จะให้พลังงานไฟฟ้าได้มากถึงประมาณ 10000 วัตต์ ในช่วงเวลาสั้นๆ และมีกระแสตั้งแต่ 450 ถึง 1100 แอมแปร์ จึงทำให้มีความจุไฟฟ้ามากขึ้น

2. ลิเทียม ไอออน (Lithium-ion)

เป็นแบตเตอรี่ที่มีความสามารถ ในการจุพลังงานได้ดี มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ส่วนใหญ่ใช้ในโทรศัพท์

3. ลิเทียม ไอออน โพลีเมอร์ (Lithium ion Polymer)

แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความคล้ายกับลิเทียม ไอออน มาก แต่มีราคาแพง ใช้ในโทรศัพท์ แต่ไม่ค่อยนิยมใช้

4. โซเดียม-ซัลเฟอร์ (Sodium-sulfur)

เป็นแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานต่ำ ราคาแพง สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 350°C

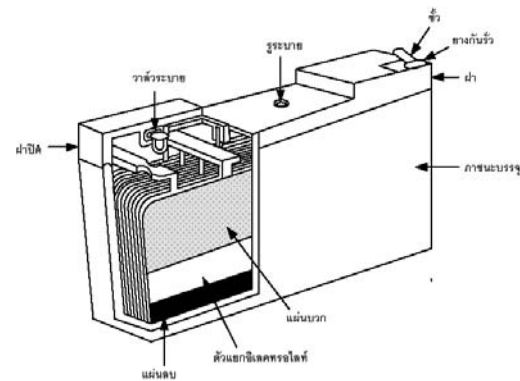
5. นิกเกิล เมทัล ไฮไดรด์ (Nickel metal hydride)

เป็นแบตเตอรี่ที่มีความไวต่อ Memory Effect น้อยมากและเป็นแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องทำการคายประจุของแบตเตอรี่ให้หมดก่อนการอัดประจุ อย่างน้อย 2 สัปดาห์ต่อครั้ง นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งพบเห็นได้ในโทรศัพท์มือถือ

6. นิกเกิล แคดเมียม (Nickel-cadmium)

เป็นแบตเตอรี่ที่มีราคาถูกที่สุด แต่มีข้อเสียหลายอย่าง ปัญหาในเรื่องของ Memory Effect ซึ่งก็คือ การลดลงของแรงดันแบตเตอรี่ชนิดนี้มักมีปัญหา ถ้าไม่ได้ทำการคายประจุแบตเตอรี่ให้หมดก่อนการนำมาอัดประจุใหม่ในแต่ละครั้ง นอกจากนี้สารเคมีที่บรรจุในแบตเตอรี่ยังมีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่มีการนำมาใช้ในโทรศัพท์แล้ว เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาถูกกว่าแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว แต่สามารถอัดประจุได้มากกว่าและอายุการใช้งานยาวนาน

ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว [3] เพราะเป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุ (capacity) สูงและให้กระแสมาก เนื่องจากมีการเก็บพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ โดยแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วจะมีลักษณะดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว

คุณลักษณะของแบตเตอรี่ในสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วคราวนั้น

สามารถแบ่งวิธีการการทำงานของแบตเตอรี่ออกเป็น 5 ช่วง [4] ได้แก่

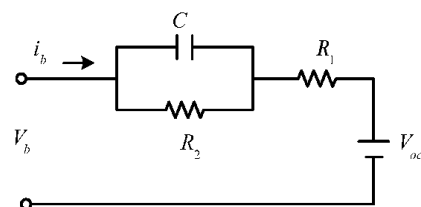
- ช่วงอัดประจุด้วยอัตรากระแสคงที่ (constant current charge: CCC)
- ช่วงอัดประจุด้วยอัตราแรงดันคงที่ (constant voltage charge: CVC)
- ช่วงคายประจุด้วยอัตรากระแสคงที่ (constant current discharge: CCD)
- ช่วงเวลาในการเปลี่ยนสภาวะจากการคายประจุเป็นการอัดประจุ (discharge idle time: DIT)
- ช่วงเวลาในการเปลี่ยนสภาวะจากการอัดประจุเป็นการคายประจุ (charge idle time: CIT)

สำหรับงานวิจัยนี้ จะพิจารณาเฉพาะช่วง CCC, CCD, DIT และ CIT

2.2 สมการการอัดประจุและคายประจุ

การอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่จะทำให้ระบบจำหน่วยกำลังไฟฟ้าที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเกิดความสมดุล โดยใช้สมการการอัดประจุ [5] และคายประจุ [6] ดังสมการที่ (1) และ (2)

ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความสำคัญในการออกแบบใช้คาดการณ์ผลที่อาจเกิดขึ้นในการใช้งานอุปกรณ์อื่นๆ ร่วมกับแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว แบตเตอรี่มีการลดลงของพลังงานที่เก็บสะสมอยู่ภายในเมื่อแรงดันของแบตเตอรี่มีระดับลดลงจากค่าที่กำหนดให้ ความต้านทานภายในแบตเตอรี่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่มาจากความต้านทานภายในอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีแทนด้วยวงจรสมมูลเทวินินของแบตเตอรี่ [4] ดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยความต้านทานภายใน R_i และแรงดันเกินภายในแทนด้วย C และ R_2 ต่อขนานกัน



รูปที่ 2 วงจรสมมูลเทวินินของแบตเตอรี่

2.2.1 สมการการอัดประจุ

$$V_b = V_0 + (R_{tot} \times I) + \left[K1 \times \frac{I^n}{C} \right] \times t + \left[\frac{K2}{C - I^n \times t} \right] \quad (1)$$

V_b คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะอัดประจุ (V)

V_0 คือ แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ (V)

R_{tot} คือ ความต้านทานภายในรวม (Ω)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแบตเตอรี่ขณะอัดประจุ (A)

C คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Ah)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่ (h)

n คือ peukert's exponent (ไม่มีหน่วย)

$K1$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์จาก peukert's equation

$K2$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นกะทันหัน เมื่อแบตเตอรี่คายประจุใกล้เต็ม

จากสมการที่ (1) ใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้ [5]

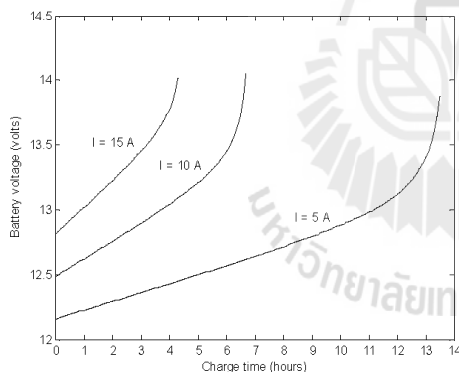
- ความจุไฟฟ้า 70 Ah

- R_{tot} ขณะอัดประจุ = $6.56 \times 10^{-2} \Omega$

- n ขณะอัดประจุ = 1

- $K1 = 0.90$, $K2 = 2.2$

นำค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ขณะอัดประจุแทนค่าลงในสมการที่ (1) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันแบตเตอรี่ขณะอัดประจุ เมื่อพิจารณาอัตราการคายประจุคงที่ 5, 10 และ 15 A ตามลำดับ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แรงดันแบตเตอรี่ขณะอัดประจุ

จะเห็นได้ว่า ขณะเริ่มอัดประจุ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากแรงดันต่ำสุด ซึ่งเกิดจากค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ จากนั้นแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างราบเรียบแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเกิดจากค่าความจุของแบตเตอรี่และค่าความต้านทานภายใน เมื่ออัตราการคายประจุมีค่าสูงขึ้น จะทำให้เวลาในการอัดประจุนั้นสั้นลง [7]

2.2.2 สมการการคายประจุ

$$V_b = V_0 - (R_{tot} \times I) - \left[K1 \times \frac{I^n}{C} \right] \times t - \left[\frac{K2}{C - I^n \times t} \right] \quad (2)$$

V_b คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะคายประจุ (V)

V_0 คือ แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ (V)

R_{tot} คือ ความต้านทานภายในรวม (Ω) ซึ่งจะสมมติให้มีค่าคงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสถานะของการอัดประจุ (State of Charge: SOC)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแบตเตอรี่ขณะคายประจุ (A)

C คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Ah)

t คือ เวลาที่ใช้ในการคายประจุแบตเตอรี่ (h)

n คือ peukert's exponent (ไม่มีหน่วย)

$K1$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์จาก peukert's equation

$K2$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แรงดันตกกะทันหัน เมื่อแบตเตอรี่คายประจุใกล้หมด

จากสมการที่ (2) ใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้ [5]

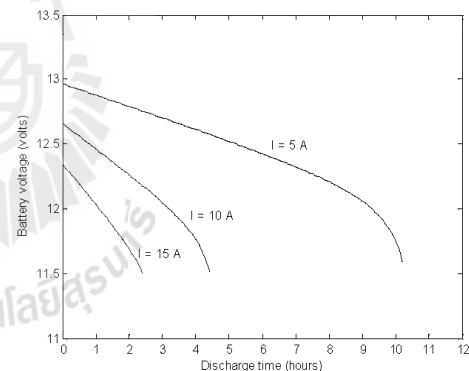
- ความจุไฟฟ้า 70 Ah

- R_{tot} ขณะคายประจุ = $6.15 \times 10^{-2} \Omega$

- n ขณะคายประจุ = 1.16

- $K1 = 0.90$, $K2 = 2.2$

นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ขณะคายประจุแทนค่าลงในสมการที่ (2) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันแบตเตอรี่ขณะคายประจุ เมื่อพิจารณาอัตราการคายประจุคงที่ 5, 10 และ 15 A ตามลำดับ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แรงดันแบตเตอรี่ขณะคายประจุ

จะเห็นได้ว่า ขณะเริ่มคายประจุ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะตกลงอย่างรวดเร็วจากแรงดันสูงสุด ซึ่งเกิดจากค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ จากนั้นแรงดันจะตกลงอย่างราบเรียบแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเกิดจากค่าความจุของแบตเตอรี่และค่าความต้านทานภายใน เมื่ออัตราการคายประจุมีค่าสูงขึ้น จะทำให้เวลาในการคายประจุนั้นสั้นลง [7]

2.3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีการควบคุมเฟส

วงจรเรียงกระแสจะมีการทำงาน 2 โหมด [8]

โดยมีเงื่อนไขว่าไม่คำนึงถึงความไม่ต่อเนื่องของกระแสโหลด

1. โหมดเรียงกระแส

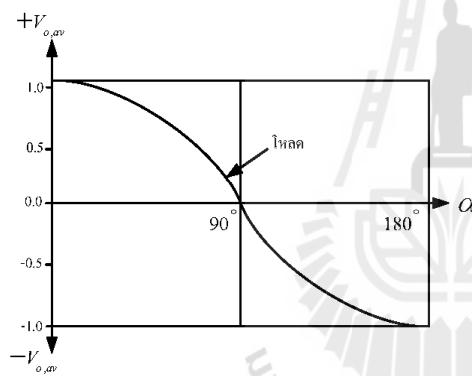
คือการแปรผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับไปสู่โหลด โดยการปรับมุมจุดชนวนเกต (α) ของไทรสเตอร์ $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ กระแสไหลจะไหลอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้แรงดัน $V_{o,av}$ มีค่ามากกว่า V_b ขณะที่กระแสจะไหลจาก แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับผ่านวงจรบริดจ์ แปลงเป็นกระแสตรงไปสู่โหลด

