

การไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

นางสาวอุมาภรณ์ ขวัญเนตร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2554

**OPTIMAL POWER FLOW USING ARTIFICIAL BEE
COLONY ALGORITHMS**

Umaporn Khwannetr



**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

การไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.ชนัดชัช กุลสุวรรณิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อุมารณ์ ขวัญเนตร์ : การไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์
(OPTIMAL POWER FLOW USING ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHMS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัชชัย กุลวรรณิพงษ์, 233 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ โดยใช้การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน จำลองผลการทดสอบในกรณีต่าง ๆ ภายใต้สภาวะโหลดสมดุล โดยทำการศึกษาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 รูปแบบ คือ ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันแบบมีจุดเปิดวาล์วหลายจุด และฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส ระบบทดสอบนครราชสีมา 2 และระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออก ขนาด 147 บัส ตามลำดับ จำลองผลด้วยการเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาค่าเหมาะที่สุดในแต่ละระบบ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับระบบต่าง ๆ แล้วเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ผลการทดสอบพบว่า การปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสมทำให้ค่าเชื้อเพลิงรวมในระบบมีค่าลดลง สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์กับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค พบว่าคำตอบที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาถึงสมรรถนะการลู่เข้าของจุดคำตอบพบว่าขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีสมรรถนะที่ดีกว่าวิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค โดยพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนเชื้อเพลิงและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง และเวลาในการคำนวณการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยเฉลี่ยเร็วกว่าวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค

UMAPORN KHWANNETR : OPTIMAL POWER FLOW USING ARTIFICIAL
BEE COLONY ALGORITHMS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
THANATCHAI KULWORAWANICHPONG, Ph.D., 233 PP.

BEE ALGORITHM/OPTIMAL POWER FLOW/FUEL COST/POWER LOSSES

This thesis presents optimal power flow solution using artificial bee colony algorithms, by use the optimal power flow problems with Newton-Raphson. Simulation beneath the condition loads to equilibrium. A study 3 objective functions, quadratic cost function, valve point loading function, and minimize power transmission losses function. IEEE 6-bus 14-bus 30-bus 57-bus 118-bus Nakhon Ratchasima 2 and Central Eastern Electricity System 147 bus for test. Simulation by MATLAB for search optimal value in systems. Set of optimal parameters with system and compared to genetic algorithm, particle swarm optimization and quasi-newton. The test meets that, setting of optimal parameters make fuel cost in the system is valuable are down. For test comparison with artificial bee colony algorithms, genetic algorithm, particle swarm optimization and quasi-newton, the answer is valuable is similar to when consider convergence capability of answer artificial bee colony algorithms capability that better genetic algorithm and particle swarm optimization, by consider from the value standard deviation of fuel cost and power transmission losses. The mean time in simulate optimal power flow solution be the fastest among the genetic algorithm and particle swarm optimization.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนัช กุลรวานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบุคลากร การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เขตบางกรวย ที่ช่วยอนุเคราะห์ข้อมูลระบบทดสอบของประเทศไทยและข้อเสนอแนะต่าง ๆ

ขอขอบคุณเป็นพิเศษต่อ นางสาวน้ำเพชร สีนสุพรรณ ที่ได้ช่วยเหลือให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษายิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและท้อแท้ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

อุมารณ์ ขวัญเนตร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฑ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ทัศนวิสัยวรรณกรรม.....	5
2.3 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	9
2.3.1 ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า.....	9
2.3.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	10
2.3.3 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า.....	10
2.4 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	12
2.4.1 การคำนวณแรงดันสำหรับปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	13
2.4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	หลักการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า	21
2.6	การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	22
2.6.1	การควบคุมขนาดแรงดันบัส	23
2.6.2	การปรับเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์ของระบบส่งจ่าย	25
2.7	แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน	26
2.8	การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียผ่านสายส่ง	29
2.9	การจ่ายโหลดอย่างประหยัด	31
2.10	การไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด	32
2.10.1	การจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริง	33
2.10.2	การจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	35
2.10.3	การแก้ปัญหาร่วมของการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	35
2.11	สรุป	36
3	การแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด	37
3.1	บทนำ	37
3.2	การแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์	37
3.2.1	การแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น โดยไม่มีเงื่อนไขบังคับ	39
3.2.2	การแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีเงื่อนไขบังคับสมการ	41
3.2.3	การแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีเงื่อนไขบังคับอสมการ	42
3.3	การแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน	44
3.4	การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการปรับโทซ	47
3.5	การแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีจินตคณิตอัลกอริทึม	49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6	การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด ของฝูงอนุภาค.....	51
3.7	สรุป	54
4	ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์สำหรับการหาค่าเหมาะที่สุด	55
4.1	บทนำ.....	55
4.2	พฤติกรรมกรหาอาหารของผึ้ง	55
4.3	ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์	59
4.3.1	พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์	63
4.4	ทดสอบขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์โดยใช้ฟังก์ชันคณิตศาสตร์พื้นฐาน	64
4.4.1	ฟังก์ชันคณิตศาสตร์พื้นฐาน	64
4.4.2	ผลการทดสอบด้วยฟังก์ชันคณิตศาสตร์พื้นฐาน	68
4.5	สรุป	71
5	การไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์	72
5.1	บทนำ.....	72
5.2	การแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุด ด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์.....	73
5.3	การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดที่มีฟังก์ชัน ค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง.....	74
5.3.1	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส.....	76
5.3.2	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส.....	81
5.3.3	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	85
5.3.4	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส.....	90
5.3.5	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส.....	95
5.3.6	ระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส	104
5.4	การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดที่มีฟังก์ชัน ค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น.....	110
5.4.1	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส.....	110

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.2	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส.....	114
5.4.3	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	118
5.5	การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง	122
5.5.1	กรณีที่ 1.....	123
5.5.2	กรณีที่ 2.....	127
5.5.3	กรณีที่ 3.....	130
5.5.4	กรณีที่ 4.....	133
5.5.5	กรณีที่ 5.....	136
5.5.6	กรณีที่ 6.....	139
5.6	สรุป	142
6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	143
6.1	สรุป	143
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	152
	รายการอ้างอิง	153
	ภาคผนวก	157
	ภาคผนวก ก. ระบบทดสอบ	157
	ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบ	197
	ภาคผนวก ค. ฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	202
	ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	205
	ประวัติผู้เขียน	233

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันค่าเชื่อเพลิงของหน่วยการผลิตย่อย	29
4.1	พารามิเตอร์ควบคุมของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ จินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค	63
4.2	เปรียบเทียบการทดสอบด้วยฟังก์ชัน โรเซนบรอก	69
4.3	เปรียบเทียบการทดสอบด้วยฟังก์ชัน ฟังก์ชันกำลังสอง	69
4.4	เปรียบเทียบการทดสอบด้วยฟังก์ชัน ฟังก์ชันวงกลม	70
4.5	เปรียบเทียบการทดสอบด้วยฟังก์ชัน Bohachevsky	71
5.1	เปรียบกับกระบวนการหาค่าความเหมาะสมในการค้นหาอาหาร ของฝูงผึ้งกับการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดด้วย ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์	74
5.2	ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื่อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง	77
5.3	ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบ มาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง	78
5.4	ค่าเชื่อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชัน พหุนามอันดับสอง	79
5.5	กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง	79
5.6	ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื่อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง	82
5.7	ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบ มาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.8 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง	83
5.9 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง	84
5.10 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง	86
5.11 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบ ทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง.....	87
5.12 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชัน พหุนามอันดับสอง	88
5.13 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง	89
5.14 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส	92
5.15 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส	92
5.16 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส	93
5.17 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส	94
5.18 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส	97
5.19 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส	99
5.20 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส	100
5.21 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.22 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบการไฟฟ้า ภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส106	106
5.23 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบการไฟฟ้า ภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส107	107
5.24 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส 108	108
5.25 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบการไฟฟ้า ภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส108	108
5.26 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น111	111
5.27 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบ มาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น111	111
5.28 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชัน ไม่เป็นเชิงเส้น 112	112
5.29 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น113	113
5.30 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น114	114
5.31 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบ มาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น115	115
5.32 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชัน ไม่เป็นเชิงเส้น 116	116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.33	กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น117
5.34	ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น118
5.35	ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบ มาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น119
5.36	ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น 120
5.37	กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น121
5.38	ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบ นครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 1124
5.39	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 กรณีที่ 1 125
5.40	ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 1125
5.41	ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบ นครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 2127
5.42	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 กรณีที่ 2 128
5.43	ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 2129
5.44	ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบ นครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 3130
5.45	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 กรณีที่ 3 131
5.46	ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 3132

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.47 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบ นกรราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 4	133
5.48 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนกรราชสีมา 2 กรณีที่ 4	134
5.49 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนกรราชสีมา 2 โดยใช้ ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 4	135
5.50 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบ นกรราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 5	136
5.51 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนกรราชสีมา 2 กรณีที่ 5	137
5.52 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนกรราชสีมา 2 โดยใช้ ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 5	138
5.53 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบ นกรราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 6	149
5.54 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนกรราชสีมา 2 กรณีที่ 6	140
5.55 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนกรราชสีมา 2 โดยใช้ ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 6	141
6.1 สรุปจำนวนครั้งในการลู่อเข้าเมื่อสุ่มค่าเริ่มต้นที่ต่างกัน 30 ครั้ง	145
6.2 สรุปการค้นหาคำตอบที่ต่ำที่สุด	146
6.3 สมรรถนะการลู่อเข้าของคำตอบเมื่อสุ่มค่าเริ่มต้นที่ต่างกัน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)	148
6.4 สรุปเวลาการคำนวณ	150
ก.1 ข้อมูลลับของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส	158
ก.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส	158
ก.3 ข้อมูลลับของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส	159
ก.4 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส	160
ก.5 ข้อมูลลับของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส	161
ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส	162

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส	164
ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส.....	166
ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส	169
ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส.....	173
ก.11 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 (9 บัส)	180
ก.12 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 (9 บัส)	181
ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส	182
ก.14 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบระบบไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส.....	187



สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1	ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน	11
2.2	บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น	13
2.3	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	20
2.4	ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย	21
2.5	การติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	24
2.6	การติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบส่งจ่าย	26
2.7	แผนภาพการผลิตกำลังงานไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน	27
2.8	ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงแบบพหุนามอันดับสองและฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	29
2.9	แบบจำลองสายส่งเชื่อมต่อระหว่างบัส k และ i	30
2.10	แบบจำลองของโรงไฟฟ้าที่ประกอบด้วยหน่วยการผลิตต่อเข้ากับบัสบาร์	31
2.11	รูปแบบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด	33
3.1	แผนภาพการทำงานของระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน	46
3.2	แผนผังการทำงานการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยจินเนติกอัลกอริทึม	51
3.3	แผนผังการทำงานการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยฝูงอนุภาค	53
4.1	ตำแหน่งแหล่งอาหาร	56
4.2	เส้นทางการสำรวจแหล่งอาหารของฝูงสำรวจ	56
4.3	ลานเดินร่าสำหรับส่งสัญญาณ	57
4.4	การเดินร่าแบบวงกลมของฝูงสำรวจ	57
4.5	การเดินร่าแบบสายตัวของฝูงสำรวจ	58
4.6	เส้นทางของแหล่งอาหารที่เหมาะสม	58
4.7	แผนภาพการทำงานของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์	60
4.8	การสร้างกลุ่มประชากรผึ้ง	62
4.9	พื้นผิวดตอบสนองของฟังก์ชันโรเซินบรอก กรณี 2 ตัวแปร	65
4.10	พื้นผิวดตอบสนองของฟังก์ชันกำลังสอง กรณี 2 ตัวแปร	66
4.11	พื้นผิวดตอบสนองของฟังก์ชันฟังก์ชันวงกลมกรณี 2 ตัวแปร	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	พื้นผิวดอสนองของฟังก์ชัน Bohachevsky กรณีสองตัวแปร 68
5.1	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส 77
5.2	เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง 78
5.3	เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง 80
5.4	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส 81
5.5	เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง 83
5.6	เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง 84
5.7	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส 86
5.8	เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง 88
5.9	เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง 89
5.10	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส 91
5.11	เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส 93
5.12	เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส 94
5.13	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส 96
5.14	เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส 100
5.15	เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส 103
5.16	ระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส 105