2. โหมดอินเวอร์เตอร์

คือการแปรผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการปรับมุมจุดชนวนเกต (α) ของไทรสเตอร์ $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ แรงดัน $V_{o,av}$ จะมีค่าเป็นลบ (ปกติเมื่อโหลดมีค่าสูงมาก ๆ ที่

$90^\circ < \alpha < 180^\circ$ แรงดัน $V_{o,av} = 0V$) แรงดัน V_b มีค่าสูงกว่า $V_{o,av}$ จึง ทำให้กระแสตรงไหลออกจากขั้วบวกของ V_b ผ่านวงจรบริดจ์ แปลง เป็นไฟกระแสสลับส่งออกไปยังแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ

เมื่อปรับมุมจุดชนวนเกต (α) ของไทรสเตอร์ให้อยู่ในช่วง $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ แรงดันเอาต์พุต $V_{o,av}$ จะเป็นบวก วงจรจะทำงานใน โหมดวงจรเรียงกระแส แต่ถ้ามุมจุดชนวนเกต (α) ของไทรสเตอร์อยู่ใน ช่วง $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ วงจรจะทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์แรงดัน เอาต์พุต $V_{o,av}$ จะเป็นลบ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟคุณลักษณะของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสาม เฟสแบบบริดจ์ที่มีการควบคุมเฟส

3. การออกแบบระบบ

3.1 จำนวนแบตเตอรี่

- การต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม

มีแรงดันปกติ (nominal voltage) 48 V

แรงดันปกติ = $S \times$ แรงดันปกติ

$$R_{tot} \text{ ขณะอัดประจุ} = S \times 6.56 \times 10^{-2} \Omega$$

$$R_{tot} \text{ ขณะคายประจุ} = S \times 6.15 \times 10^{-2} \Omega$$

- การต่อแบตเตอรี่แบบขนาน

$$C = P \times 70 \text{ Ah}$$

$$R_{tot} \text{ ขณะอัดประจุ} = (6.56 / P) \times 10^{-2} \Omega$$

$$R_{tot} \text{ ขณะคายประจุ} = (6.15 / P) \times 10^{-2} \Omega$$

ดังนั้น

$$N = S \times P \times B \quad (4)$$

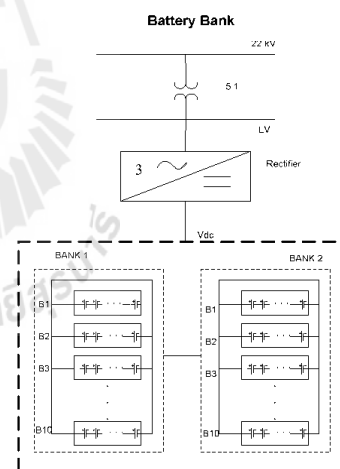
เมื่อ N คือ จำนวนแบตเตอรี่

S คือ จำนวนแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรม

P คือ จำนวนแบตเตอรี่ที่ต่อขนาน

B คือ จำนวนแบตเตอรี่แบงค์ที่ต่ออนุกรม

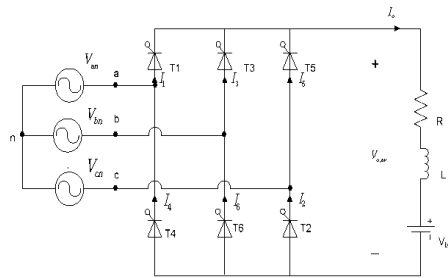
การออกแบบแบตเตอรี่แบงค์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าตามที่ระบบ จำหน่ายกำลังไฟฟ้าผลิตได้จากพลังงานทดแทนดังตารางที่ 1 จะ สังเกตเห็นว่าแบตเตอรี่เพียงลูกเดียว ไม่เพียงพอต่อการใช้งานในระบบ กำลังไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้งานต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องมีการ ออกแบบจำนวนแบตเตอรี่ ในกรณีที่ต้องการแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ เพิ่มขึ้น ต้องนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน และถ้าต้องการความจุของ แบตเตอรี่เพิ่มขึ้นจะต้องนำแบตเตอรี่มาต่อขนานกัน ซึ่งในแบบจำลอง ใช้แบตเตอรี่ที่มีแรงดันขนาด 48 V_{dc}, 70Ah ต่ออนุกรมกันทั้งหมด จำนวน 2 แบงค์ และใน 1 แบงค์ ใช้แบตเตอรี่จำนวน 700 ลูก ต่อเป็น ชุดขนานกัน 10 ชุด ซึ่งแต่ละชุดมีแบตเตอรี่ 70 ลูก ต่ออนุกรมกัน ดังนั้นใช้แบตเตอรี่ทั้งหมด 1400 ลูก ดังรูปที่ 6 โดยใช้หลักการ ออกแบบแบตเตอรี่แบงค์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งแต่ละชั่วโมงจะมีการอัดประจุและคายประจุไม่เท่ากัน จึงต้องออกแบบว่าแต่ละชั่วโมงจะ ใช้แบตเตอรี่กี่ลูก โดยอาจจะใช้แบตเตอรี่ไม่ถึง 700 ลูก ในบางช่วงเวลา เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทนไม่คงที่ดังนั้น แบตเตอรี่จะมีการอัดประจุและคายประจุเพื่อทำให้เกิดความสมดุลใน ระบบไฟฟ้า



รูปที่ 6 แบตเตอรี่แบงค์

3.2 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีการควบคุมเฟส ประกอบด้วยไทรสเตอร์ทั้งหมดจำนวน 6 ตัว [9] ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีการควบคุมเฟส

ซึ่งจะใช้แปลงกระแสตรงไปเป็นกระแสสลับ เมื่อแบตเตอรี่มีการคายประจุ โดยใช้โหมดการทำงานแบบอินเวอร์เตอร์ และใช้แปลงกระแสสลับไปเป็นกระแสตรง เมื่อเกิดการอัดประจุใช้โหมดการทำงานแบบเรียงกระแส โดยใช้สมการที่ 3

$$V_{o,av} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos\alpha \quad (3)$$

ทำการออกแบบเพื่อหาค่าแรงดันทางต้านแรงต่ำ และนำแรงดันที่ได้ไปหาอัตราส่วนของหม้อแปลง เช่น ทำการออกแบบที่ $P = 3.3 \text{ MW}$ ซึ่งได้อัตราส่วนของหม้อแปลง 5:1 เนื่องจากกำลังไฟมีการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 1 จึงต้องใช้หม้อแปลงแบบปรับเลื่อนค่าได้ (Variable) ขดลวดทุติยภูมิและปฐมภูมิจะเป็นขดลวดขดเดียวกัน หรือเรียกว่า หม้อแปลงออโต้ (Autotransformer) ใช้ในการปรับขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้า

3.2.1 สถานะการอัดประจุ

$V_{dc} \text{ (battery)} = 4.7 \text{ kV}$ ที่ $P = 3.3 \text{ MW}$
ใช้ โหมดเรียงกระแส (AC to DC)

$$\alpha = 45^\circ = \frac{\pi}{4}$$

$$4.71 \text{ kV} = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}xV_{rms}}{\pi} x \cos \frac{\pi}{4}$$

$$V_{rms} = 2.85 \text{ kV}$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3}xV_{phase} = \sqrt{3}x2.85 \text{ kV} = 4.93 \text{ kV} \approx 5 \text{ kV}$$

อัตราส่วนหม้อแปลง

$$\alpha = \frac{22 \text{ kV}}{5 \text{ kV}} = 4.4 \approx 5$$

จะได้อัตราส่วนหม้อแปลง 5:1 จึงใช้หม้อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าลง (Step-Down) ซึ่งขดลวดทุติยภูมิจะมีจำนวนรอบน้อยกว่าปฐมภูมิ

3.2.2 สถานะการคายประจุ

ใช้ โหมดอินเวอร์เตอร์ (DC to AC)

$$\alpha = 120^\circ = \frac{2\pi}{3}$$

$$V_{o,av} = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}x2.85 \text{ kV}}{\pi} x \cos \frac{2\pi}{3}$$

$$V_{o,av} = -3.33 \text{ kV}$$

ดังนั้นแบตเตอรี่จะคายประจุ 3.33 kV

4. ผลการทดลอง

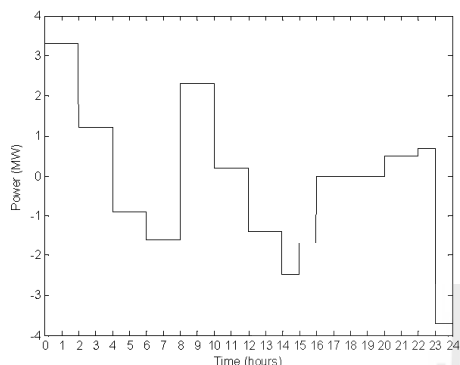
จำลองการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ภายใน 1 วันกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทน โดยมีข้อมูลของระบบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน (MW)	โหลด (MW)	พลังงานสะสม (MWh)	กำลังไฟฟ้า (MW)	สถานะ
1	6	2.7	3.3	3.3	อัดประจุ
2	6	2.7	6.6	3.3	อัดประจุ
3	6	4.8	7.8	1.2	อัดประจุ
4	6	4.8	9.0	1.2	อัดประจุ
5	6	6.9	8.1	-0.9	คายประจุ
6	6	6.9	7.2	-0.9	คายประจุ
7	6	7.6	5.6	-1.6	คายประจุ
8	6	7.6	4.0	-1.6	คายประจุ
9	6	3.7	6.3	2.3	อัดประจุ
10	6	3.7	8.6	2.3	อัดประจุ
11	6	5.8	8.8	0.2	อัดประจุ
12	6	5.8	9.0	0.2	อัดประจุ
13	6	7.4	7.6	-1.4	คายประจุ
14	6	7.4	6.2	-1.4	คายประจุ
15	6	8.5	3.7	-2.5	คายประจุ
16	6.8	8.5	2.0	-1.7	คายประจุ
17	9.1	9.1	2.0	0.0	-
18	9.1	9.1	2.0	0.0	-
19	9.3	9.3	2.0	0.0	-
20	9.3	9.3	2.0	0.0	-
21	6	5.5	2.5	0.5	อัดประจุ
22	6	5.5	3.0	0.5	อัดประจุ
23	6	5.3	3.7	0.7	อัดประจุ
24	1.6	5.3	0.0	-3.7	คายประจุ

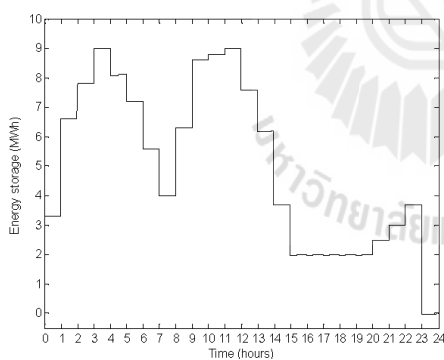
กำหนดให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนแต่ละชั่วโมงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งจะผลิตกำลังไฟฟ้าได้ไม่คงที่ โดยใน 1 วันจะผลิตกำลังไฟฟ้าได้ทั้งหมด 153.2 MW และโหลดมีการเปลี่ยนแปลงตามความต้องการของผู้ใช้ ทำการจำลองการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่จะมีการอัดประจุเมื่อระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนผลิตไฟฟ้าได้เกินความต้องการของโหลด และมีการคายประจุเมื่อระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนผลิตไฟฟ้าได้น้อยกว่าความต้องการของโหลด ดังนั้นจึงทำให้เกิดความสมดุลในระบบไฟฟ้า นั่นคือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับความต้องการกำลังไฟฟ้า (supply = demand) จากการ

จำลองการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ภายใน 1 วัน ได้ผลดังรูปที่ 8 จะสังเกตเห็นว่าการจำลองการอัดประจุได้กราฟทางซีกบวก และการคายประจุได้กราฟทางซีกลบ โดยแต่ละชั่วโมงจะมีการอัดประจุและคายประจุในรูปของกำลังไฟฟ้า



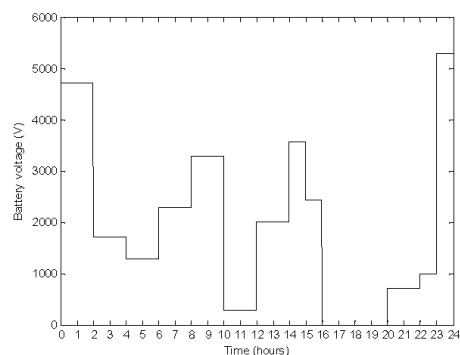
รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าจากการอัดประจุและคายประจุ

ซึ่งจะมีการอัดประจุสูงสุดที่ 3.3 MW ขึ้นอยู่กับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่ผลิตได้ ถ้าผลิตได้มากกว่าความต้องการของโหลด แบตเตอรี่จะนำกำลังไฟฟ้าที่เกินความต้องการของโหลดมาเก็บไว้ในรูปการอัดประจุ แต่ถ้านำพลังงานจากพลังงานทดแทนที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด หรือเรียกว่าการคายประจุ ซึ่งจะทำให้มีพลังงานสะสมในแบตเตอรี่เมื่อมีการอัดประจุและคายประจุแต่ละชั่วโมง โดยทำการจำลองการคายประจุของแบตเตอรี่ให้หมดภายใน 1 วัน ดังรูปที่ 9



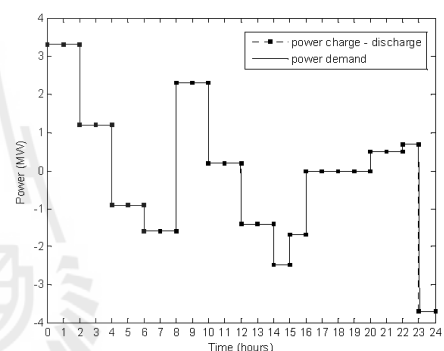
รูปที่ 9 พลังงานสะสมจากการอัดประจุและคายประจุ

ส่วนแรงดันแบตเตอรี่ที่ได้ในแต่ละชั่วโมง เมื่อแบตเตอรี่มีการอัดประจุและคายประจุ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะคายประจุและอัดประจุ จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน และความจุของแบตเตอรี่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อนำแบตเตอรี่มาต่อขนานกัน โดยจะสังเกตได้จากเวลาที่ใช้ในการคายประจุหมด และเวลาที่ใช้ในการอัดประจุเต็ม จะมีค่าเวลาที่เพิ่มมากขึ้นตามค่าความจุที่สูงขึ้น และจะเห็นได้ว่าในช่วงชั่วโมงที่ 16-20 ไม่มีการอัดประจุและคายประจุ ดังนั้นแรงดันในช่วงนั้นจึงเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แรงดันจากการอัดประจุและคายประจุ

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ ได้มาจากการสมการการอัดประจุและคายประจุ ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ จะได้กราฟเส้นประ ส่วนเส้นตรงจะเป็นกราฟกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ ใน 1 วัน ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ต้องการกับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการอัดประจุและคายประจุ

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลอง สรุปได้ว่าแบตเตอรี่แบบกึ่งสามารถควบคุมการอัดประจุและการคายประจุของกำลังไฟฟ้าในระบบภายใน 1 วันได้ เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแต่ละช่วงเวลาตามความต้องการของผู้ใช้ โดยการนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมหรือขนานกันเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการ และใช้วงจรเรียงกระแสในการแปลงพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแบตเตอรี่แบบกึ่งที่ได้จากการออกแบบนี้สามารถนำไปใช้กับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น โดยแบตเตอรี่จะช่วยรักษาระดับแรงดันคืออัดประจุในกรณีที่ระบบไฟฟ้าที่เกินความต้องการของโหลด และคายประจุเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าให้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของระบบไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

1. สุรญา ยงประยูร, "ระบบสะสมพลังงาน (Energy Storage) ", วิทยานิพนธ์ อาจารย์พิเศษ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม , มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
2. Vincen, C. A., and Scrosati, B., "Modern Batteries", 2nd edition. , New York, 1997
3. Casacca, M.A., Capobianco, M.R., and Salameh, Z.M. (1996). Lead acid battery storage configuration for improved available capacity.IEEE Transactions on Energy Conversion. 11(1): 139-145.
4. Salameh, Z.M., Casacca, M.A., and Lynch, W.A. (1992). Amathematical model for lead-acid batteries.
5. Protogeropoulos, C., Marshall, R. H., and Brinkworth, B. J. (1994). "Battery state of voltage modelling and algorithm describing dynamic conditions for long-term storage simulation in a renewable system. "Solar Energy".53 (6): 517-527.
6. Rynkiewicz, R. (1999). "Discharge and charge modeling of lead acid batteries",Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE.2:707-710. IEEE Transactions on Energy Conversion.7 (1): 93-97.
7. เผล็จ เฝ้าละออ และ สุราวุฒิ สุจิตจร, "การออกแบบและอนุ-วัตต์ควบคุมพัลส์เพื่อจัดการพลังงานในระบบพลังงานแสงอาทิตย์", บทความวิชาการ (Proceeding), หน้า 16-18
8. ชัยยงค์ แก้วมงคลและนภัทร วานเทพินทร์, "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1", สำนักพิมพ์ สกายบุ๊กส์, 2546, หน้า 183-226
9. Rashid, Muhammad H., "Power Electronic", 2nd edition. NJ: Prentice-Hall, 1993

Application of Harmony Search to Optimal Power Flow Problems

Nampetch Sinsupan, Uthen Leeton and Thanatchai Kulworawanichpong

Power System Research Unit, Suranaree University of Technology, THAILAND
thanatchai@gmail.com

Abstract

This paper presents the use of the harmony search method for solving optimal power flow problems. The harmony search method mimics a jazz improvisation process by musicians in order to seek a fantastic state of harmony. To assess the searching performance of the proposed method, a 6-bus test power system was challenged. Satisfactory results obtained from the proposed method were compared to those obtained by genetic algorithms, particle swarm optimization, and the quasi-Newton with BFGS formula.

1. Introduction

Engineering optimization problems contain many practical complex constraints. They can be formulated and therefore solved as nonlinear programming models. The methods for solving this kind of problems include traditional mathematical programming (such as linear programming, quadratic programming, dynamic programming, gradient methods and Lagrangian relaxation approaches [1]) and modern meta-heuristic methods (such as simulated annealing, genetic algorithms, evolutionary algorithms, adaptive tabu search, particle swarm optimization, etc [2]). Some of these methods are successful in locating the optimal solution, but they are usually slow in convergence and require very expensive computational cost. Some other methods may risk being trapped to a local optimum, which is the problem of premature convergence.

Optimal power flow is one of nonlinear constrained and occasionally combinatorial optimization problems of power systems. The various algorithms for solving such problems can be found in the literature. The optimal power flow problem has been developed continually since its introduction by Carpentier in 1962 [3]. It is useful to determine the goals of optimal power flow problems. The primary goal of a generic optimal power flow is to minimize the total production costs of

the entire system to serve the load demand for a particular power system while maintaining the security of the system operation. The production costs of electrical power systems may depend on the situation, but in general they normally mean to the cost of generating power at each generating unit of power plants. This operation is subjected to keep each device in the power system within its desired operation range at steady-state. This will include maximum and minimum outputs for generators, maximum MVA flows of power transmission lines and transformers, as well as system bus voltages within specified ranges.

In this paper, an application of harmony search to solve optimal power flow problems is proposed [4,5]. The controllable system quantities are generator MW, controlled voltage magnitude, reactive power injection from reactive power sources and transformer tap setting. The objective used herein is to minimize the total production cost by optimizing the control variables within their limits. Therefore, no violation on other quantities (e.g. MVA flow of transmission lines, load bus voltage magnitude, generator MVAR) occurs in normal system operating conditions. The proposed method has been tested on a 6-bus test power system.

In this paper, the formulation of optimal power flow is explained in Section 2 in such a way that the overall system production cost is employed to be the system objective. Section 3 provides a brief of harmony search to solve non-linear optimization problems. The 6-bus test power system was challenged and therefore discussed in Section 4. The last section provides the conclusions and future work.

2. Optimal power flow problem

Optimal power flow is a type of non-linear optimization problems in which all control parameters are adjusted in such a way that the power flow of the entire system is optimized [1]. This is summarized as follows.

2.1 Non-linear optimization problem

The optimal power flow problem is a nonlinear optimization problem. It consists of a nonlinear objective function defined with nonlinear constraints. The optimal power flow problem requires the solution of nonlinear equations, describing optimal and/or secure operation of power systems. The general optimal power flow problem can be expressed as a constrained optimization problem as follows.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } f(x) \\ &\text{Subject to } g(x) = 0, \text{ equality constraints} \\ &\quad h(x) \geq 0, \text{ inequality constraints} \end{aligned}$$

By converting both equality and inequality constraints into penalty terms and therefore added to form the penalty function.

$$P(x) = f(x) + \Omega(x) \quad (1)$$

$$\Omega(x) = \rho \{g^2(x) + [\max(0, h(x))]^2\} \quad (2)$$

Where

$P(x)$ is the penalty function

$\Omega(x)$ is the penalty term

ρ is the penalty factor

By using a concept of the penalty method [13], the constrained optimization problem is transformed into an unconstrained optimization problem in which the penalty function as described above is minimized.

2.2 Objective function

Although most of optimal power flow problems involve the total production cost of the entire power system, in some cases some different objective may be chosen. In this paper, the power transmission loss function is set as the objective function. The power transmission loss can be expressed as follows.

$$F_T = \sum_{i=1}^{N_G} f(P_{G,i}) = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i + b_i P_{G,i} + c_i P_{G,i}^2) \quad (3)$$

Where $f(P_{G,i})$ is the fuel cost of generating unit i
 a_i, b_i, c_i are coefficients of fuel cost $f(P_{G,i})$
 F_T is the total production cost
 N_G is the total number of generating units

2.3 System constraints

The controllable system quantities are generator MW, controlled voltage magnitude, reactive power injection from reactive power sources and transformer tapping. The objective use herein is to minimize the power transmission loss function by optimizing the control variables within their limits. Therefore, no violation on other quantities (e.g. MVA flow of transmission lines, load bus voltage magnitude, generator MVAR) occurs in normal system operating conditions. These are system constraints to be formed as equality and inequality constraints as shown below.