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.17	เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบการไฟฟ้า ภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส	107
5.18	เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบการไฟฟ้า ภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส	109
5.19	เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	112
5.20	เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	113
5.21	เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	116
5.22	เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	117
5.23	เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	120
5.24	เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	121
5.25	ระบบทดสอบนครราชสีมา 2	123
5.26	เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 1.....	124
5.27	เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 1.....	126
5.28	เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 2.....	128
5.29	เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 2.....	129

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.30 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 3.....	131
5.31 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 3.....	132
5.32 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 4.....	134
5.33 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 4.....	135
5.34 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 5.....	137
5.35 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 5.....	138
5.36 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 6.....	140
5.37 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 6.....	141
ข.1 การกระจายของข้อมูลของค่าเชื้อเพลิงสำหรับระบบทดสอบ 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์	199
ข.2 การกระจายของข้อมูลของค่าเชื้อเพลิงสำหรับระบบทดสอบ 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน	200
ข.3 การกระจายของข้อมูลของค่าเชื้อเพลิงสำหรับระบบทดสอบ 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค	200
ข.4 การกระจายของข้อมูลของค่าเชื้อเพลิงสำหรับระบบทดสอบ 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของวิธีจินเนติกอัลกอริทึม	201

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$I_a[k]$	=	ขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนจริงในสายส่งเส้นที่ k
$I_{D,k}$	=	โหลดกระแสไฟฟ้าที่บัส k
P	=	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ
P_G	=	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
P_D	=	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ต้องการ
$P_{cal,k}$	=	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่คำนวณได้ที่บัส k
P_{loss}	=	กำลังไฟฟ้าสูญเสียแอกทีฟ
$P_{sch,k}$	=	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ถูกกำหนดที่บัส k
$P_{mis,max}$	=	ความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟสูงสุดที่ยอมรับได้
Q	=	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
$Q_{sch,k}$	=	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ถูกกำหนดที่บัส k
$Q_{cal,k}$	=	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่คำนวณได้ที่บัส k
$Q_{mis,max}$	=	ความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดที่ยอมรับได้
$Q_{c,i}$	=	ขนาดตัวเก็บประจุที่บัส i
$Q_{c,i}^{min}$	=	ขนาดน้อยที่สุดของตัวเก็บประจุที่บัส i
$Q_{c,i}^{max}$	=	ขนาดมากที่สุดของตัวเก็บประจุที่บัส i
$Z_{D,k}$	=	โหลดอิมพีแดนซ์ที่บัส k
$S_{D,k}$	=	กำลังไฟฟ้าที่โหลดที่บัส k
$S_{gen,k}$	=	กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัส k
$S_{G,k}$	=	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส k
V_k	=	แรงดันไฟฟ้าที่บัส k
$y_{k,i}$	=	แอดมิตแตนซ์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส k และบัส i
$Y_{k,i}$	=	สมาชิกแถวที่ k หลักที่ i ของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
Y_{bus}	=	บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
Z	=	ความต้านทานเชิงซ้อนของสายส่ง
δ_k	=	มุมของแรงดันที่บัส k

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$ I_{D,k} $	=	ขนาดของโหลดกระแสไฟฟ้าที่บัส k
$ V_k $	=	ขนาดแรงดันที่บัส k
$ Z_{D,k} $	=	ขนาดของโหลดอิมพีแดนซ์ที่บัส k
$\Delta\delta$	=	ผลต่างของมุมแรงดันระหว่างบัส k และบัส i
$\Delta V $	=	ผลต่างของขนาดแรงดันระหว่างบัส k และบัส i
ΔP_k	=	ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟที่บัส k
ΔQ_k	=	ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัส k
Ω	=	หน่วยของความต้านทาน
*	=	ตัวกระทำสังยุคเชิงซ้อน
kV	=	หน่วยกิโลของแรงดันไฟฟ้า
kVar	=	หน่วยกิโลของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ
kVA	=	หน่วยกิโลของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน
MVar	=	หน่วยเมกะของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ
MVA	=	หน่วยเมกะของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน
MW	=	หน่วยเมกะของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟ
DG	=	การผลิตกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย
SVC	=	Static Var Compensator
KVL	=	Kirchhoff's Voltage Law
p.u.	=	per unit system
ANSI	=	American National Standards Institute
pdf	=	symmetric rank-one update formular
TS	=	Tabu Search
DE	=	Differential Evolution
ACO	=	Ant Colony Optimization
BFGS	=	BFGS update formular
PSO	=	Particle Swarm Optimization
GA	=	Genetic Algorithm
ABC	=	Artificial Bee Colony

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MIPSO	=	Mixed-Integer Particle Swarm Optimization
RPP	=	Reactive Power Planing



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมและการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรในครัวเรือน ซึ่งมีอยู่ทั่วประเทศจึงส่งผลให้ภาครัฐจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อสนองตอบต่อความต้องการของผู้ใช้ ดังนั้นต้องมีกระบวนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ดีจากแหล่งผลิตซึ่งก็คือ โรงจักรไฟฟ้าไปสู่โหลดในพื้นที่ต่าง ๆ ด้วยข้อจำกัดของแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้าทำให้โรงจักรไฟฟ้ากับโหลดอยู่ห่างไกลกัน จึงจำเป็นต้องมีการส่งต่อกำลังไฟฟ้าผ่านการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งทำหน้าที่จำหน่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟให้กับผู้บริโภคในท้องถิ่นหลักที่รับผิดชอบ และเชื่อมถึงกันด้วยสายส่ง จึงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดได้อย่างเพียงพอ ด้วยเหตุนี้กำลังไฟฟ้าจึงสามารถไหลไปสู่โหลดได้ทั่วทั้งระบบไฟฟ้าที่มีการต่อเชื่อมถึงกันซึ่งขึ้นอยู่กับการควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันมีขนาดใหญ่ประกอบไปด้วยโรงไฟฟ้าจำนวนมาก ซึ่งโรงไฟฟ้าแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพและต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน การจ่ายโหลดโดยทั่วไปอาศัยหลักการสมดุลของกำลังงาน นั่นคือ กำลังผลิตเท่ากับความต้องการไฟฟ้า (supply = demand) ในกรณีของระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่ใช่ระบบในอุดมคติ การสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ เกิดขึ้นได้ในทุกส่วน เช่น ในระบบผลิตของโรงไฟฟ้าเอง ในระบบส่งจ่าย ซึ่งเกิดการสูญเสียกำลังงานในสายส่งต่าง ๆ ดังนั้น การวางแผนการผลิตให้กับโรงไฟฟ้าแต่ละโรงเป็นปัญหาที่สำคัญเพราะจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตโดยรวมของทั้งระบบ ซึ่งจะใช้ในการกำหนดค่าไฟ หรือถ้ามองในรูปของผลกำไร การผลิตกำลังไฟฟ้าที่ต้นทุนต่ำทำให้ได้กำไรจากการขายไฟสูงสุด เมื่อให้อัตราค่าไฟฟ้ามีค่าคงที่ การวางแผนในลักษณะนี้จำเป็นที่จะต้องทราบคุณสมบัติของต้นทุนการผลิตในหน่วยของเงินของโรงไฟฟ้าแต่ละโรงต่อหน่วยของเมกะวัตต์ ที่ผลิตขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อคำนวณหาค่าของตัวแปรที่เหมาะสมของระบบที่ทำให้ค่าต้นทุนเชื้อเพลิงของระบบทดสอบต่าง ๆ นั้น มีค่าต่ำที่สุด

1.2.2 เพื่อคำนวณหาค่าของตัวแปรที่เหมาะสมของระบบที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบมีค่าลดลง

1.2.3 เพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และรักษาระดับแรงดันให้คงที่หรืออยู่ในช่วงที่กำหนดไว้

1.2.4 เพื่อคำนวณหาขนาดกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว

1.2.5 เพื่อคำนวณหาขนาดของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้ง

1.2.6 เพื่อนำขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยทดสอบกับระบบที่ทำการศึกษา

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ทดสอบกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสายส่งในสภาวะการจ่ายโหลดสมดุล

1.3.2 เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในระบบทดสอบเพื่อให้ได้ค่าต้นทุนเชื้อเพลิงต่ำที่สุด ต้องให้ค่าตัวแปรของระบบทดสอบอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้เพราะเป็นค่าที่เหมาะสมและสามารถยอมรับได้

1.3.3 ทดสอบเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในระบบทดสอบเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งลดลง ต้องให้ค่าตัวแปรของระบบทดสอบอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้เพราะเป็นค่าที่เหมาะสมและสามารถยอมรับได้

1.3.4 การแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดนั้นทำการทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส ระบบทดสอบนครราชสีมา 2 (9 บัส) และระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 จำลองผลด้วยขั้นตอนวิธีที่ทำการศึกษามาเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค

1.4.2 ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ที่ทำการศึกษเพื่อแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบต่าง ๆ

1.4.3 ศึกษาวิเคราะห์และจำลองผลโดยศึกษาระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส ระบบทดสอบนครราชสีมา 2 (9 บัส) และระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส

1.4.4 ทดสอบผลด้วยฟังก์ชันทดสอบ 3 รูปแบบ ได้แก่ ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นและฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถลดค่าต้นทุนเชื้อเพลิงและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบได้ ทำให้ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าไม่ต้องเสียเงินในส่วนนี้ และจะช่วยเพิ่มรายได้ให้กับผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าอีกด้วย

1.5.2 สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ เพื่อช่วยไม่ให้ระบบเกิดความเสียหายจากสถานะแรงดันตก

1.5.3 สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสโหลดที่มีความจำเป็นต้องรับกำลังไฟฟ้าตลอดเวลาให้คงที่หรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

1.5.4 ช่วยทำให้เข้าใจกระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ได้ดียิ่งขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท และ 4 ภาคผนวก ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วย เนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน หลักการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดและการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

บทที่ 3 กล่าวถึงการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้เลือกจุดทำงานที่เหมาะสมของการแก้ปัญหการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด นำเสนอการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการ

วิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค และการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการปรับโทช เพื่อทำให้รูปแบบการวิเคราะห์ปัญหาง่ายขึ้น

บทที่ 4 กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ และการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ การทดสอบขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ด้วยฟังก์ชันคณิตศาสตร์พื้นฐาน เปรียบเทียบกับการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค และการอธิบายขั้นตอนการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์เพื่อการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุด

บทที่ 5 แสดงผลการทดสอบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วนที่สำคัญ คือ การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดที่มีฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดที่มีฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น และการเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะต่าง ๆ

ภาคผนวก ก. รายละเอียดของระบบทดสอบต่าง ๆ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ข. ข้อมูลของผลการทดสอบในกรณีต่าง ๆ

ภาคผนวก ค. ฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB จำลองผลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า เป็นเครื่องมือที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เพราะการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นและเป็นเครื่องมือพื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเรื่องอื่น ๆ เช่น การวางแผนการจ่ายโหลดไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าตามสถานที่ต่าง ๆ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ามีจุดมุ่งหมายเพื่อหาคุณลักษณะการทำงานของในสภาวะคงตัวของระบบกำลังไฟฟ้า ผลที่ได้ประกอบด้วยขนาดแรงดันและมุมเฟสที่บัสต่าง ๆ การลดต้นทุนการผลิตของระบบรวมไปถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบไฟฟ้ากำลัง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปรัทัศนัวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยปรัทัศนัวรรณกรรมจะประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดซึ่งใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นและกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง การไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดด้วยวิธีเงินเนติกอัลกอริทึม วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเป็นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน หลักการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียผ่านสายส่ง ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดและการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุด

2.2 ปรัทัศนัวรรณกรรม

จากการปรัทัศนัวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า ได้มีผู้วิจัยนำเสนองานวิจัยทางการจำลองการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยวิธีการต่าง ๆ ก่อนข้างหลากหลาย และงานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ ดังต่อไปนี้

Santos and Costa (1995) นำเสนอแนวทางใหม่สำหรับการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าบนพื้นฐานวิธีนิวตัน โดยใช้การดำเนินการด้วยฟังก์ชันลากรองจ์สำหรับการแก้ปัญหาโดยรวมเงื่อนไขบังคับสมการและเงื่อนไขบังคับสมการทั้งหมดไว้ในฟังก์ชันเดียวกัน ลำดับแรกเงื่อนไขจำเป็น

สำหรับความเหมาะสมโดยใช้วิธีนิวตันและทำการปรับปรุงตัวแปรควบคู่กันไปกับการปรับโทม และเงื่อนไขบังคับข้อสมการ วิธีการนำเสนอนี้ไม่สามารถระบุค่าของเงื่อนไขบังคับได้ และใช้จุดเริ่มต้นด้วยเฮสเซียนเมตริกซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลงจ้ให้มีความสมบูรณ์และดีขึ้น

Murdlithi (1996) ได้นำเสนอการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยคำนึงถึงหลักการทางเศรษฐศาสตร์ และความน่าเชื่อถือ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาถึงการทำงานและการวางแผนในระบบไฟฟ้า โดยที่ระบบไฟฟ้าต้องสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอ การแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดและการหาคำตอบของการจัดสรรกำลังไฟฟ้า คำตอบที่ได้จากปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้จุดทำงานที่ทำให้ได้คำตอบค่าที่สุดของพารามิเตอร์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ภายใต้เงื่อนไขบังคับของระดับแรงดัน การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่ง และแท็ปหม้อแปลง คำตอบที่ได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดทำให้มีความเชื่อถือในทางเศรษฐศาสตร์ คำตอบที่ได้มาจะใช้เทคนิคแบบไม่เป็นเชิงเส้น ได้แก่ ระเบียบวิธีขั้นที่สุด วิธีโปรแกรมกำลังสอง และวิธีโปรเจกเกรเดียน ในงานวิจัยได้นำแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีขั้นที่สุด

Leung and Chung (2000) ได้นำเสนอวิธีจินเนติกอัลกอริทึม (GA) สำหรับแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์แฟกต์ (FACTS) ในระบบสายส่งให้มีความมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และขนาดแรงดัน สำหรับการแก้ปัญหด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมนั้น ได้เลือกค่าที่ดีที่สุดคือผลรวมของค่าเชื้อเพลิงน้อยที่สุด และการไหลของกำลังไฟฟ้าอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย

Abido (2002) เสนอการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ (Tabu search : TS) โดยจำลองผลจากระบบทดสอบ 30 บัส ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ศึกษา คือ ฟังก์ชันต้นทุนเชื้อเพลิงต่ำสุด โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 4 กรณี (1) ต้นทุนเชื้อเพลิงรวมโดยพิจารณาฟังก์ชันต้นทุนเชื้อเพลิงในรูปของฟังก์ชันกำลังสอง (2) ต้นทุนเชื้อเพลิงรวมแบบมีจุดเปิดวาล์วหลายจุด (3) มีการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ และ (4) การปรับปรุงคุณภาพการลู่เข้าของปัญหา ผลจากการจำลองด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ สรุปว่า การควบคุมตัวแปรต่าง ๆ จะทำให้ต้นทุนเชื้อเพลิงรวมมีค่าต่ำสุด และการปรับปรุงคุณภาพการลู่เข้าของปัญหานั้นทำให้การลู่เข้าของปัญหาเร็วขึ้น

Abido (2002) เสนอการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization : PSO) โดยจำลองผลจากระบบทดสอบ 30 บัส ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ศึกษา คือ ฟังก์ชันต้นทุนเชื้อเพลิงต่ำสุดในรูปของฟังก์ชันกำลังสอง โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 4 กรณี (1) ต้นทุนเชื้อเพลิงรวม (2) มีการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ (3) เติลยภาพ

ของแรงดันบัส และ (4) ต้นทุนเชื้อเพลิงรวม โดยมีขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลจากการจำลองด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค สรุปว่า การควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้ต้นทุนเชื้อเพลิงรวมมีค่าต่ำสุด

Gaing (2005) นำเสนอประสิทธิภาพของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคที่หลากหลาย (Mixed-integer particle swarm optimization : MIPSO) สำหรับแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด กับการรวมกันระหว่างการควบคุมตัวแปรแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นต้นทุนการผลิต ในพื้นฐานของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคที่หลากหลาย โดยการกำหนดตัวแปรควบคุมให้เป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องซึ่งประกอบด้วยค่าจริง ความแตกต่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับจุดเปิดวาล์วที่มีผลกระทบต่อเงื่อนไขบังคับที่พิจารณา โดยทดสอบกับระบบ 9 บัส และ 26 บัส และเปรียบเทียบกับวิธีสโตคาสติกในเทอมของคำตอบที่มีคุณภาพ คุณสมบัตการลู่เข้า และการคำนวณประสิทธิภาพ ผลการทดลองที่แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี MIPSO ผลที่ได้จะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

Vaisakb and Srinivas (2005) เสนอการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการวิวัฒนาการเชิงแตกต่าง (Differential evolution : DE) ซึ่งทำการทดสอบระบบทดสอบ 30 บัส ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ศึกษา คือ ฟังก์ชันต้นทุนเชื้อเพลิงต่ำสุดในรูปของฟังก์ชันกำลังสอง โดยมีการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ผลจากการจำลองด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการวิวัฒนาการเชิงแตกต่าง สรุปว่า วิธีการวิวัฒนาการเชิงแตกต่างสามารถนำมาใช้หาค่าเหมาะสมของปัญหาได้

Younes, and Koridak (2007) เสนอการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งทำการทดสอบระบบทดสอบ 57 บัส ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ศึกษา คือ ฟังก์ชันต้นทุนเชื้อเพลิงต่ำสุดในรูปของฟังก์ชันกำลังสอง โดยมีการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ผลจากการจำลองด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการจินเนติกอัลกอริทึม เปรียบเทียบกับโปรแกรมแมตซ์พาวเวอร์ (Mathpower) สรุปว่า วิธีการจินเนติกอัลกอริทึมนำมาใช้หาค่าเหมาะสมของปัญหาได้เช่นเดียวกัน

Tangpatiphan and Yokoyama (2008) ได้ นำเสนอ โปรแกรมการวิวัฒนาการร่วมกับโครงข่ายประสาทโดยนำเสนอคำตอบของเสถียรภาพชั่วคราว โดยมีเงื่อนไขบังคับของการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด โปรแกรมวิวัฒนาการเป็นการเลือกค่าเหมาะสมที่สุด ในขณะที่โครงข่ายประสาทคือเครื่องมือปรับปรุงการคำนวณให้มีความเร็ว โดยใช้สมการการแกว่งและมีขอบเขตของมุมโรเตอร์ที่เบี่ยงเบน กับจุดศูนย์รวมของโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มเข้าไปในเงื่อนไข โดยเลือกค่าเชื้อเพลิงต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยทำการทดสอบด้วยระบบทดสอบ 30 บัส

Fangxing and Tolbert (2008) ได้นำเสนอ ปัจจัยหลักของการวางแผนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive power planning : RPP) คือการหาค่าเหมาะสมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยอันดับแรก พิจารณาค่าแรงที่ดึงและขนาด ความสัมพันธ์ของการชดเชยกำลังไฟฟ้า รวมทั้งความสามารถในการถ่ายโอนและค่าเชื้อเพลิง อันดับสอง เป็นการอธิบาย RPP แบบชั่วคราวเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระบบต้นทุน และการชดเชยกำลังไฟฟ้า อันดับสาม เสถียรภาพของแรงดัน ภายใต้เงื่อนไขบังคับ การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยการติดตั้งตัวแปรสองตัว (Two sets of variables :TSV) ซึ่ง TSV จะช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณ ซึ่งจะแตกต่างจากเมื่อก่อนที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ค่าเชื้อเพลิงต่ำที่สุด งานนี้เสนอการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้นทุนต่ำที่สุดโดยรวมของระบบ จะสังเกตผลที่ได้ของ RPP โดยเฉพาะภายใต้สิ่งแวดล้อม RPP จะมีผลกระทบต่อระบบส่งจ่าย พิจารณาดัชนีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลการทดลองของ TSV จะเข้าใกล้เกณฑ์มาตรฐาน

Oumarou and Yijia (2009) ได้นำเสนอการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูง ซึ่งวิธีนี้จะมีค่าไม่คงที่ตามธรรมชาติ จึงทำให้เกิดข้อบกพร่อง ดังนั้นจึงทำการพัฒนาการคำนวณวิธีนี้ ได้แก่ ปรับปรุงให้มีความเร็วมากขึ้น ทำให้เข้าสู่จุดคำตอบเร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้คำตอบมีคุณภาพสูง โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือหาค่าต่ำที่สุดของค่าเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันบัส ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและแท็ปหม้อแปลง ให้อยู่ขอบเขตที่ปลอดภัย โดยใช้ระบบทดสอบ 30 บัส

Tangpatipphan and Yokoyama (2009) ได้นำเสนอการปรับปรุงโปรแกรมวิวัฒนาการสำหรับแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาเสถียรภาพของแรงดันที่มีสถานะคงตัว และมีรูปแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันทางเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ ค่าเชื้อเพลิงและความปลอดภัยของระบบ ขอบเขตเสถียรภาพของแรงดัน การวัดตัวเหนี่ยวนำเพื่อนำมาใช้ในการประเมินสถานะคงตัว ที่ทำให้แรงดันมีเสถียรภาพ ในบทความนี้นำเสนอการปรับปรุงโปรแกรมวิวัฒนาการ โดยลอกเลียนแบบความคิดของเทคนิคการครอสโอเวอร์ จากระบบจริงของวิธีเชิงพันธุกรรม โดยใช้ระบบทดสอบ 30 บัส

Va, Le, Vo and Tlustý (2010) ได้นำเสนอการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดของการไหลกำลังไฟฟ้า และการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยมีผลกระทบในระบบไฟฟ้ากำลัง แล้วทำการแก้ปัญหาด้วยเทคนิคอันชาญฉลาด (Intelligent techniques) ในบทความนี้มีพื้นฐานการปรับปรุงฟังก์ชันด้วยค่าพารามิเตอร์ของน้ำหนัก และนำเสนอการปรับปรุงน้ำหนักแบบใหม่โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคในการคำนวณ ซึ่งทำการประเมินค่าความถูกต้องของการเข้าสู่จุดคำตอบได้รวดเร็วและมีความเหมาะสม โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีจินเนติกอัลกอริทึม การวิวัฒนาการ

เชิงแตกต่างและการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยฝูงมด (Ant colony optimization : ACO) โดยใช้ระบบทดสอบ 30 บัต์

Younes and Basturk (2007) เสนอขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ (Artificial bee colony : ABC) สำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันเบนช์มาร์ก (Benchmark) และเปรียบเทียบผลกับวิธีการจินเนติกอัลกอริทึมและวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน

Quan and Shi (2008) เสนอขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ซึ่งเป็นการค้นหาแนวทางใหม่โดยการวนรอบซ้ำ ได้ทำการทดสอบด้วยฟังก์ชัน Benchmark 10 รูปแบบ จากผลการทดสอบพบว่า มีประสิทธิภาพที่ดีเยี่ยมในการหาค่าเหมาะแบบวงกว้างและสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมได้

Chidambaram and Lopes (2009) นำเสนอขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์เพื่อรับรู้วัตถุในภาพ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์เป็นวิธีแบบเมตาฮิวริสติกแนวทางใหม่ โดยเลียนแบบพฤติกรรมการหาน้ำหวานของผึ้ง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการหารูปแบบหรือรูปภาพอ้างอิง ของวัตถุหนึ่งในภูมิภาคเป้าหมาย พิจารณาการแปรเปลี่ยน การปรับขนาด การหมุน ทำการทดสอบโดยกำหนดตำแหน่งภาพภูมิทัศน์เป้าหมายของภาพอ้างอิง ผลของการทดสอบภาพระดับสีเทาและสี พบว่า ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์เร็วกว่าขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการอื่น ๆ

จากการทบทวนวรรณกรรม สารสนเทศที่เกี่ยวข้องทั้งหมด จะเห็นได้ว่า มีคณะนักวิจัยได้วิจัยงานที่คล้ายหรือซ้ำซ้อนกับงานวิจัยที่จะดำเนินการในครั้งนี้น้อยมาก ผู้วิจัยจึงได้นำเอางานนี้มาประยุกต์ใช้ต่อไป

2.3 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง

การส่งกำลังงานไฟฟ้า (electric power transmission) เป็นการส่งกำลังงานผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า สามารถทำได้เป็นระยะทางไกลและรวดเร็ว ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าได้รับความนิยมสูงสุด สำหรับนำมาใช้เป็นตัวกลางในการเปลี่ยนรูปพลังงานเนื่องจากข้อดีในการส่งจ่ายเป็นระยะทางไกล ส่งผลให้ระบบการกระจายพลังงานจากแหล่งกำเนิดไปยังผู้ใช้ได้ทั่วถึง ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบหลัก ได้แก่ ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ดังนี้ (ธนัชชัย กุลวรรณขงษ์, 2551)

2.3.1 ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า (electric power generation system)

ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วยโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อน พลังน้ำ นิวเคลียร์ หรือรูปแบบอื่น ๆ ภายในโรงไฟฟ้าอาจจะประกอบด้วยหน่วยการผลิตย่อยมากกว่า 1 หน่วย แต่ละหน่วยมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ ซึ่งระบบผลิตกำลังไฟฟ้าเป็นระบบต้นกำลัง ทำหน้าที่ผลิตกำลังงานไฟฟ้าเพื่อส่งเข้าไปยังระบบส่งจ่าย

กำลังไฟฟ้า ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจะแปลงพลังงานสะสมในเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ มาผลิตกำลังไฟฟ้า เชื้อเพลิงที่ใช้มีหลายรูปแบบ เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตา น้ำที่ถูกกักเก็บเหนือเขื่อนหรือแบริ่งเรเนียม เป็นต้น โดยทั่วไประบบผลิตกำลังไฟฟ้าสร้างแรงดันไฟฟ้าประมาณ 10-20 kV ระหว่างคู่สาย จากนั้นจะเชื่อมต่อกับหม้อแปลงกำลังที่ลานโกไฟฟ้าต้นทาง (switchyard) ให้มีระดับแรงดันสูงขึ้น เช่น 69 kV 115 kV 230 kV หรือ 500 kV เป็นต้น

2.3.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (electric power transmission system)

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยสายส่งกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมกันเป็นโครงข่ายที่ซับซ้อน เป็นระบบที่ส่งกำลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นระยะทางไกลหลายร้อยกิโลเมตรไปยังกลุ่มโหลดที่กระจายอยู่ตามภูมิภาคต่าง ๆ ในรูปสถานีไฟฟ้าย่อยปลายทาง มีการต่อเชื่อมผ่านหม้อแปลงเพื่อแปลงแรงดันขึ้นลงได้หลายระดับ และมีการเชื่อมต่อโยงสายส่งกำลังไฟฟ้าเป็นโครงข่ายไฟฟ้าที่ระดับแรงดันส่งจ่ายค่าสูงเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งและการเกิดแรงดันตก ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีระดับแรงดันตั้งแต่ 69 kV ขึ้นไป

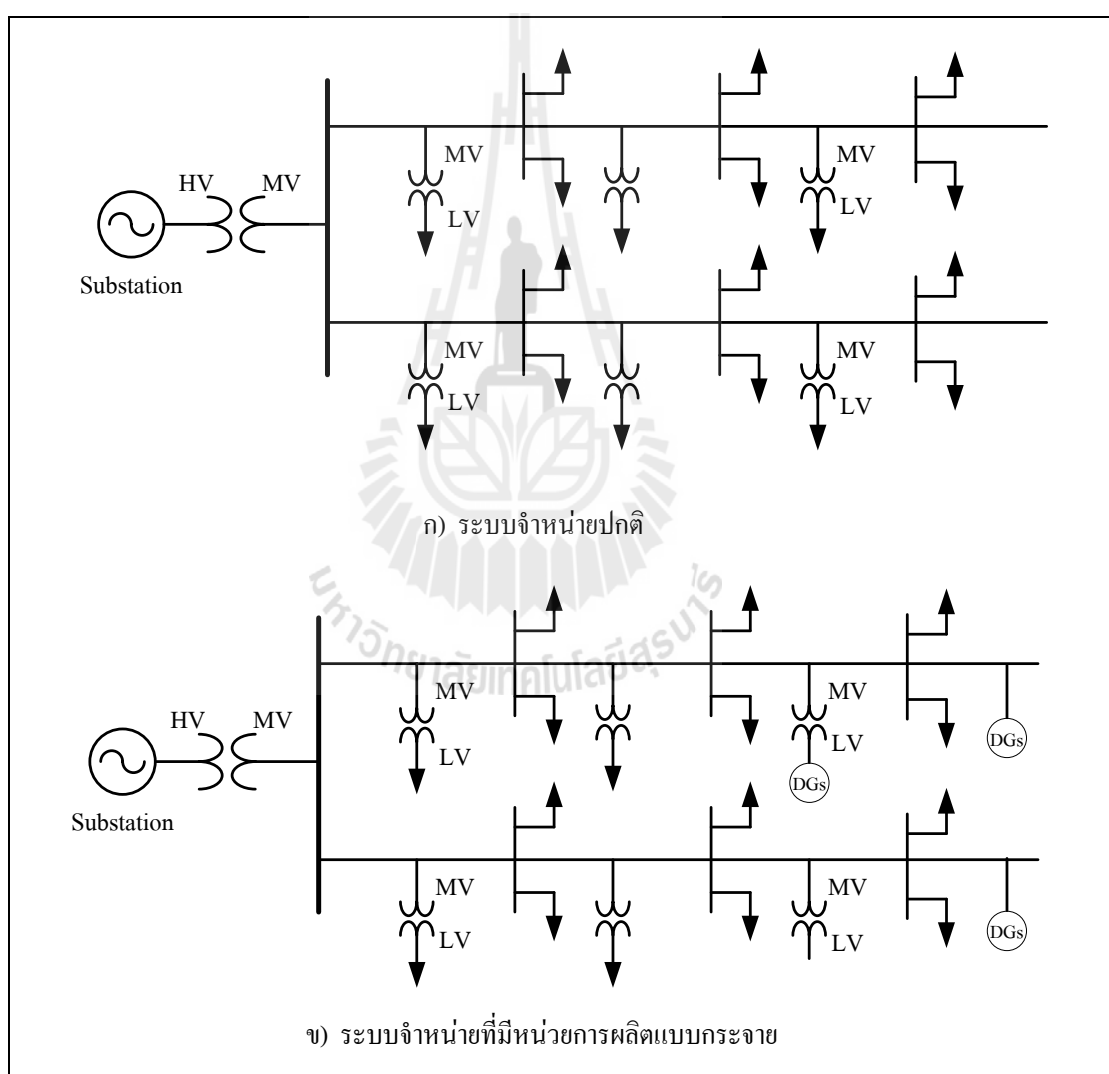
ระดับแรงดันส่งจ่ายมาตรฐานแบ่งได้เป็นชั้น ๆ ตัวอย่างเช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ตามมาตรฐาน ANSI แบ่งแรงดันส่งจ่ายออกได้เป็น 69 kV 115 kV 138 kV 161 kV 230 kV 345 kV 500 kV และ 765 kV สำหรับประเทศอังกฤษและประเทศเครือจักรภพอังกฤษแบ่งออกเป็น 132 kV 275 kV และ 400 kV ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยโดยส่วนใหญ่อยู่ภายใต้ความดูแลของการไฟฟ้า

2.3.3 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (electric power distribution system)

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยสายส่งในระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันต่ำ สายป้อนจำหน่ายใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการกระจายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟโดยตรง เป็นระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 3 สายเป็นส่วนใหญ่ สำหรับประเทศไทยระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงใช้แรงดันจำหน่าย 24 kV และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 22 kV เป็นค่ามาตรฐาน

ประเทศไทยผู้ใช้ไฟหรือโหลด จำแนกได้หลายประเภท รับกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันทำงานแตกต่างกัน ที่พักอาศัย สำนักงาน ย่านการค้า อาคารพาณิชย์ต่าง ๆ นิยมรับกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันต่ำ 380/220 V ในขณะที่โรงงานขนาดใหญ่อาจจะใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูง เช่น มอเตอร์ใช้งานในอุตสาหกรรม ดังนั้น เพื่อให้สะดวกในการจัดการโหลด ปลายทางของสายส่งกำลังไฟฟ้าจะเป็นหม้อแปลงลดแรงดันให้ต่ำลงเพื่อจ่ายโหลด เรียกปลายสายส่งกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อหม้อแปลงดังกล่าวว่าสถานีไฟฟ้าย่อย โดยจะมีหน้าที่รวบรวมการเชื่อมต่อโหลดจากผู้ใช้ไฟผ่านระบบส่งแรงดันปานกลางและแรงดันต่ำเพื่อเดินสายไปยังโหลดในพื้นที่ก่อนที่ถูกลดระดับแรงดันอีกครั้งผ่านหม้อแปลงจำหน่ายให้มีแรงดันจ่ายโหลดเท่ากับระดับแรงดันที่ผู้ใช้ไฟต้องการ

โดยทั่วไป ระบบสายป้อนจำหน่ายแบบรัศมีรับไฟจากสถานีไฟฟ้าเพียงจุดเดียวเท่านั้น (single point feeding) การจ่ายไฟจะถูกส่งผ่านสายป้อนจำหน่าย ตลอดความยาวของสายป้อนจะมีโหลดผู้ใช้ไฟต่ออยู่เป็นระยะ ๆ ผ่านหม้อแปลงจำหน่ายซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดัน 22 kV ไปเป็น 380/220 V ในปัจจุบัน การผลิตกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย (distributed generation : DG) จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเริ่มเข้ามามีบทบาทในการทำงานในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้ระบบจำหน่ายมีรูปแบบการจ่ายไฟที่แตกต่างออกไปจากเดิมอาจจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายต่ออยู่ตามโนดต่าง ๆ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน

2.4 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

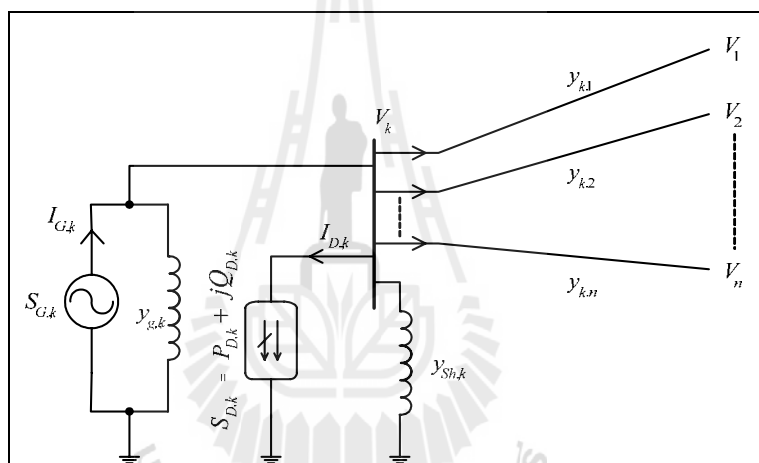
การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า หรือที่รู้จักกันในชื่อ power flow ซึ่งรูปแบบของปัญหาจะเป็นการหาขนาดและมุมเฟสของแรงดันในแต่ละบัส กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในแต่ละสายส่ง ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของโครงข่ายมีความสำคัญต่อการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง คุณสมบัติแรงดันที่บัสต่าง ๆ กระแสไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งเชื่อมต่อกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตเพื่อจ่ายโหลด ตลอดจนกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมในระบบ เป็นสิ่งที่ต้องวินิจฉัยเพื่อกำหนดจุดทำงาน การทำงานที่ต้นทุนการผลิตต่ำที่เป็นวัตถุประสงค์โดยทั่วไปของผู้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง การทำให้ต้นทุนต่ำโดยพิจารณาให้ระบบจ่ายโหลดคงที่นั้น อาจทำได้โดยการปรับกำลังงานที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ โดยให้โรงไฟฟ้าที่มีค่าเชื้อเพลิงในการผลิตกำลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยต่ำที่สุดผลิตกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงสุด โรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนสูงจะถูกพิจารณาเป็นลำดับสุดท้าย นอกจากปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์แล้ว การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังอาจจะพิจารณาในรูปของควมมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ความมั่นคง ความเชื่อถือได้ หรือปัจจัยอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าผู้ปฏิบัติงานควบคุมดูแลระบบไฟฟ้ากำลังจะใช้เกณฑ์ใดมากำหนดจุดการทำงานล้วนต้องอาศัยข้อมูลผลเฉลยแรงดันบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง รวมถึงโครงสร้างการเชื่อมต่อบัสต่าง ๆ ในรูปเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ หรือข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็น โดยทั่วไประบบไฟฟ้ากำลังนี้ การไหลของกระแสไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งจะมีค่าเป็นอัตราส่วนสูงเมื่อเทียบกับขีดจำกัดการทนกระแสของสายส่ง ทำให้ต้องมีการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม รวมทั้งควบคุมกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งไม่ให้สูงเกินไป ทำให้แบบจำลองโหลดที่บัสต่าง ๆ อยู่ในรูปของโหลดกำลังไฟฟ้าไม่ใช่โหลดกระแสไฟฟ้าหรืออิมพีแดนซ์ดังเช่นโหลดในวงจรเชิงเส้นทั่ว ๆ ไป ด้วยเหตุนี้ทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น การคำนวณผลเฉลยของวงจรไฟฟ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบโหนดหรือแบบเมชไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรง จำเป็นต้องใช้เทคนิคการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขควบคู่ไปด้วยเสมอ

การวิเคราะห์ปัญหาของระบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยทั่วไปแล้ว คำตอบของระบบสมการไม่สามารถหาผลเฉลยแบบแม่นยำตรง (exact solution) ได้ หรืออาจจะหาได้เฉพาะเงื่อนไขที่เจาะจงบางประการเท่านั้น วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขจึงได้ถูกนำมาใช้โดยอาศัยหลักการกำหนดค่าเริ่มต้นที่เป็นไปได้ของผลเฉลย จากนั้นพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงผลเฉลยดังกล่าวให้มีค่าเข้าสู่ผลเฉลยที่แท้จริง ผลเฉลยที่ได้นี้จะขึ้นกับเกณฑ์ความผิดพลาดที่ยอมรับได้ซึ่งต้องกำหนดไว้เพื่อเป็นเงื่อนไขในการสิ้นสุดกระบวนการวนรอบ (iterative process) ผลเฉลยในลักษณะนี้จะเรียกว่าผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเฉพาะในส่วนที่นำมาใช้สำหรับการแก้ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งปัญหานี้อาศัยหลักการหารากของ

ระบบสมการไม่เป็นเชิงเส้น (root finding of non-linear equations) ด้วยวิธีการวนรอบนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson iterative method) ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อ 2.4.2 ต่อไป

2.4.1 การคำนวณแรงดันสำหรับปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า

การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังอาศัยพื้นฐานการวิเคราะห์แรงดันโหนดเพื่อสร้างสมการ การวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นทั่วไปจะใช้สมการสมดุลกระแสที่บัสตามหลักของ KCL สำหรับการคำนวณในระบบไฟฟ้ากำลัง จะเปลี่ยนไปใช้หลักการสมดุลของกำลังไฟฟ้าที่บัสแทนค่าของกระแสดังกล่าว ผลจากการใช้สมการกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน จะได้สมการที่เรียกว่าสมการของการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน ผลเฉลยของระบบนี้ คือ เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ที่ยังไม่ทราบค่า พิจารณาจากระบบไฟฟ้ากำลังดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น

จากรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วยบัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น ในแต่ละบัสมีค่าที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

บัสสแลก (Slack bus) หรือ บัสแกว่ง (Swing bus) เป็นบัสที่ค่าขนาดของแรงดัน ($|V|$) และค่ามุมโหนด (δ) คงที่ ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) ที่ผลิตออกมา เป็นตัวที่ไม่ทราบค่า

บัสโหลด (Load bus) หรือ บัส PQ (P-Q bus) เป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่และไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ เป็นบัสที่ค่า P และ Q คงที่ ส่วนค่า $|V|$ และ δ เป็นตัวที่ไม่ทราบค่า

บัสควบคุมแรงดัน (Voltage-controlled bus) หรือ บัส PV (P-V bus) เป็นบัสที่ค่า P และค่า $|V|$ คงที่ ส่วน δ และ Q เป็นตัวที่ไม่ทราบค่า

กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนบัสทั้งสิ้น n บัส โดยที่กำหนดให้บัสหนึ่งบัสมีขนาดและมุมของแรงดันมีค่าคงที่ และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการคำนวณซึ่งจะเรียกบัสนี้ว่า บัสอ้างอิง (reference bus) หรือที่รู้จักกันในชื่อ บัสสแลก และไม่ต้องทำการคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง $n-1$ บัส เท่านั้น

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้การวิเคราะห์แบบ โหนด (nodal analysis) จะได้สมการสมดุลกระแสที่โหนด k ใด ๆ ดังนี้ $Y_{k,1}V_1 + Y_{k,2}V_2 + \dots + Y_{k,n}V_n = I_{G,k} - I_{D,k}$ หรือ

$$\sum_{i=1}^n Y_{k,i}V_i = I_{G,k} - I_{D,k} \quad (2.1)$$

เนื่องจากโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะอยู่ในรูปของกำลังงานไฟฟ้า ดังนั้น จะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^n Y_{k,i}V_i = \left(\frac{S_{G,k} - S_{D,k}}{V_k} \right)^* \quad (2.2)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส k ใด ๆ ได้ดังสมการที่ (2.3)

$$S_{G,k}^* - S_{D,k}^* = (V_k)^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i}V_i \quad (2.3)$$

โดยที่ $S_{G,k}, S_{D,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโหลดที่บัส k ตามลำดับ
 V_k คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส k
 $Y_{k,i}$ คือ แอดมิตแตนซ์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส k และบัส i
 V_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i
 $*$ คือ ตัวกระทำสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate)

ถ้ากำหนดค่าเชิงซ้อนของกำลังไฟฟ้า เฟสเซอร์แรงดัน และแอดมิตแตนซ์ ดังนี้

$$S_{G,k} = P_{G,k} + jQ_{G,k}$$

$$S_{D,k} = P_{D,k} + jQ_{D,k}$$

$$V_k = |V_k| \angle \delta_k$$

$$Y_{k,j} = |Y_{k,j}| \angle \theta_{k,j}$$

แทนค่าในสมการ (2.3) จะได้ความสัมพันธ์ในรูปพิกัดเชิงขั้ว ดังนี้

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = (|V_k| \angle -\delta_k) \sum_{i=1}^n (|Y_{k,i}| \angle \theta_{k,i}) (|V_i| \angle \delta_i) \quad (2.4)$$

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i}| |V_k| |V_i| \angle (\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.5)$$

จะพบว่าสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้ มีความไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้ในการแก้สมการด้วยการวนรอบ โดยในที่นี้จะนำเสนอวิธีการแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้า ด้วยระเบียบวิธีการวนรอบนิวตัน-ราฟสัน

2.4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

จากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส k ใด ๆ ในรูปพิกัดเชิงขั้ว ตามสมการ (2.4) และ (2.5) จะได้

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = (|V_k| \angle -\delta_k) \sum_{i=1}^n (|Y_{k,i}| \angle \theta_{k,i}) (|V_i| \angle \delta_i) \quad (2.6)$$

$$(P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i}| |V_k| |V_i| \angle (\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.7)$$

กำหนดให้

$$P_{sch,k} - jQ_{sch,k} = (P_{G,k} - P_{D,k}) - j(Q_{G,k} - Q_{D,k}) \quad (2.8)$$

สำหรับเฟสเซอร์แรงดันบัสดัที่เป็นผลเฉลยของระบบสมการนี้ จะทำให้สมการสมดุลอย่างใดก็ตาม ในกระบวนการวนรอบ ต้องดำเนินการกำหนดค่าเริ่มต้นของเฟสเซอร์แรงดันบัสดัซึ่งทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเริ่มต้นแบบราบเรียบ โดยการกำหนดให้แรงดันบัสดัเริ่มต้นของทุกบัสดัมีค่า $1.0 \angle 0^\circ$ p.u. หรือใช้ผลเฉลยแรงดันของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบที่ทำงาน ณ จุดทำงานก่อนหน้านี้ที่จะพิจารณา ถ้าค่าเริ่มต้นเหล่านี้ไม่ใช่ผลเฉลยแรงดันของระบบ จะทำให้สมการดังกล่าวไม่เป็นศูนย์ เกิดความคลาดเคลื่อนของผลรวมกำลังงานไฟฟ้าที่บัสดัขึ้นมา เรียกว่า ความไม่สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า (power mismatches) ซึ่งมีทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนี้

$$\Delta P_k = P_{sch,k} - P_{cal,k} = f_{p,k} \quad (2.9)$$

$$\Delta Q_k = Q_{sch,k} - Q_{cal,k} = f_{q,k} \quad (2.10)$$

โดยที่

$$P_{cal,k} = \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \cos(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.11)$$

$$Q_{cal,k} = - \sum_{i=1}^n |Y_{k,i} V_k V_i| \sin(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.12)$$

ใช้ระเบียบวิธีการวนรอบนิวตัน-ราฟสัน ประมาณผลเฉลยของระบบสมการที่รอบการคำนวณที่ $k+1$ ใด ๆ จะได้

$$f_{p,k+1} = \Delta P_{k+1} = \Delta P_k + [\Delta f_{p,k}]^T \cdot \Delta x = 0$$

$$\Delta P_k = -[\Delta f_{p,k}]^T \cdot \Delta x = 0$$

เมื่อ $x = [\delta \quad |V|]^T$ นั่นคือ

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

เนื่องจาก $P_{shh,k}$ มีค่าคงที่ จะได้ว่า $\frac{\partial f_{p,k}}{\partial x} = - \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial x}$ นั่นคือ

$$\Delta P_k = \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2.13)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะได้ว่า

$$\Delta Q_k = \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial Q_{cal,k}}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2.14)$$