1) *Equality constraint:* Power flow equations

$$P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} V_i \|V_j\| Y_{i,j} |\cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j)| = 0 \quad (4)$$

$$Q_{G,i} - Q_{D,i} + \sum_{j=1}^{N_B} V_i \|V_j\| Y_{i,j} |\sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j)| = 0 \quad (5)$$

Where $P_{G,i}$ is the real power generation at bus i
 $Q_{G,i}$ is the reactive power generation at bus i
 $P_{D,i}$ is the real power demand at bus i
 $Q_{D,i}$ is the reactive power demand at bus i
 N_B is the total number of buses
 $\theta_{i,j}$ is the angle of bus admittance element i,j
 $Y_{i,j}$ is the magnitude of Y_{bus} element i,j

2) *Inequality constraint:* Variable limitations

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

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad (7)$$

$$Q_{comp,i}^{\min} \leq Q_{comp,i} \leq Q_{comp,i}^{\max} \quad (8)$$

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \quad (9)$$

Where

$V_i^{\min}, V_i^{\max}$ are upper and lower limits of voltage magnitude at bus i

$T_i^{\min}, T_i^{\max}$ are upper and lower limits of tap position of transformer i

$Q_{comp,i}^{\min}, Q_{comp,i}^{\max}$ are upper and lower limits of reactive power source i

$P_{G,i}^{\min}, P_{G,i}^{\max}$ are upper and lower limits of power generated by generator i

The penalty function can be formulated as follows.

$$P(x) = F_T + \Omega_v + \Omega_T + \Omega_Q + \Omega_P + \Omega_G \quad (10)$$

Where

$$\Omega_P = \rho \sum_{i=1}^{N_g} \left\{ P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_g} |V_i| |V_j| Y_{ij} |\cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j)| \right\}^2$$

$$\Omega_Q = \rho \sum_{i=1}^{N_g} \left\{ Q_{G,i} - Q_{D,i} + \sum_{j=1}^{N_g} |V_i| |V_j| Y_{ij} |\sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j)| \right\}^2$$

$$\Omega_C = \rho \sum_{i=1}^{N_c} \left\{ \max(0, Q_{comp,i} - Q_{comp,i}^{\max}) \right\}^2$$

$$+ \rho \sum_{i=1}^{N_c} \left\{ \max(0, Q_{comp,i}^{\min} - Q_{comp,i}) \right\}^2$$

$$\Omega_T = \rho \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \max(0, T_i - T_i^{\max}) \right\}^2$$

$$+ \rho \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \max(0, T_i^{\min} - T_i) \right\}^2$$

$$\Omega_{V'} = \rho \sum_{i=1}^{N_g} \left\{ \max(0, V_i - V_i^{\max}) \right\}^2$$

$$+ \rho \sum_{i=1}^{N_g} \left\{ \max(0, V_i^{\min} - V_i) \right\}^2$$

$$\Omega_G = \rho \sum_{i=1}^{N_g} \left\{ \max(0, P_{G,i} - P_{G,i}^{\max}) \right\}^2$$

$$+ \rho \sum_{i=1}^{N_g} \left\{ \max(0, P_{G,i}^{\min} - P_{G,i}) \right\}^2$$

N_G is the total number of generators

N_C is the total number of reactive power sources

N_T is the total number of transformers

3. Harmony search

The harmony search (HS) method [4,5] was conceptualized from the musical process of searching for a 'perfect state' of harmony, such as jazz improvisation. Jazz improvisation seeks a best state (fantastic harmony) determined by aesthetic estimation, just as the optimization algorithm seeks a best state (global optimum) determined by evaluating the objective function. Aesthetic estimation is performed by the set of pitches played by each instrument, just as the objective function evaluation is performed by the set of values assigned by each decision variable. The harmony quality is enhanced practice after practice, just as the solution quality is enhanced iteration by iteration. Consider a jazz trio composed of a saxophone, double bass, and guitar. Assume there exists a certain number of preferable pitches in each musician's memory: saxophonist {Do, Mi, Sol}, double bassist {Ti, Sol, Re}, and guitarist {La, Fa, Do}. If the saxophonist plays note Sol, the double bassist plays Ti, and the guitarist plays Do,

together their notes make a new harmony (Sol, Ti, Do) which is musically the chord C7. If this new harmony is better than the existing worst harmony in their memories, the new harmony is included in their memories and the worst harmony is excluded from their memories. This procedure is repeated until a fantastic harmony is found.

However, its first version was invented as a combinatorial optimization where decision variables are discrete. To apply the harmony search method to the real world engineering in which many search spaces are continuous, some procedure of the harmony search method must be modified to be able to handle continuous search variables. Together, the parameter called bandwidth is used and adaptively changed by variance of population. Hence, it is an improved version of the harmony search method which is called as the improved harmony search method [4,5]. The steps in the procedure of harmony search are shown in Fig. 1.

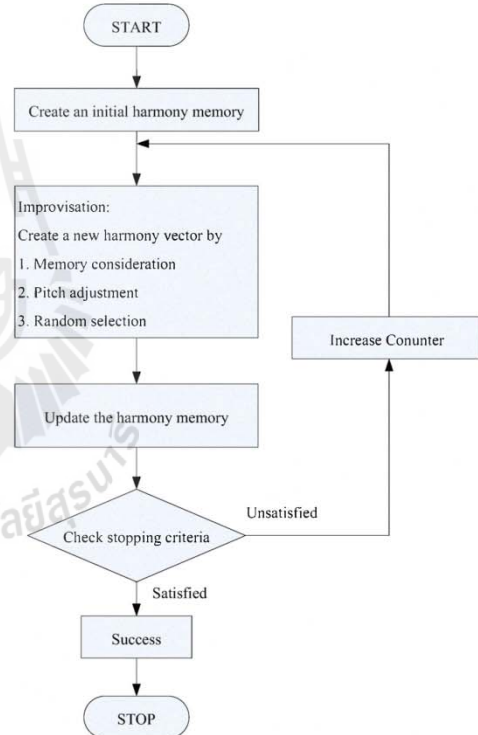


Figure 1. Flowchart of the HS procedure

4. Simulation results

In this paper, a 6-bus test power system as given in Fig. 1 was chosen as a test system. The quasi-Newton with BFGS formula, genetic algorithms, particle swarm optimization and harmony search were employed for comparison. Each method was carried out by 30 trials. Table 1 gave limitations of variables used to be optimized. Table 2 showed the coefficients of the quadratic production cost curve as described in (14).

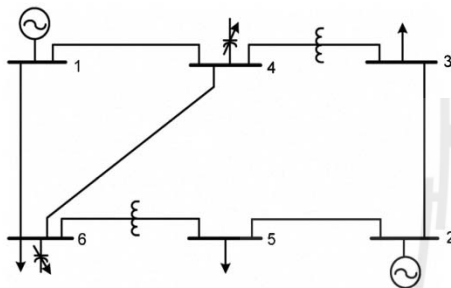


Figure 1. 6-bus test power system

Table 1. Limitation of control variables

Item	Lower limit	Upper limit
P_{G1}	50 MW	200 MW
P_{G2}	20 MW	80 MW
V_1	0.9 p.u.	1.1 p.u.
V_2	0.9 p.u.	1.1 p.u.
T34	0.9 p.u.	1.1 p.u.
T56	0.9 p.u.	1.1 p.u.
Q_{C4}	0 Mvar	5 Mvar
Q_{C6}	0 Mvar	5 Mvar

Table 2. Quadratic production cost curve coefficients

Item	Min	Max	a	b	c
P_{G1}	50 MW	200 MW	0	100	100
P_{G2}	20 MW	80 MW	0	500	100

$$f_{G_i} = a + bP_{G_i} + cP_{G_i}^2 \quad (11)$$

To find a set of optimal power flow solution, the proposed method, harmony search algorithm, was employed. For benchmarking, the quasi-Newton method, particle swarm optimization and genetic algorithms were also employed. The harmony search

method was the fastest method to obtain the optimal among the intelligent search methods. However, it was still slower than the BFGS. Another supported evidence was the standard deviation (S.D.). With 30 trials of test, the S.D. of the solutions obtained by the harmony search was the smallest. This indicates that the harmony search algorithm can be used to find the optimal power flow solution.

Table 3. Simulation results of all test cases

	Production cost (₹/h)				Average time (s)
	Min	Max	Mean	S.D.	
BFGS	389110	389330	389130	57	0.224
PSO	391770	428190	398630	6973	70.19
GA	389110	389110	389110	0.02	492.80
HS	389470	389470	389470	0.0001	8.574

5. Conclusion

This paper described the use of harmony search algorithm to find optimal power flow solutions. This work was conducted by 30 trials. The test also applied the BFGS, genetic algorithms and particle swarm optimization of 30 trials each for comparison. The results showed that the harmony search can be the fastest among the intelligent search methods and also give the smallest S.D. of the solution for the 30 trials.

6. References

- [1] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, *Power generation, operation and control*, Wiley-Interscience, New York, 1996.
- [2] J. Kennedy and R.C. Eberhart, *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann, 2001.
- [3] J. Carpentier, "Optimal power flows", *Int. J. Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 1, April 1979, pp. 3–15.
- [4] Z.W. Geem, J.H. Kim and G.V. Loganathan, *A new heuristic optimization algorithm: harmony search*, *Simulation*, vol. 76, No. 60, 2001.
- [5] T. Ratniyomchai, A. Oonsivilai, P. Pao-La-Or, T. Kulworawanichpong, "Economic Load Dispatch Using Improved Harmony Search", *The WSEAS Transactions on Systems and Control*, Vol. 5, April 2010, pp. 248–257.

Loss Minimization Using Optimal Power Flow Based on Swarm Intelligences

Numphetch Sinsuphun¹, Uthen Leeton², Umaporn Kwannetr³,
Dusit Uthitsunthorn⁴, and Thanatchai Kulworawanichpong⁵, Non-members

ABSTRACT

This paper describes optimal power flow based on swarm intelligences in which the power transmission loss function is used as the problem objective. Although most of optimal power flow problems involve the total production cost of the entire power system, in some cases some different objective may be chosen. In this paper, to minimize the overall power transmission losses, four decision variables are participated. They are i) power generated from generating plants, ii) specified voltage magnitude at control substations, iii) tap position of tapchanging transformers and iv) reactive power injection from reactive power compensators. Swarm intelligences are wellknown and widely accepted as potential intelligent search methods for solving such a problem. In this paper, Genetic Algorithms (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Artificial Bee Colony (ABC) and Differential Evolution (DE) are employed to solve optimal power flow problems. A 6-bus and 30-bus IEEE power systems are used for test. As a result, all swarm intelligences search algorithms can solve optimal power flow problems efficiently. The artificial bee colony and the differential evolution provide results better than other swarm intelligent techniques.

Keywords: Optimal Power Flow, Power Loss Minimization, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, Artificial Bee Colony, Differential Evolution

1. INTRODUCTION

Optimal power flow is one of nonlinear constrained and occasionally combinatorial optimization problems of power systems. The various algorithms for solving such problems can be found in the literature. The optimal power flow problem has been developed continually since its introduction by Carpentier in 1962 [1]. It is useful to determine the goals of optimal power flow problems. The primary goal of a

generic optimal power flow is to minimize the total production cost of the entire system to serve the load demand for a particular power system while maintaining the security of the system operation. The production costs of electrical power systems may depend on the situation, but in general they normally mean to the cost of generating power at each generating unit of power plants. This operation is subjected to keep each component in the power system within its desired operation range at steadystate. This will include maximum and minimum outputs for generators, maximum MVA flows of power transmission lines and transformers, as well as system bus voltages within specified ranges.

It has taken over decades to develop efficient algorithms for its solution because it is a very large, nonlinear mathematical programming problem. Many different mathematical approaches have been applied for seeking its solution. The methods discussed in the literature use one of the following five methods [2]. They are i) lambda iteration method as found in economic dispatch problem solving, ii) gradient method, iii) Newtons method, iv) linear programming and v) interior point method. Apart from analytical approaches, there also exist intelligent search methods.

Intelligent search methods (e.g. simulated annealing [3], genetic algorithm [4], evolutionary programming [5], particle swarm optimization [6]-[9], etc) have been recently released for the optimal power flow problem. The genetic algorithm (GA) based solution methods are found to be most suitable because of their ability of simultaneous multidimensional search for optimal solutions. They are wellknown and widely used at the beginning period of solving the optimal power flow problems based on intelligent search methods. However, in recently year, The ABC [10] is applied to solve optimal power flow. For economic dispatch problem, the results show that the ABC approach is able to obtain higher quality solutions efficiently and faster computational time than the conventional approaches. Also, DE [11] is applied to IEEE 30-bus test system for solving optimal power flow. The results reported are proficiency of methodology over other techniques and the DE solution give faster convergence than other existing techniques.