รวมสมการเพื่อสร้างเมตริกซ์ สำหรับปรับปรุงผลเฉลยแรงดัน ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{cal}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_{cal}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{cal}}{\partial |V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

สามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & J1 & \vdots & \vdots & \vdots & J2 & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & J3 & \vdots & \vdots & \vdots & J4 & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \Delta \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_1| \\ \Delta |V_2| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ถ้าให้ บัสที่ m เป็นบัสสแต็ก จากสมการข้างบน หลักที่ $k = m$ และแถวที่ $k = m$ จะถูกกำจัดออกไปเหลือเมตริกซ์ขนาดเพียง $2(n-1) \times 2(n-1)$ เท่านั้น และสามารถหาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน ได้ดังนี้

เมตริกซ์ย่อย $J1$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n |V_k V_j Y_{k,j}| \sin(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = -|V_k V_i Y_{k,i}| \sin(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad i \neq k \quad (2.18)$$

เมตริกซ์ย่อย $J2$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2|V_k Y_{k,k}| \cos(\theta_{k,k}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n |V_j Y_{k,j}| \cos(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} = |V_k Y_{k,i}| \cos(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad i \neq k \quad (2.20)$$

เมตริกซ์ย่อย $J3$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n |V_k V_j Y_{k,j}| \cos(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k) \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} = -|V_k V_i Y_{k,i}| \cos(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad i \neq k \quad (2.22)$$

เมตริกซ์ย่อย $J4$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} = -2|V_k Y_{k,k}| \sin(\theta_{k,k}) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n |V_j Y_{k,j}| \sin(\theta_{k,j} + \delta_j - \delta_k) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_i|} = -|V_k Y_{k,i}| \sin(\theta_{k,i} + \delta_i - \delta_k) \quad i \neq k \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.16) สามารถหาผลเฉลยในรอบที่ $h+1$ โดยคำนวณเมตริกซ์ผกผันจาโคเบียน จะได้

$$\begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}^{(h)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix}^{-1(h)} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(h)} \quad (2.25)$$

การคำนวณเพื่อปรับปรุงผลเฉลยแรงดันจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสูงสุด มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ หรือ $\max \left(\left| P_{mis,max} \right|, \left| Q_{mis,max} \right| \right) < \varepsilon_{tol}$

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณซ้ำในรอบต่อไป

2) คำนวณค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{bus} ในรูประบบต่อหน่วย (per-unit-system)

3) คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) สำหรับบัสโหลด

4) คำนวณค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ $J1-J4$

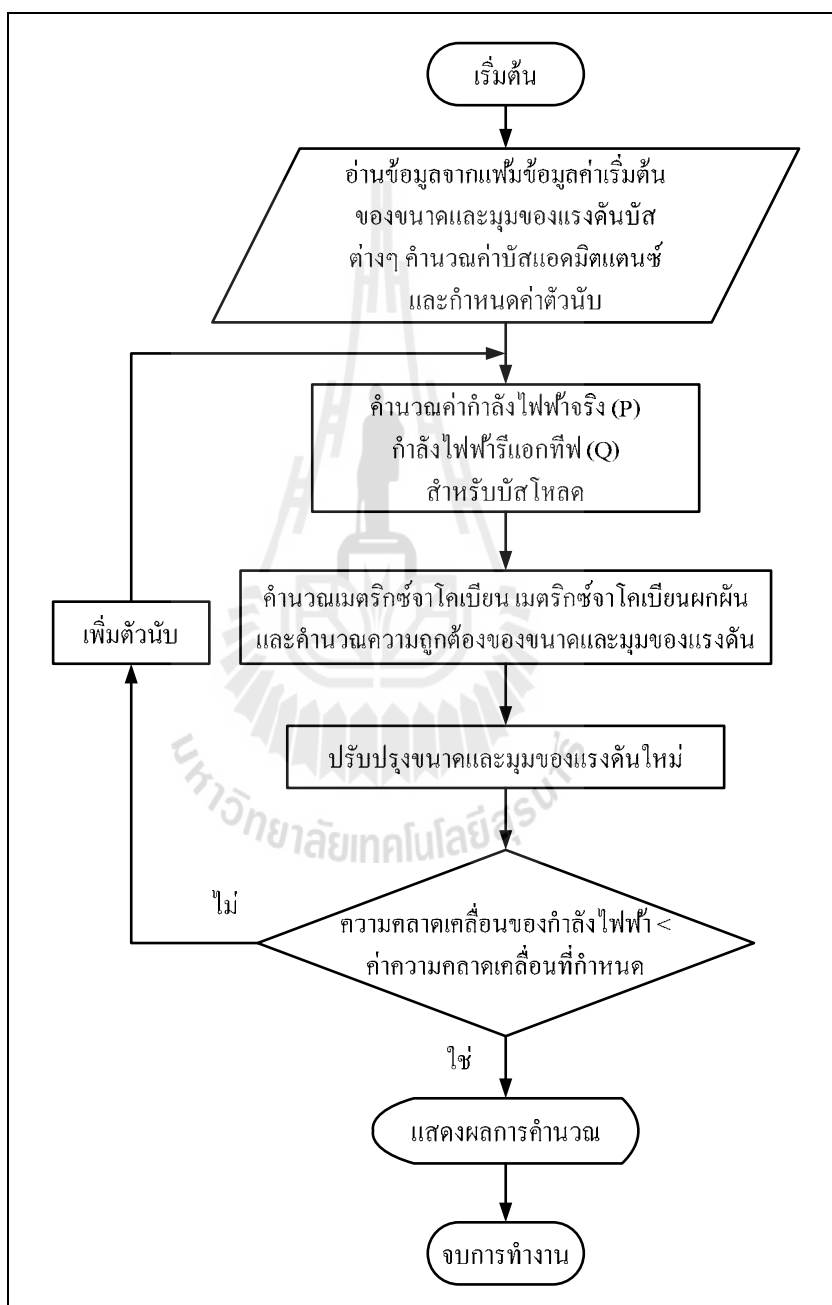
5) คำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนผกผัน และคำนวณความถูกต้องของแรงดัน $\Delta \delta$ และ $\Delta |V|$ ทุกบัส

6) คำนวณ δ และ $|V|$ ค่าใหม่โดยรวม $\Delta \delta$ และ $\Delta |V|$ กับค่าเก่า

7) ตรวจสอบค่า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta \delta$ และ $\Delta |V|$ ถ้ามีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 3 ใหม่

8) ถ้า ΔP และ ΔQ หรือค่า $\Delta \delta$ และ $\Delta |V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้แสดงผลที่ทำการคำนวณได้

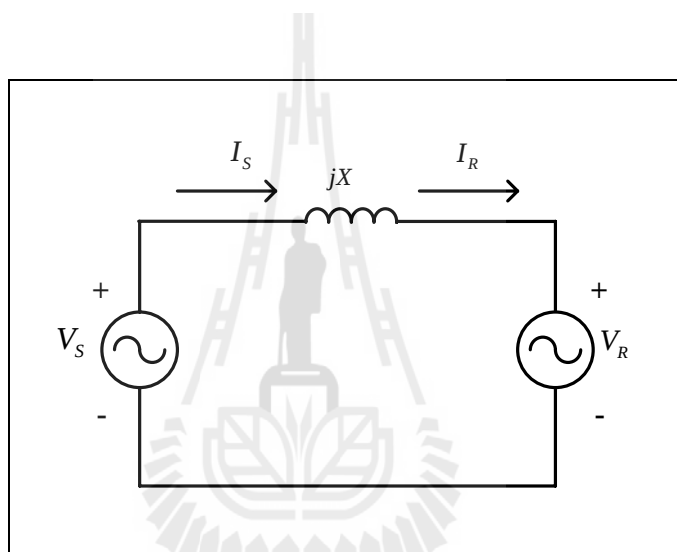
สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.5 หลักการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นงานที่มีความสำคัญในการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งมีปริมาณสูงและในหลาย ๆ กรณีมีค่าใกล้เคียงกับความสามารถในการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุด (maximum transfer capacity) ของสายส่ง การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบส่งจ่ายกระจายตัวกันไปในสายส่งเส้นต่าง ๆ อย่างเหมาะสม จะช่วยทำให้ไม่เกิดเหตุการณ์ที่สายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งจะทำงานเกินพิกัดการส่งกำลังไฟฟ้าหรือโหลดเกิน (overload) ผลดังกล่าวจะทำให้อุปกรณ์ป้องกันสายส่งทำงาน อาจจะทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ถ้าการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไม่ดีพอ



รูปที่ 2.4 ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย

เริ่มต้นพิจารณาจากวงจรในรูปที่ 2.4 เพื่อนำเสนอเทคนิคการแก้ปัญหาดังกล่าว การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งคำนวณได้จาก

$$I_S = I_R = \frac{V_S - V_R}{jX} \quad (2.26)$$

นั่นคือ

$$S_{SR}^* = S_S^* I_S = V_S^* \left(\frac{V_S - V_R}{jX} \right) = \frac{V_S^2}{jX} - \frac{V_S^* V_R}{jX} \quad (2.27)$$

$$V_S = |V_S| \angle 0^\circ \quad \text{และ} \quad V_R = |V_R| \angle \delta \quad \text{จะได้ว่า}$$

$$\begin{aligned} S_{SR}^* = P_{SR} - jQ_{SR} &= -j \frac{|V_S|^2}{X} + j \frac{|V_S V_R|}{X} (\cos \delta + j \sin \delta) \\ &= -\frac{|V_S V_R|}{X} \sin \delta - j \left(\frac{|V_S|^2 - |V_S V_R| \cos \delta}{X} \right) \end{aligned} \quad (2.28)$$

นั่นคือ

$$P_{SR} = -\frac{|V_S V_R|}{X} \sin \delta \quad (2.29)$$

$$Q_{SR} = \left(\frac{|V_S|^2 - |V_S V_R| \cos \delta}{X} \right) \quad (2.30)$$

จะพบว่า สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากสมการที่ (2.29) - (2.30) ขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัว ได้แก่ ขนาดแรงดัน มุมแรงดัน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายส่ง ดังนั้น การควบคุมให้กำลังไฟฟ้าไหลไปในทิศทางที่ต้องการในปริมาณที่กำหนด ทำได้โดยการปรับค่าตัวแปรตัวใดตัวหนึ่ง หรือ 2 จาก 3 ตัว หรือทั้งหมดในเวลาเดียวกัน ซึ่งการควบคุมทั้ง 3 แบบรู้จักกันดีและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องในชื่อของการชดเชยกำลังไฟฟารีแอคทีฟ (reactive power compensation) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.6 การชดเชยกำลังไฟฟารีแอคทีฟ

การชดเชยกำลังไฟฟารีแอคทีฟเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบ เพื่อลดกำลังงานไฟฟารีแอคทีฟที่จ่ายโดยแหล่งจ่าย เนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟารีแอคทีฟส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียและแรงดันตกในระบบ ดังนั้นการจ่ายกำลังไฟฟารีแอคทีฟเพื่อชดเชยความต้องการของโหลดและชดเชยค่าความเหนี่ยวนำของระบบส่งจ่ายช่วยให้ระบบมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำและระดับแรงดันตกมีค่าลดลง

จากการควบคุมหรือปรับเปลี่ยนค่าตัวแปร 3 ตัวดังที่ได้กล่าวมา นำไปสู่เทคนิคการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยการควบคุมขนาดแรงดันบัส การปรับเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง การเลื่อนเฟสของมุมแรงดันบัส ดังนี้