This paper proposes an application of swarm intelligences to solve optimal power flow problems. The

Manuscript received on July 31, 2010 ; revised on September 1, 2010.

This paper is extended from the paper presented in ECTI-CON 2010.

^{1,2,3,4,5} The authors are with Power System Research Unit, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000, E-mail: phetchty@hotmail.com, Uthen.leeton@gmail.com and Thanatchai@gmail.com

controllable system quantities are generator MW, controlled voltage magnitude, reactive power injection from reactive power sources and transformer tap setting. The objective used herein is to minimize the overall power transmission losses by optimizing the control variables within their limits. Therefore, no violation on other quantities (e.g. MVA flow of transmission lines, load bus voltage magnitude, generator MVAR) occurs in normal system operating conditions. A six-bus [12] and IEEE 30-bus test system are employed for test. The results obtained from various swarm intelligence techniques are compared.

This paper organizes a total of five sections. Next section, Section two, illustrates optimal power flow problems with corresponding mathematical expressions of its objective and various practical constraints. Section three gives the brief of four swarm intelligences (GA, PSO, ABC and DE) for comparative purposes. It also provides the algorithm procedure, described step-by-step. Section four is the simulation results and discussion. Conclusion remark is in Section five.

2. OPTIMAL POWER FLOW PROBLEMS

2.1 Problem Formulation

The optimal power flow problem is a nonlinear optimization problem. It consists of a nonlinear objective function defined with nonlinear constraints. The optimal power flow problem requires the solution of nonlinear equations, describing optimal and/or secure operation of power systems. The general optimal power flow problem can be expressed as a constrained optimization problem as follows.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && f(x) \\ &\text{Subject to} && g(x) = 0, \text{equality constraints} \\ &&& h(x) \leq 0, \text{inequality constraints} \end{aligned}$$

By converting both equality and inequality constraints into penalty terms and therefore added to form the penalty function as described in (1) and (2).

$$P(x) = f(x) + \Omega(x) \quad (1)$$

$$\Omega(x) = \rho \{g^2(x) + [\max(0, h(x))]^2\} \quad (2)$$

Where $P(x)$ is the penalty function
 $\Omega(x)$ is the penalty term
 ρ is the penalty factor

By using a concept of the penalty method [13], the constrained optimization problem is transformed into an unconstrained optimization problem in which the penalty function as described above is minimized.

2.2 Objective Function

Although most of optimal power flow problems involve the total production cost of the entire power

system, in some cases some different objective may be chosen. In this paper, the power transmission loss function is set as the objective function. The power transmission loss can be expressed as given in (3).

$$F_{loss} = \sum_{i=1}^{N_L} g_{i,j} \{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad (3)$$

Where: V_i is the voltage magnitude at bus i
 V_j is the voltage magnitude at bus j
 $g_{i,j}$ is the conductance of line $i - j$
 δ_i is the voltage angle at bus i
 δ_j is the voltage angle at bus j
 N_L is the total number of transmission lines
 F_{loss} is the power loss function

2.3 System Constraints

The controllable system quantities are generator MW, controlled voltage magnitude, reactive power injection from reactive power sources and transformer tapping. The objective use herein is to minimize the power transmission loss function by optimizing the control variables within their limits. Therefore, no violation on other quantities (e.g. MVA flow of transmission lines, load bus voltage magnitude, generator MVAR) occurs in normal system operating conditions. These are system constraints to be formed as equality and inequality constraints as shown below.

1) Equality constraint: Power flow equations

$$P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (4)$$

$$Q_{G,i} - Q_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (5)$$

Where: $P_{G,i}$ is the real power generation at bus i
 $Q_{G,i}$ is the reactive power generation at bus i
 $P_{D,i}$ is the real power demand at bus i
 $Q_{D,i}$ is the reactive power demand at bus i
 N_B is the total number of buses
 $\theta_{i,j}$ is the angle of bus admittance element i, j
 $Y_{i,j}$ is the magnitude of bus admittance element i, j

2) Inequality constraint: Variable limitations

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

$$T_i^{min} \leq T_i \leq T_i^{max} \quad (7)$$

$$Q_{comp,i}^{min} \leq Q_{comp,i} \leq Q_{comp,i}^{max} \quad (8)$$

$$P_{G,i}^{min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{max} \quad (9)$$

Where: V_i^{min}, V_i^{max} are upper and lower limits of voltage magnitude at bus i
 T_i^{min}, T_i^{max} are upper and lower limits of tap position of transformer i
 $Q_{comp,i}^{min}, Q_{comp,i}^{max}$ are upper and lower limits of reactive power source i
 $P_{G,i}^{min}, P_{G,i}^{max}$ are upper and lower limits of power generated by generator i

The penalty function can be formulated as follows.

$$P(x) = F_{loss} + \Omega_P + \Omega_Q + \Omega_C + \Omega_T + \Omega_V + \Omega_G \quad (10)$$

Where:

$$\Omega_P = \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |V_y| \cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) \right\}^2 \quad (11)$$

$$\Omega_Q = \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ Q_{G,i} - Q_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |V_y| \sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) \right\}^2 \quad (12)$$

$$\Omega_C = \rho \sum_{i=1}^{N_G} \{ \max(0, Q_{comp,i} - Q_{comp,i}^{max}) \}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_G} \{ \max(0, Q_{comp,i}^{min} - Q_{comp,i}) \}^2 \quad (13)$$

$$\Omega_T = \rho \sum_{i=1}^{N_r} \{ \max(0, T_i - T_i^{max}) \}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_r} \{ \max(0, T_i^{min} - T_i) \}^2 \quad (14)$$

$$\Omega_V = \rho \sum_{i=1}^{N_B} \{ \max(0, V_i - V_i^{max}) \}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_B} \{ \max(0, V_i^{min} - V_i) \}^2 \quad (15)$$

$$\Omega_G = \rho \sum_{i=1}^{N_G} \{ \max(0, P_{G,i} - P_{G,i}^{max}) \}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_G} \{ \max(0, P_{G,i}^{min} - P_{G,i}) \}^2 \quad (16)$$

N_G is the total number of generators

N_C is the total number of reactive power sources

N_T is the total number of transformers

3. SWARM INTELLIGENT SEARCH METHODS

3.1 Genetic Algorithm (GA)

There exist many different approaches to adjust the control parameters. The GA is well-known [14] there exist a hundred of works employing the GA technique to optimize the system objective in various forms. The GA is a stochastic search technique that leads a set of population in solution space evolved using the principles of genetic evolution and natural selection, called genetic operators e.g. crossover, mutation, etc. With successive updating new generation, a set of updated solutions gradually converges to the real solution. Because the GA is very popular and widely used in most research areas where an intelligent search technique is applied, it can be summarized briefly as shown in the flowchart in figure 1 [15].

In this paper, the GA is selected to build up an algorithm to solve optimal power flow problems (all generation from available generating units). To reduce programming complication, the Genetic Algorithm (GADS TOOLBOX in MATLAB [16]) is employed to generate a set of initial random parameters. With the searching process, the parameters are adjusted to give the best result.

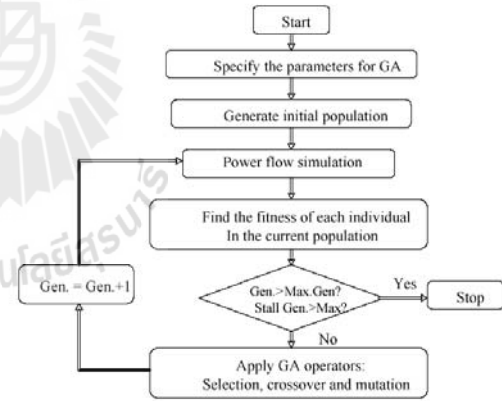


Fig.1: Flowchart of the GA procedure

3.2 Particle Swarm Optimization (PSO)

Kennedy and Eberhart developed a particle swarm optimization algorithm based on the behavior of individuals (i.e., particles or agents) of a swarm [17]. Its roots are in zoologists modeling of the movement of individuals (i.e., fish, birds, and insects) within a group. It has been noticed that members of the group seem to share information among them to lead to increased efficiency of the group. The particle swarm optimization algorithm searches in parallel using a

group of individuals similar to other AI-based heuristic optimization techniques. Each individual corresponds to a candidate solution to the problem. Individuals in a swarm approach to the optimum through its present velocity, previous experience, and the experience of its neighbors. In a physical n -dimensional search space, the position and velocity of individual i are represented as the velocity vectors. Using these information individual i and its updated velocity can be modified under the following equations in the particle swarm optimization algorithm. The procedure of the particle swarm optimization can be summarized in the flow diagram of figure 2.

$$x_i^{k+1} = x_i^{(k)} + v_i^{(k+1)} \quad (17)$$

$$v_i^{k+1} = v_i^k + \alpha_i (x_i^{lbest} - x_i^{(k)}) + \beta_i (x_i^{gbest} - x_i^{(k)}) \quad (18)$$

Where

$x_i^{(k)}$ is the individual i at iteration k

$v_i^{(k)}$ is the updated velocity of individual i at iteration k

α_i, β_i are uniformly random numbers between $[0,1]$

x_i^{lbest} is the individual best of individual i

x^{gbest} is the global best of the swarm

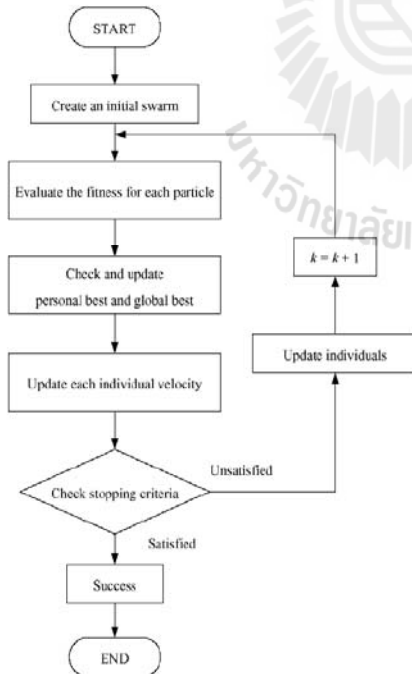


Fig. 2: Flowchart of the PSO procedure

3.3 Artificial Bee Colony (ABC)

Artificial bees colony [18-20] was proposed by Karaboga for solving numerical optimization problems. It simulates the intelligent behavior of honey bee swarms. In artificial bees algorithm, the colony of artificial bees contains three groups of bees: employed bees, and unemployed bees: onlookers and scouts. First half of the colony consists of employed artificial bees and the second half constitutes the artificial onlookers. The employed bee whose food source has been exhausted becomes a scout bee. The position of a food source represents a possible solution to the optimization problem and the nectar amount of a food source corresponds to the quality or fitness of the associated solution. The number of the employed bees is equal to the number of food sources, each of which also represents a site, being exploited at the moment or to the number of solutions in the population. In artificial bees algorithm, the steps given below are repeated until a stopping criteria is satisfied.

1) Initial phase

Initial population of artificial bee swarms is created randomly by the following formula.

$$x_{ij} = x_{min,j} + rand(0,1) \times (x_{max,j} - x_{min,j}) \quad (19)$$

2) Employed bees phase

Each employed bee determines a food source representing a site. Each employed bee shares its food source information with onlookers waiting in the hive and then each onlooker selects a food source site depending on the information taken from employed bees. To simulate the information sharing by employed bees in the dance area, probability values are calculated for the solutions by means of their fitness values using the following equation.

$$P_j = \frac{f_{iti}}{\sum_{j=1}^{SN} f_{iti}} \quad (20)$$

$$f_{iti} = \begin{cases} \frac{1}{1+f_i} & , f_i \geq 0 \\ 1 + |f_i| & , f_i < 0 \end{cases} \quad (21)$$

The fitness values might be calculated using the above definition as expressed in (21).

3) Onlooker bees phase

Onlookers are placed onto the food source sites by using a fitness based selection technique, for example roulette wheel selection method.

4) Scout bees phase

Every bee swarm has scouts that are the swarms explorers. The explorers do not have any guidance while looking for food. In case of artificial bees, the artificial scouts might have the fast discovery of the group of feasible solutions. In the searching algorithm, the artificial employed bee whose food source nectar has been exhausted or the profitability of the

food source drops under a certain threshold level is selected and classified as the artificial scout. The classification is controlled by “abandonment criteria” or “limit”. If a solution representing a food source position is not improved until a predetermined number of trials, then that solution is abandoned by its employed bee and the employed bee becomes a scout. The procedure of the artificial bees algorithm can be summarized in the flow diagram of figure 3.

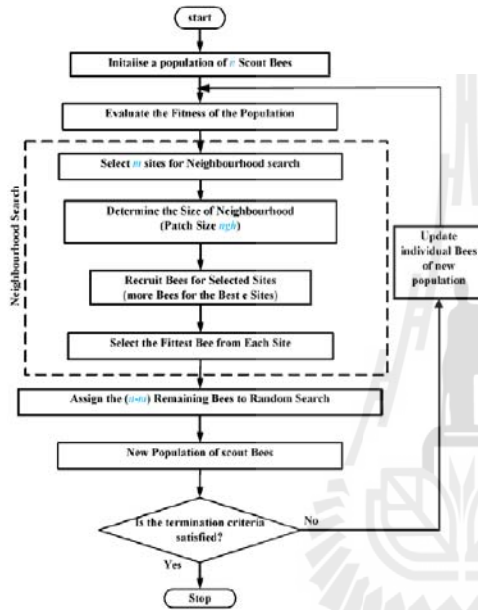


Fig.3: Flowchart of the artificial beecolony

3.4 Differential Evolution (DE)

Differential Evolution (DE) [21-22] is a recently developed evolutionary computation technique. DE is an extremely powerful yet simple evolutionary algorithm that improves a population of individuals over several generations through the operators of mutation, crossover and selection for global optimization introduced by Price and Storn. Differential evolution presents great convergence characteristics and requires few control parameters which remain fixed throughout the optimization process and need minimum tuning. DE differs from other EA in the mutation and recombination phase. Unlike stochastic techniques such as genetic algorithm and evolutionary strategy where perturbation occurs in accordance with a random quantity, DE uses weighted differences between solution vectors to perturb the population. It has a minimum number of EA control parameters, which can be efficiently tuned.

DE uses a population P of size N_p , composed of floating point encoded individuals that evolve over

G generations to reach an optimal solution. Each individual X_i is a vector that contains as many parameters as the problem decision variables D . The population size N_p is an algorithm control parameter selected by the user which remains constant throughout the optimization process.

$$P^G = [X_1^G, \dots, X_{N_p}^G] \quad (22)$$

$$X_i^G = [X_{1,i}^G, \dots, X_{D,i}^G]^T, i = 1, \dots, N_p \quad (23)$$

The optimization process in Differential Evolution is carried out by three basic genetic operations: Mutation, Crossover and Selection. The algorithm starts by creating an initial population of N_p vectors. Random values are assigned to each decision parameter in every vector according to:

$$X_{j,i}^0 = X_j^{min} + \eta_j(X_j^{max} - X_j^{min}) \quad (24)$$

Where:

X_j^{min} and X_j^{max} are the lower and upper bounds of the j^{th} decision parameter.

η_i is a uniformly distributed random number within $[0,1]$ generated a new for each value of j

$X_{j,i}^0$ is the j^{th} parameter of the i^{th} individual of the initial population

The mutation operator creates mutant vectors X_i' by perturbing a randomly selected vector (X_a) with difference of two other randomly selected vectors (X_b and X_c)

$$X_i^G = X_a^G + F(X_b^G - X_c^G), i = 1, \dots, N_p \quad (25)$$

Where:

X_a, X_b, X_c are randomly chosen vectors $\in \{1, \dots, N_p\}$ and $a \neq b \neq c \neq i$.

X_a, X_b, X_c are selected anew for each parent vector. The scaling constant (F) is an algorithm control parameter used to adjust the perturbation size in the mutation operator and improve algorithm convergence. The crossover operation generates trial vectors (X_i'') by mixing the parameters of the mutant vectors (X_i') with the target vectors (X_i) according to a selected probability distribution.

$$X_{j,i}'' = \begin{cases} X_{j,i}' & \text{if } \eta_i' \leq C_R \\ X_{j,i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

The crossover constant C_R is an algorithm parameter that controls the diversity of the population and aids the algorithm to escape from local optima. The new generation population is obtained by selection operator that chooses between the trial vectors and their predecessors (target vectors) those individuals that present a better fitness or are more optimal according to

$$X_i^{G+1} = \begin{cases} X_i'^{G}, & f(X_i'^{G}) \leq f(X_i^G), i = 1, \dots, N_p \\ X_i^G, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

This optimization process is repeated for several generations, allowing individuals to improve their fitness as they explore the solution space in search for optimal values.

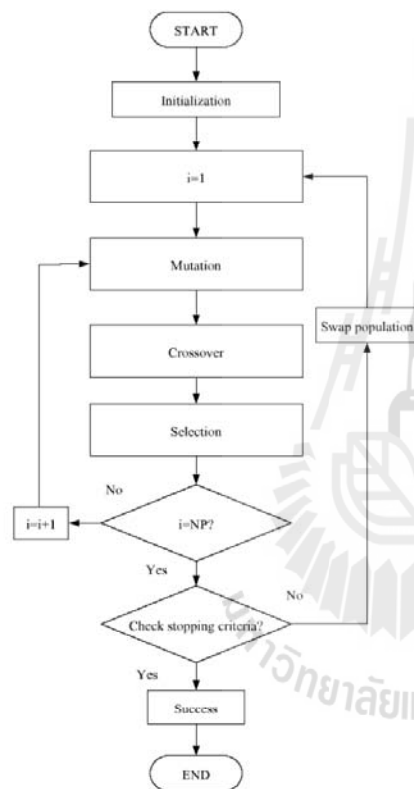


Fig.4: Flowchart of the differential evolution algorithm

DE has three essential control parameters: the scaling factor (F), the crossover constant (CR) and the population size (NP). The scaling factor is a value in the range (0, 2] that controls the amount of perturbation in the mutation process. The crossover constant is a value in the range [0, 1] that controls the diversity of the population. The population size determines the number of individuals in the population and provides the algorithm enough diversity to search the solution space. The procedure of the differential evolution algorithm can be summarized in the flow diagram as shown in figure 4.

4. SIMULATION RESULTS

To verify the effectiveness and performance of the swarm intelligent optimization, 6-bus and IEEE 30-bus test power systems were used for test. Information of the 6-bus test system was given in [12]. The simulations were performed using MATLAB software [16]. The test was carried out by solving the optimal power flow problem of the power loss objective. Variable limits given in Table 1 were used as system constraints. For comparison purposes, genetic algorithm, particle swarm optimization, artificial bees algorithm and differential evolution were applied to solve the test system with various cases. Each method was challenged by solving given optimal power flow problems of 30 trials randomly. Minimum, average, maximum and standard deviation of the 30 trial solutions for the 6-bus test system obtained by each method were evaluated and shown in Table 2. Table 3 showed the comparison of CPU time spent by each approach. The optimal control variables obtained by each method were shown in Tables 4-7. All test cases were simulated by using the same computer which was an Intel®, Core 2 Duo, 2.4 GHz, 3.0 GB RAM.

Table 1: Variable limit used for optimal power flow for the 6-bus test system

Variable	Limit	
	Min.	Max
V1 - V6 (p.u.)	0.90	1.1
T1, T2 (p.u.)	0.90	1.1
Q1, Q2 (Mvar)	0	50
PG1 (MW)	25	80
PG2 (MW)	25	80

Table 2: OPF solutions obtained by using GA, PSO ABC and DE for the 6-bus test system

Method	Power transmission loss (MW)			
	Minimum	Average	Maximum	Deviation
GA	6.7747	6.9705	7.5292	0.1521
PSO	6.7486	6.8425	7.1517	0.0759
ABA	6.7361	6.7361	6.7364	0.0001
DE	6.7361	6.7361	6.7368	0.0001

Table 3: Computational time to obtain optimal solutions by GA, PSO, ABC and DE for the 6-bus system

Method	Computational Time (s)			
	Minimum	Average	Maximum	Deviation
GA	6.91	8.05	9.79	0.7
PSO	17.93	136.11	516.49	93.20
ABA	7.40	7.52	7.74	0.0597
DE	3.07	3.10	3.22	0.0286

The results showed that the ABC and the DE optimal methods gave the best power flow solution when compared with those obtained by the GA and the PSO. For the 6-bus test system, the average

power loss solutions were 6.9705 MW, 6.8425MW, 6.7361 and 6.7361MW for the GA, PSO, ABC and DE methods, respectively. However, when considering the minimum power loss, the ABC and DE were the two methods that can find the least loss function of 6.7361 MW. The standard deviation of the solutions obtained by the GA, PSO, ABC and DE were 0.1521, 0.0759, 0.0001 and 0.0001 respectively. The CPU times spent by each method to find the optimal solution showed that the DE consumed the least computational time effort. In addition, the DE method gave the least power transmission loss and spent the least computational time to reach the best solution. As a result, the power loss of the entire system can be improved with 65% reduction.

The voltage profile of the base case before improvement was set to be lower than the specified range. After adjust the control variables to their optimal values the system voltage profile can be resumed to the operating value within the specified range as shown in figure 5. Table 8 showed the parameter setting of each method used for conducting the test. Also, figure 8 gave the convergence characteristic of the solutions obtained by using these methods.