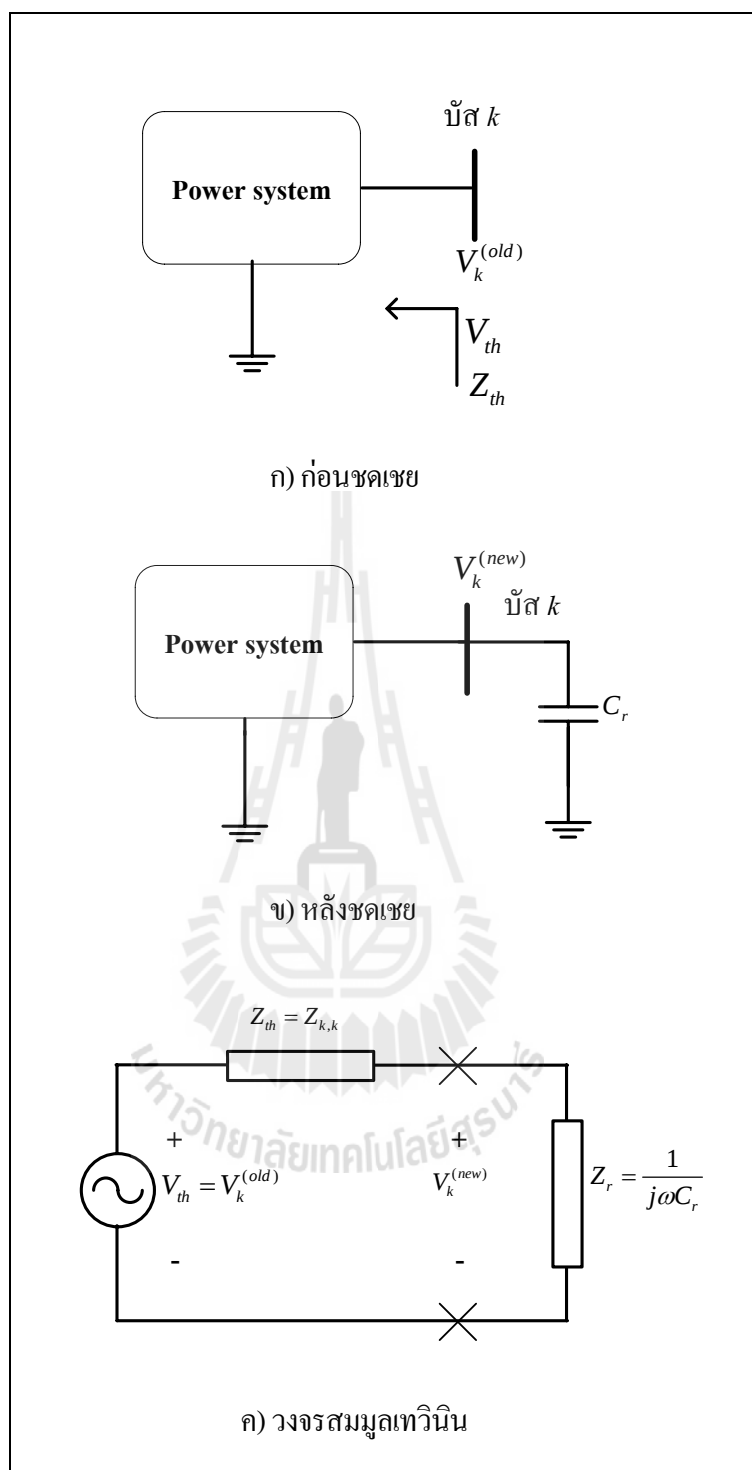
2.6.1 การควบคุมขนาดแรงดันบัส

วิธีการควบคุมขนาดแรงดันบัสอาจใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่ที่สถานีไฟฟ้า ช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยการปรับกระแสสนามให้เกิดสถานการณ์กระตุ้นเกิน (over-excitation) หรืออาจใช้อุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน (shunt compensate) ชนิดต่าง ๆ เช่น ตัวเก็บประจุ หรือ SVC (static var compensator) เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการใช้ตัวเก็บประจุเท่านั้น

ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลังนี้เป็นปัญหาเปิด มีคำถามที่ต้องการคำตอบสำหรับปัญหานี้อยู่ 2 ประการด้วยกัน คือ

- 1) ควรจะติดตั้งตัวเก็บประจุที่ใด
- 2) ขนาดของตัวเก็บประจุที่จะติดตั้งควรมีค่าเท่าใด





รูปที่ 2.5 การติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ในทางปฏิบัติตำแหน่งที่ติดตั้งตัวเก็บประจุจะติดตั้งในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ที่สถานีไฟฟ้าย่อย ถ้าระบบมีขนาดใหญ่ จำนวนสถานีก็มีค่ามากไปด้วย การเลือกขนาดตัวเก็บประจุจะพิจารณาผลต่อแรงดัน ณ ตำแหน่งที่ติดตั้ง โดยไม่คำนึงถึงผลของการรักษาระดับแรงดันของทั้งระบบ หมายความว่า ถ้าต้องการควบคุมแรงดันที่บัสใด ๆ ให้มีค่าตามต้องการ โดยสนใจขนาดของแรงดันบัสดังกล่าวเท่านั้น ปัญหานี้จะสามารถใช้การประมาณค่า ขนาดตัวเก็บประจุด้วยการวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นได้

ถ้ากำหนดให้ระบบไฟฟ้ากำลังดังรูปที่ 2.5 ขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมคำนวณได้จากสมการ

$$B_r = \omega Cr = \frac{|V_k^{(new)} - V_k^{(old)}|}{|Z_{k,k} V_k^{(new)}|} = \frac{|\Delta V_k|}{|Z_{k,k} V_k^{(new)}|} \quad (2.31)$$

ถ้าต้องการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าของทั้งระบบ (ทุกบัสไปพร้อม ๆ กัน) เทคนิคการแก้ปัญหาแบบเชิงเส้นเฉพาะจุดโดยใช้วงจรสมมูลเทวินินไม่สามารถทำได้ ต้องสร้างแบบจำลองของตัวเก็บประจุสำหรับปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าขึ้นมาเพื่อใช้ปรับค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ติดตั้งซึ่งสามารถพิจารณาได้ทั้งในรูปของแบบจำลองซัสเซปแทนซ์ (susceptance model) หรือแบบจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนี้

1) แบบจำลองซัสเซปแทนซ์ นำค่า B_r ของตัวเก็บประจุที่ทำการชดเชยไปรวมเข้ากับ $[Y_{bus}]$

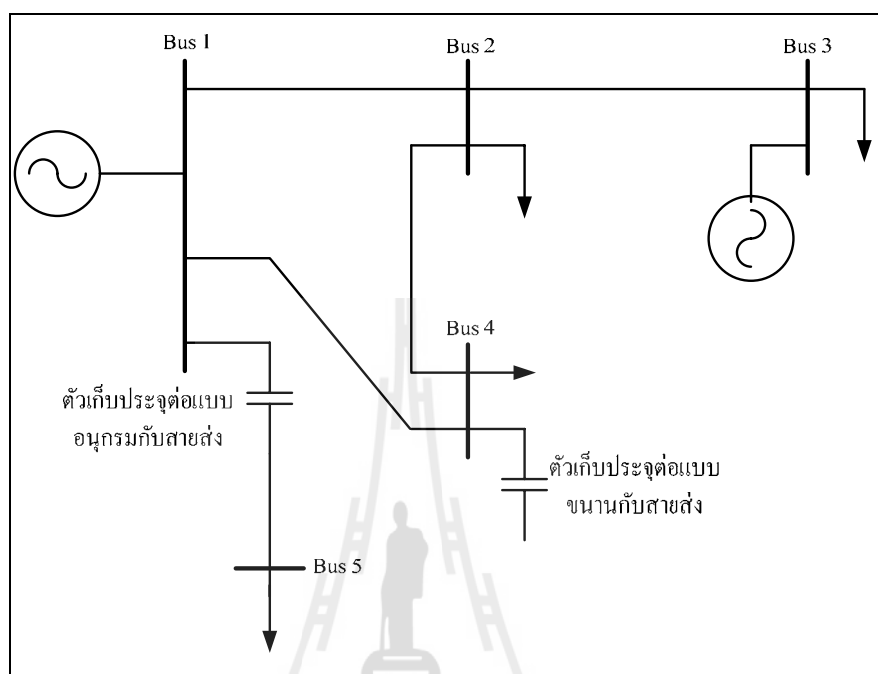
2) แบบจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ นำค่า Q_r ของตัวเก็บประจุรวมเข้ากับ Q_{sch}

2.6.2 การปรับเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์ของระบบส่งจ่าย

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีหม้อแปลงซึ่งสามารถปรับตั้งค่าแท็บได้ ทำให้อัตราส่วนแรงดันทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย การเปลี่ยนค่าแท็บส่งผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่ถูกถ่ายโอนไปยังอีกด้านหนึ่งโดยตรง ผลการปรับแท็บหม้อแปลงนี้ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเปลี่ยนค่าได้ ดังนั้นการปรับเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์ของระบบส่งจ่ายอีกวิธีหนึ่งคือ การเปลี่ยนแปลงค่าแท็บหม้อแปลงที่สถานีไฟฟ้า

นอกจากหม้อแปลงแล้ว การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของระบบอาจจะทำได้โดยการต่อเชื่อมตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบ ตัวเก็บประจุนี้ อาจจะต่อขนานเข้ากับบัสหรืออนุกรมกับสายส่งก็ได้ ดังในรูปที่ 2.6 การเลือกค่าแท็บหรือตัวเก็บประจุที่เหมาะสมจะส่งผลให้ระดับแรงดัน

ในระบบไฟฟ้ากำลังถูกรักษาไว้ในขอบเขตที่ปลอดภัย ตลอดจนการช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบ

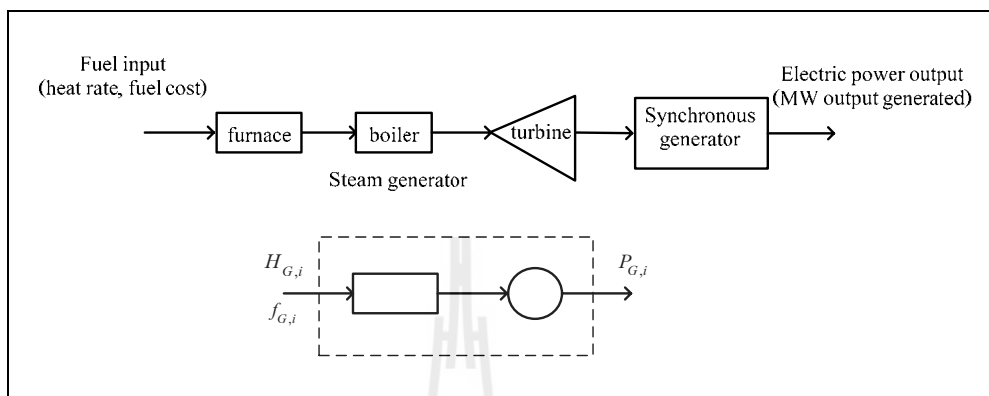


รูปที่ 2.6 การติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบส่งจ่าย

2.7 แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน

โรงไฟฟ้าพลังความร้อน (thermal power plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้พลังงานความร้อนจากไอน้ำหรือก๊าซ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมาเป็นต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องกังหันไอน้ำหรือกังหันก๊าซ แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ โรงไฟฟ้าไอน้ำ โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ และโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม โรงไฟฟ้าไอน้ำ คือ โรงไฟฟ้าที่ใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงหลายชนิด เช่น ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน น้ำมันเตา ฯลฯ ต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำแรงดันสูง แล้วไปจุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้หมุนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า เหมาะสำหรับเดินเครื่องเป็นโรงไฟฟ้าฐาน ที่ใช้เดินเครื่องแต่ครั้งเป็นเวลานาน โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ คือ โรงไฟฟ้าที่ใช้หลักการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องอัดอากาศ ให้มีแรงดันสูงไปขับเคลื่อนกังหันก๊าซให้หมุนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โรงไฟฟ้าประเภทนี้สามารถเดินเครื่องได้อย่างรวดเร็ว เหมาะที่จะใช้เป็นโรงไฟฟ้าสำรองเพื่อเดินเครื่องในช่วงที่เกิดความต้องการสูงสุดของระบบ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม คือ โรงไฟฟ้าที่นำเอาเครื่องกังหันก๊าซและเครื่องกังหันไอน้ำมาใช้ร่วมกัน โดยนำความร้อนจากไอเสียที่ออกจากเครื่องกังหันก๊าซที่มีความ