Table 4: Optimal solution by the PSO for the 6-bus system

Control Variables	Bus	Computational Time(s)				Optimal
		Mean	S.D.	Max.	Min.	
Generator (p.u.)	V1	6	1.1	0	1.1	1.1
	V2	5	1.1	0	1.1	1.1
Reactive Power (Mvar)	FG2	5	27.9	1.6	32	25
	Q1	4	29.7	6	47.1	16.9
Transformer Tap (p.u.)	T1	3.4	0.98	0.09	1.06	0.994
	T2	1.2	1.02	0.08	1.07	0.997
Computational Time (s)		136.11	29.2	516.49	17.93	181.30952
Power Transmission Loss (MW)		6.84	0.08	7.15	6.75	6.7485
Power Loss Saving(%)		65.15	-	65.55	65.61	65.61

Table 5: Optimal solution by the GA for the 6-bus system

Control Variables	Bus	Computational Time(s)				Optimal
		Mean	S.D.	Max.	Min.	
Generator (p.u.)	V1	6	1.09	0.01	1.10	1.06
	V2	5	1.09	0.01	1.10	1.05
Reactive Power (Mvar)	FG2	5	29.1	3.4	42.9	25.0
	Q1	4	28.1	4.7	38.9	15.9
Transformer Tap (p.u.)	T1	3.4	0.99	0.02	1.04	0.94
	T2	1.2	1.03	0.02	1.08	0.96
Computational Time (s)		8.05	0.70	9.79	6.91	7.1468
Power Transmission Loss (MW)		6.97	0.15	7.53	6.77	6.7747
Power Loss Saving(%)		64.45	-	61.63	65.45	65.45

Table 6: Optimal solution by the ABC for the 6-bus system

Control Variables	Bus	Computational Time(s)				Optimal
		Mean	S.D.	Max.	Min.	
Generator (p.u.)	V1	6	1.1	0	1.1	1.1
	V2	5	1.1	0	1.1	1.1
Reactive Power (Mvar)	FG2	5	27.5	0.0481	27.72	27.48
	Q1	4	27.17	0.1356	27.65	26.84
Transformer Tap (p.u.)	T1	3.4	0.9965	0.0002	0.9969	0.9959
	T2	1.2	1.0351	0.0009	1.0356	1.0337
Computational Time (s)		7.52	0.0597	7.74	7.40	7.49
Power Transmission Loss (MW)		6.7361	1.91	6.7364	6.7361	6.7361
Power Loss Saving(%)		65.67	-	65.67	65.67	65.67

Table 7: Optimal solution by the DE for the 6-bus system

Control Variables	Bus	Computational Time(s)				Optimal
		Mean	S.D.	Max.	Min.	
Generator (p.u.)	V1	6	1.1	0	1.1	1.1
	V2	5	1.1	0	1.1	1.1
Reactive Power (Mvar)	FG2	5	27.49	0.0167	27.61	27.43
	Q1	4	27.15	0.049	27.5	26.87
Transformer Tap (p.u.)	T1	3.4	0.9965	0.0001	0.9972	0.9963
	T2	1.2	1.0352	0.0003	1.0355	1.0338
Computational Time (s)		3.1	0.0286	3.22	3.07	3.12
Power Transmission Loss (MW)		6.7361	0.0001	6.7363	6.7361	6.7361
Power Loss Saving(%)		65.67	-	65.67	65.67	65.67

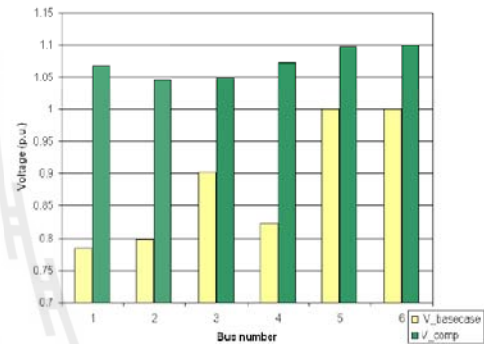


Fig.5: Voltage profiles for the 6-bus test system

Table 8: Variable limit used for optimal power flow for the 6-bus test system

Parameter	GA	PSO	ABC	DE
Population size(N_p)	30	30	30	30
Maximum iteration	200	200	200	200
Crossover Probability	0.85	-	-	0.895
Mutation Probability	0.0058	-	-	-
Maximum error	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}

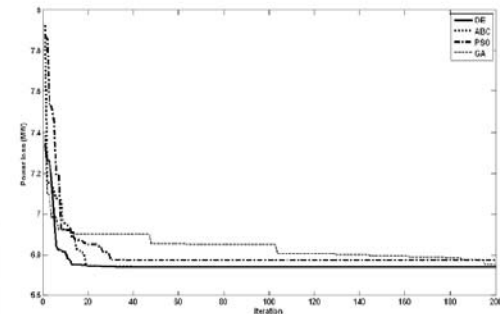


Fig.6: Convergence characteristics of each method for the 6-bus test system

The second test system to verify the effectiveness and performance of the swarm intelligences was the standard IEEE 30-bus test power system. The test was carried out by solving the optimal power flow problem of the power loss objective with variable limits used as system constraints given in Table 9. For comparison purposes, genetic algorithm, particle swarm optimization, artificial bee colony and differential evolution were applied to solve the test case of this test system. Each method was challenged by solving a given optimal power flow problem of 30 trials. Minimum, average, maximum and standard deviation of the 30 trial solutions for the 30-bus system obtained by each method were evaluated and shown in Table 10. Table 11 showed the comparison of CPU time spent by each approach. The optimal control variables obtained by each method were shown in Tables 12-15. All test cases were simulated by using the same computer which explained previously.

Table 9: Variable limit used for optimal power flow for the 30-bus test system

Variable	Limits	
	Min.	Max.
V1 to V30 (p.u.)	0.9	1.1
T1 to T7 (p.u.)	0.9	1.1
Q1 to Q4 (Mvar)	0	50
Q1 to Q4 (Mvar)	15	80

Table 10: OPF solutions obtained by using GA, PSO, ABC and DE for the 30-bus test system

Method	Power transmission losses (MW)			
	Minimum	Average	Maximum	Deviation
GA	10.90	15.95	31.32	5.83
PSO	13.55	17.72	22.66	2.39
ABC	11.74	15.74	19.34	2.08
DE	10.44	10.51	11.16	0.14

Table 11: Computational time to obtain optimal solutions by GA, PSO, ABC and DE for the 30-bus system

Method	Power transmission losses (MW)			
	Minimum	Average	Maximum	Deviation
GA	100.67	531.63	732.33	192.67
PSO	691.40	2335.84	4066.20	914.01
ABC	174.70	974.60	2366.30	542.20
DE	205.68	206.89	207.30	0.2786

The results showed that the DE-based optimal power flow method gave the best result when compared with those obtained by the GA, PSO and ABC. For the IEEE 30-bus test system, the average power loss solutions were 15.95 MW, 17.72 MW, 15.74 and 10.51 MW for the GA, PSO, ABC and DE, respectively. However, when considering the minimum power loss, the DE was the method that can find the

Table 12: Optimal solution by the GA for the 30-bus system

Control Variables	Bus	Statistic					
		Mean	S.D.	Min	Max.	Optimal	
Generator (pu)	V23	23	1.03	0.03	0.93	1.07	1.0363
	V26	26	1.07	0.04	0.91	1.10	1.0862
	V27	27	1.02	0.04	0.91	1.09	1.0475
	V28	28	1.07	0.04	0.93	1.10	1.0993
	V29	29	1.05	0.05	0.91	1.09	1.0914
	V30	30	1.06	0.05	0.91	1.10	1.0979
	PG25	25	36.2	15.0	15.4	75.1	39.5686
	PG26	26	30.2	7.1	15.1	36.7	15.2307
	PG27	27	41.8	15.6	17.8	73.6	28.5806
	PG28	28	61.2	17.5	19.5	80.0	77.741
Reactive Power (Mvar)	PG29	29	20.6	6.9	15.0	37.4	15.4899
	Q1	2	26.0	9.0	20.1	55.8	22.1001
	Q2	6	33.0	9.0	20.6	54.4	39.4685
	Q3	10	28.5	7.6	20.2	52.9	36.3212
Transformer Tap (p.u.)	Q4	18	25.0	7.4	20.0	50.1	20.0381
	T1	4-12	0.99	0.04	0.93	1.09	0.9865
	T2	6-9	0.96	0.05	0.91	1.07	0.9883
	T3	6-10	0.99	0.06	0.90	1.09	0.9443
	T4	9-11	0.97	0.05	0.90	1.07	0.9479
	T5	9-10	0.95	0.05	0.90	1.09	0.9067
	T6	12-13	0.98	0.05	0.91	1.10	0.908
	T7	28-27	1.07	0.04	0.92	1.10	1.0992
	Computational Time (s)	551.63	192.67	100.67	732.33	644.91	
	Power Transmission loss (MW)	15.95	5.83	10.90	31.32	10.90	
	Real Power saving (%)	60.94	-	73.30	23.27	73.30	

Table 13: Optimal solution by the PSO for the 30-bus system

Control Variables		Bus	Mean	S.D	Statistic		
					Min	Max	Optimal
Generator (pu)	V25	25	1.02	0.04	1.00	1.10	1.0597
	V26	26	1.03	0.05	1.00	1.10	1.0891
	V27	27	1.00	0.04	0.90	1.10	1.0596
	V28	28	1.03	0.05	1.00	1.10	1.0593
	V29	29	1.02	0.05	0.90	1.10	1.0794
	V30	30	1.03	0.05	1.00	1.10	1.0993
	PG25	25	38.1	14.9	16.7	71.6	25.0614
	PG26	26	18.8	4.3	15.0	29.6	16.0168
	PG27	27	41.3	15.1	18.6	73.3	43.078
	PG28	28	65.0	15.6	20.4	79.1	75.2901
Reactive Power (Mvar)	PG29	29	19.8	5.1	15.0	28.9	18.6251
	Q1	2	38.3	10.0	20.2	52.1	39.2182
	Q2	6	40.7	10.0	22.3	55.2	43.3492
	Q3	10	37.7	10.3	20.4	57.4	49.7789
Transformers Tap (p.u.)	Q4	18	34.7	9.8	20.5	54.9	32.4971
	T1	4-12	1.01	0.04	0.94	1.10	0.9739
	T2	6-9	1.00	0.05	0.90	1.08	1.0272
	T3	6-10	1.00	0.05	0.90	1.09	0.9042
	T4	9-11	1.00	0.05	0.90	1.10	1.0143
	T5	9-10	0.98	0.05	0.91	1.10	1.0131
	T6	12-13	1.00	0.05	0.92	1.10	1.0334
Computational Time (s)			2335.8	914.01	691.40	4066.20	4066.20
Power Transmission loss (MW)			17.12	2.39	12.55	22.66	11.55
Real Power saving (%)			58.06	-	66.81	44.48	66.81

Table 14: Optimal solution obtained by the ABC for the 30-bus system

Control Variables		Bus	Statistic				
			Mean	S.D.	Min.	Max.	Optimal
Generator (pu)	V25	25	1.0341	0.0285	0.9749	1.0781	1.0522
	V26	26	1.0835	0.02124	1.0426	1.1	1.0775
	V27	27	1.0254	0.02899	0.9689	1.0675	1.0557
	V28	28	1.0736	0.04591	0.9337	1.1	1.1
	V29	29	1.0723	0.03316	0.985	1.1	1.0967
	V30	30	1.0759	0.0255	1.015	1.1	1.1
	PG25	25	36.070	13.7243	15	77.83	23.34
	PG26	26	22.6	4.9974	15	33.68	17.32
	PG27	27	41.6	15.5716	16.89	72.313	49.36
	PG28	28	54.20	18.601	26.44	80.00	69.69
Reactive Power (Mvar)	Q19	29	26.67	7.82734	15	39.13	16.93
	Q9	3	12.74	11.4446	2.2485	48.05	6.5982
	Q2	6	40.94	13.7858	0	50	50
	Q3	10	22.25	13.4554	0	48.52	20.61
Transformer Tap (p.u.)	Q4	18	22.89	8.93215	1.5897	44.15	18.8
	T1	4-12	0.9924	0.04706	0.9188	1.1	0.981
	T2	6-9	0.9832	0.05316	0.9	1.1	0.9773
	T3	6-10	0.9677	0.05069	0.9	1.1	0.9203
	T4	9-11	1.0120	0.07139	0.9	1.1	1.0618
	T5	9-10	0.9454	0.03876	0.9	1.0313	0.9725
	T6	12-13	1.0361	0.08142	0.9	1.1	1.1
Computational Time (s)		974.5	542.303	174.7	2366.3	1042.6	
Power Transmission loss (MW)		15.738	2.08755	11.74	19.345	11.740	
Real Power saving (%)		61.44		71.53	52.65	71.53	

least power loss function of 10.44 MW. The standard deviation of the solutions obtained by the GA, PSO, ABC and DE were 5.83, 2.39, 2.08 and 0.14 respectively. The CPU times spent by each method to find the optimal solution showed that the DE consumed the least computational time effort. In addition, the DE method gave the least power transmission loss and spent the least computational time to reach the best solution. As a result, the power loss of the entire system can be improved with 60-70% reduction.

The voltage profile of the base case before improvement was set to be lower than the specified range. After adjust the control variables to their optimal values the system voltage profile can be resumed to the operating value within the specified range as shown in figure 9. Table 16 showed the parameter setting of each method used for conducting the test. Also, figure 10 gave the convergence characteristics of the solutions obtained by using these methods.

Table 15: Optimal solution by the DE for the 30-bus system

Control Variables	Bus	Statistic					
		Mean	S.D.	Min.	Max.	Optimal	
Generator (pu)	V25	25	1.073803	0.001601	1.0712	1.0801	1.0739
	V26	26	1.099803	0.000546	1.0975	1.1	1.1
	V27	27	1.06865	0.001273	1.0644	1.071	1.0689
	V28	28	1.099983	3.79E-05	1.0999	1.1	1.1
	V29	29	1.09954	0.001044	1.0941	1.1	1.1
	V30	30	1.099883	0.00034	1.0984	1.1	1.1
	PG15	25	35.61541	3.067004	53.4197	51.315	34.9661
	PG16	26	15.00397	0.005512	15	15.0232	15
	PG17	27	30.55335	3.019784	15.0045	32.8194	31.1405
	PG18	28	79.39145	0.021448	79.8825	80	79.9981
Reactive Power (Mvar)	PG19	29	15.00401	0.007645	15	15.0332	13.0001
	Q1	2	7.862173	8.710024	0	49.9982	5.8186
	Q2	6	43.46954	11.83968	0.005	49.9999	49.975
	Q3	10	29.02644	14.9968	0	49.9996	26.9473
Transformer Tap (p.u.)	Q4	18	18.82517	8.800328	17.3027	21.4009	18.9169
	T1	4-12	0.99989	0.003185	0.9888	1.0077	1
	T2	6-9	0.983317	0.049532	0.9	1.0528	0.9693
	T3	6-10	1.031557	0.084306	0.9	1.1	1.0992
	T4	9-11	0.937193	0.035572	0.9	0.9985	0.9
	T5	9-16	0.917743	0.01972	0.9	0.9481	0.9036
	T6	12-13	0.98559	0.06828	0.9	1.0842	0.9
Transformer T7 (s)		27	1.093153	0.036485	0.9	1.1	1.1
Computational Time (s)		206.8951	0.278618	205.6863	207.3049	206.8336	
Power Transmission loss (MW)		10.51208	0.147691	10.4449	11.1629	10.4449	
Real Power saving (%)		73.99286657	-	74.15907966	72.38273132	74.15907	

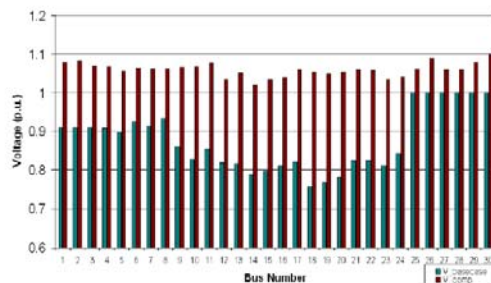


Fig.7: Voltage profiles for the 30-bus test system

Table 16: Parameter setting of each method for the 30-bus

Algorithm	GA	PSO	ABC	DE
Population size (N_p)	30	30	30	30
Maximum iteration	500	500	500	500
Crossover Probability	0.85	-	-	0.895
Mutation Probability	0.0053	-	-	-
Maximum error	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}

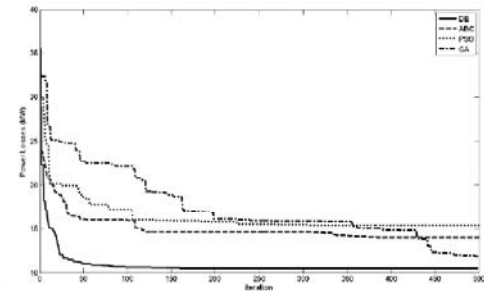


Fig.8: Convergence characteristics of each method for the 30-bus test system

5. CONCLUSION

Solution methods for solving optimal power flow problems with the power transmission loss objective are described in this paper. Some efficient search methods in forms of swarm intelligences (e.g. genetic algorithm, particle swarm optimization, artificial bee algorithm and differential evolution) were employed. A 6-bus test system and the standard IEEE 30-bus power system were used for benchmarking. The results showed that a set of optimal solutions with respect to the power transmission loss objective can be efficiently solved by using the swarm intelligences. As a result, the DE and ABC methods showed satisfactory performances of finding the optimal power flow solutions. In these two test systems, the power loss can be minimized and the power losses of the entire network can be improved by 65% power loss reduction.

References

- [1] M.R. AlRashidi and M.E. El-Hawary, "Hybrid Particle Swarm Optimization Approach for Solving the Discrete OPF Problem Considering the Valve Loading Effects," *IEEE Transactions on Power Systems*, Issue 4, Vol. 22, pp.2030-2038, 2007.
- [2] B. Zhao, C.X. Guo and Y.J. Cao, "Improved particle swarm optimization algorithm for OPF problems," *IEEE-PES Power Systems Conference and Exposition*, Vol. 1, pp.233-238, 10-13 October 2004.
- [3] C.A. Roa-Sepulveda and B.J. Pavez-Lazo, "A solution to the optimal power flow using simulated

- annealing," *Power Tech Proceedings 2001*, Vol. 2, pp. 5, 10-13 September 2001.
- [4] R.N. Banu and D. Devaraj, "Optimal Power Flow for Steady state security enhancement using Genetic Algorithm with FACTS devices," *3rd International Conference on Industrial and Information Systems*, pp. 1 6, 8-10 December 2008.
 - [5] L.L. Lai and J.T. Ma, "Power flow control in FACTS using evolutionary programming," *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 10, 29 November-1 December 1995.
 - [6] C. Gonggui and Y. Junjie, "A new particle Swarm Optimization Solution to Optimal reactive power Flow Problem," *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp.1 4, 27-31 March 2009.
 - [7] L. Weibing, L. Min and W. Xianjia, "An improved particle swarm optimization algorithm for optimal power flow," *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference 2009*, pp. 2448 2450, 17-20 May 2009.
 - [8] W. Cui-Ru, Y. He-Jin, H. Zhi-Qiang, Z. Jiang-Wei and S. Chen-Jun, "A modified particle swarm optimization algorithm and its application in optimal power flow problem," *International Conference on Machine Learning and Cybernetics 2005*, pp. 2885 2889, 18-21 August 2005.
 - [9] S. M. Kumari, G. Priyanka and M. Sydulu, "Comparison of Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization for Optimal Power Flow Including FACTS devices," *IEEE Power Tech 2007*, pp. 1105 - 1110, 1-5 July 2007.
 - [10] C. Chokpanyasuwan, S. Anantasatei, S. Pothiya, W. Pattaraprakom and P. Bhasaputra, "Honey Bee Colony Optimization to solve Economic Dispatch Problem with Generator Constraints," *ECTI-CON 2009, 6th International Conference*, Vol. 1, pp. 200 203, 2009.
 - [11] S. Anantasate, C.Chokpanyasuwan and P. Bhasaputra, "Optimal Power Flow by using Bees Algorithm," *ECTI Conference*, pp.459 463, 2010.
 - [12] U. Leeton, D. Uthitsunthorn, U. Kwannetr, N. Sinsuphun and T. Kulworawanichpong, "ower Loss Minimization Using Optimal Power Flow Based on Particle Swarm Optimization," *ECTI Conference*, pp.469 473, 2010.
 - [13] P. Dutta and A. K. Sinha, "Voltage Stability Constrained Multi-objective Optimal Power Flow using Particle Swarm Optimization," *1st International Conference on Industrial and Information Systems*, pp. 161 166, 8-11 August 2006.
 - [14] Z. Haibo, Z. Lizi and M. Fanling, "Reactive power optimization based on genetic algorithm," *International Power Conference on Power System Technology*, pp.1448 1453, 18-21 August 1998.
 - [15] K. Somsai, A. Oonsivilai, A. Srikaew, and T. Kulworawanichpong, "Optimal PI controller design and simulation of a static var compensator using MATLABs SIMULINK," *The 7th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS*, Beijing, China, pp. 30 35, September 2007.
 - [16] The MathWorks Inc., Genetic Algorithms and Direct Search TOOLBOX, CD-ROM Manual, 2004.
 - [17] J. Hazral and A. K. Sinha, "A Study on Real and Reactive Power Optimization using Particle Swarm Optimization," *International Conference on Industrial and Information Systems*, pp. 323 328, 9-11 August 2007.
 - [18] N.T. Linh and N.Q. Anh, "Application of artificial beecolony algorithm (ABC) for reconfiguring distribution network," *International Conference on Computer Modelling and Simulation*, pp. 102-106.
 - [19] N. Karaboga, "A new design method based on artificial bees colony algorithm for digital IRR filters," *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 346, pp.328348, 2009.
 - [20] D. Karaboga and B. Bosturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony optimization," *Journal of Global Optimization*, VOL. 39, pp. 459- 471.
 - [21] S.P. Karthikeyan, K. Palanisamy, L.J. Varghese, I.J. Raglend, and D.P. Kothari, "Comparison of Intelligent Techniques to Solve Economic Load Dispatch Problem with Line Flow Constraints," *Advance Computing Conference, 2009. IACC 2009. IEEE International*, pp. 446452, 6-7 March 2009.
 - [22] M. Varadarajan, K. S. Swarup, "Solving multiobjective optimal power flow using differential evolution," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, Vol 2, pp. 720730, 2008.



Numphetch Sinsuphun is a Master Student of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. She received B.Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand (2008). Her fields of research interest include a power system analysis, application of harmony search in optimal power flow solution. She has joined the school since June 2009 and is a research assistant and a member in Power System Research Unit, Suranaree University of Technology.



Uthen Leeton is a Ph.D. Student of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. He received B.Eng. with first-class honour in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand (2007). His fields of research interest include a power system analysis, optimization and artificial intelligent techniques. He has joined the school since June 2009 and is a research assistant and a member in Power System Research Unit, Suranaree University of Technology.



Umaporn Kwannetr was born in Bansang, Thailand, on November 9, in 1986. She received the B.Eng. in Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2009. Currently she is pursuing the master degree at the University of Nakhon Ratchasima, Thailand. Her interests include the application of artificial intelligence techniques to power system optimization

problems.



Dusit Uthitsunthorn He received the Master of Electrical Engineering degree from King Mongkuts University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand in 2007. Currently he is a Ph.D. Student and a research assistant at Power System Research Unit, School of Electrical Engineering Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. His research interest includes power system, power system intelligent protection and optimization technique.



Thanatchai Kulworawanichpong is an associate professor of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. He received B.Eng. with first-class honour in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand (1997), M.Eng. in Electrical Engineering from Chulalongkorn University, Thailand (1999), and Ph.D.

in Electronic and Electrical Engineering from the University of Birmingham, United Kingdom (2003). His fields of research interest include a broad range of power systems, power electronic, electrical drives and control, optimization and artificial intelligent techniques. He has joined the school since June 1998 and is currently a leader in Power System Research, Suranaree University of Technology, to supervise and co-supervise over 15 postgraduate students.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวน้ำเพชร สีนสุพรรณ เกิดเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัด เพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเซนต์โยเซฟ จังหวัด นครสวรรค์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2551 และเข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเดิม ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1 (2) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้า กำลัง 2 (3) ปฏิบัติการระบบควบคุม และ (4) ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม โดยมีความสนใจ ในด้านการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ในขณะศึกษาดังกล่าวณ ก.