ร้อนสูงไปถ่ายเทความร้อนให้น้ำ ทำให้น้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า เป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนใหม่ๆ ในปัจจุบัน โรงไฟฟ้าพลังความร้อน มีการทำงานซึ่งเขียนในรูปแบบอย่างง่ายได้เป็น



รูปที่ 2.7 แผนภาพการผลิตกำลังงานไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน

โดยปกติความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงอินพุต (fuel input) กับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (power output) เขียนให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่ายระหว่างอินพุตของวัฏจักร ได้แก่ ปริมาณความร้อนที่ใช้กับเอาต์พุต ได้แก่ กำลังงานที่จ่ายได้ ดังต่อไปนี้

$$H_{G,i} = a_i + b_i P_{G,i} + c_i P_{G,i}^2 \quad (2.32)$$

เมื่อ $H_{G,i}, P_{G,i}$ คือ อัตราความร้อนสุทธิของวัฏจักร (net cycle heat-rate) และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (output power) ของหน่วยผลิตที่ i

a_i, b_i, c_i คือ สัมประสิทธิ์อัตราความร้อน (heat-rate coefficients)

ถ้ากำหนดให้ราคาค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตมีค่าเท่ากับ τ บาทต่อชั่วโมง จะได้

$$f_{G,i} = \tau \times H_{G,i} = \tau (a_i + b_i P_{G,i} + c_i P_{G,i}^2) \quad (2.33)$$

$$f_{G,i} = \alpha_i + \beta_i P_{G,i} + \gamma_i P_{G,i}^2 \quad (2.34)$$

เรียก $f_{G,i}$ ว่า ค่าต้นทุนเชื้อเพลิง (fuel cost) ของหน่วยการผลิตที่ i

โรงไฟฟ้าหนึ่งโรงสามารถมีหน่วยการผลิตได้หลายหน่วย แต่ละหน่วยอาจจะใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน ดังนั้น ต้นทุนการผลิตโดยรวม (total generation cost) ของโรงไฟฟ้ามีค่าเป็น

$$F_T = \sum_{i=1}^{N_G} f_{G,i} = \sum_{i=1}^{N_G} (\alpha_i + \beta_i P_{G,i} + \gamma_i P_{G,i}^2) \quad (2.35)$$

เมื่อ N_G คือ จำนวนหน่วยการผลิตย่อยทั้งหมดของโรงไฟฟ้า

แบบจำลองที่ข้างต้นนี้เรียกว่า ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงรูปแบบพหุนามอันดับสอง ซึ่งเป็นเพียงรูปแบบหนึ่งเท่านั้น ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงสามารถใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นอื่น ๆ แทนได้ เช่น กรณีที่หน่วยการผลิตเป็นแบบกังหันไอน้ำหลายวาล์ว (multi-valve steam turbines) ณ จุดที่ทำการเปิดวาล์วจะทำให้การใช้พลังงานความร้อนมีค่าสูงขึ้น ลักษณะของฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงจึงไม่สามารถที่จะจำลองโดยใช้สมการกำลังสองได้ แต่จะใช้สมการที่เรียกว่า ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงแบบมีจุดเปิดวาล์วหลายจุด (valve-point loading fuel-cost function) หรือฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงรูปแบบฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น รูปแบบสมการแสดงตามสมการที่ (2.36)

$$H_{G,i} = a_i + b_i P_{G,i} + c_i P_{G,i}^2 + \left| d_i \sin(e_i (P_{G,i}^{\min} - P_{G,i})) \right| \quad (2.36)$$

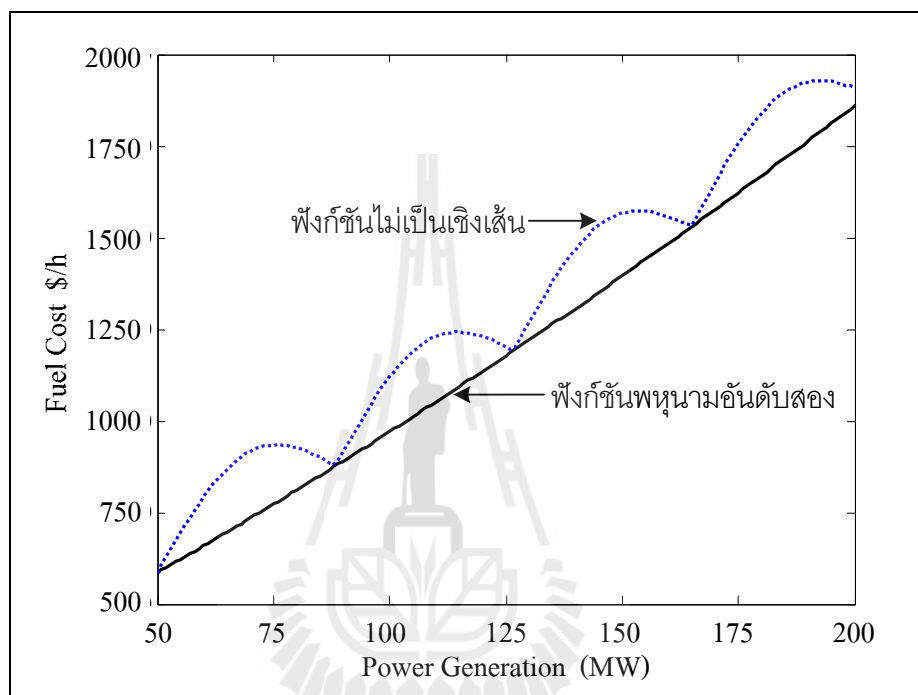
เมื่อ a_i, b_i, c_i, d_i, e_i คือ สัมประสิทธิ์อัตราความร้อน

$P_{G,i}^{\min}$ คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตต่ำสุดของหน่วยการผลิตที่ i

จากสมการฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงรูปแบบพหุนามอันดับสองและฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงรูปแบบฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ (2.35) และ (2.36) นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกับค่าเชื้อเพลิงได้ดังรูปที่ 2.8 เมื่อกำหนดให้หน่วยการผลิตไฟฟ้าย่อย 1 หน่วย มีสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงดังตารางที่ 2.1 และกำหนดขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของหน่วยการผลิตย่อยอยู่ในช่วง 50 MW – 200 MW

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของหน่วยการผลิตย่อย

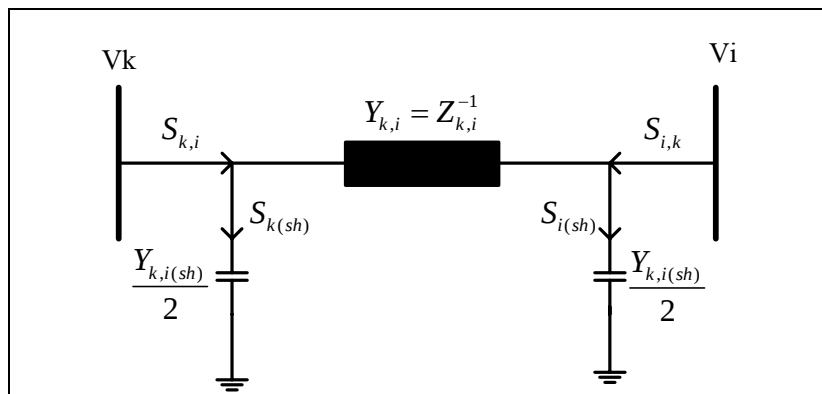
รูปแบบฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิง	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
พหุนามอันดับสอง	240	6.5	0.008	182	0.082
ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	240	6.5	0.008	-	-



รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงแบบพหุนามอันดับสองและฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

2.8 การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียผ่านสายส่ง

เมื่อคำนวณผลเฉลยแรงดันบัสเสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งเพื่อดูการกระจายของการไหลของกำลังไฟฟ้า ว่ามีทิศทางไปทางใด และมีปริมาณเท่าใด กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตลอดจน แรงดันตก คุณสมบัติเหล่านี้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อให้ระบบทำงานให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและประหยัด



รูปที่ 2.9. แบบจำลองสายส่งเชื่อมต่อระหว่างบัส k และ i

จากรูปที่ 2.9 ใช้สูตรการคำนวณสังยุคของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลในสายส่งจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$S_{k,i}^* = S_{k(sh)}^* + S_{k,i(line)}^* = \frac{1}{2} y_{k,i(sh)} V_k V_k^* + y_{k,i} (V_k - V_i) V_k^* \quad (2.37)$$

$$S_{k,i}^* = \frac{1}{2} y_{k,i(sh)} |V_k|^2 + y_{k,i} V_k^* (V_k - V_i) = P_{k,i} - Q_{k,i} \quad (2.38)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$S_{i,k}^* = \frac{1}{2} y_{k,i(sh)} |V_i|^2 + y_{k,i} V_i^* (V_i - V_k) = P_{i,k} - Q_{i,k} \quad (2.39)$$

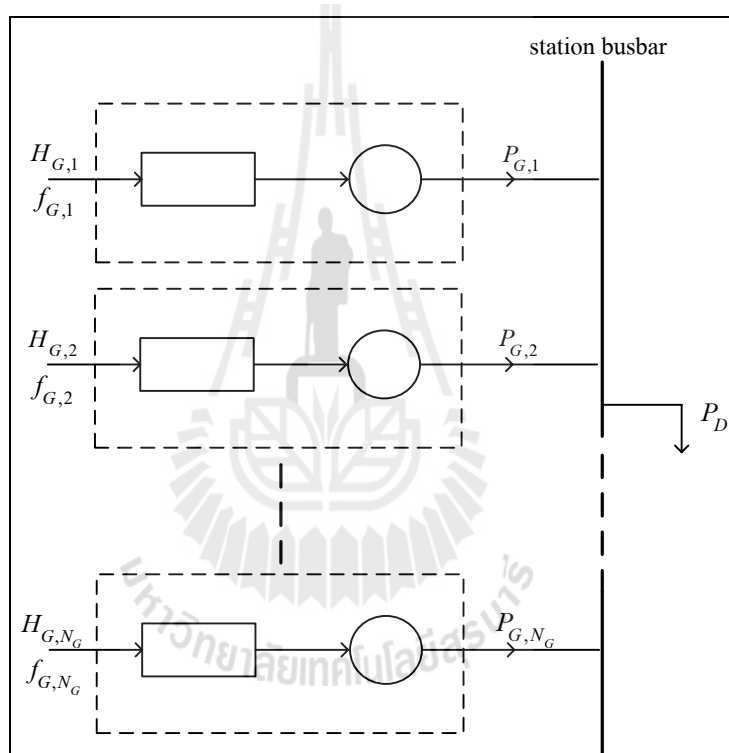
กำลังงานไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งคำนวณได้ดังนี้

$$S_{k,i(loss)}^* = S_{k,i}^* + S_{i,k}^* = P_{k,i(loss)} + jQ_{k,i(loss)} \quad (2.40)$$

2.9 การจ่ายโหลดอย่างประหยัด

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างหนึ่ง โดยพิจารณาการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังให้มีต้นทุนการผลิตโดยรวมต่ำที่สุดและระบบต้องทำงานในขอบเขตที่ปลอดภัย

พิจารณาโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแห่งหนึ่งที่ประกอบด้วยหน่วยการผลิตย่อย N_G หน่วย โดยหน่วยการผลิตทั้งหมดถูกต่อเชื่อมเข้าไปที่บัสบาร์ของโรงไฟฟ้าเพื่อทำการจ่ายโหลดรวมของระบบโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แบบจำลองของโรงไฟฟ้าที่ประกอบด้วยหน่วยการผลิตต่อเข้ากับบัสบาร์

จากรูป จะได้เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าดังนี้

Power Generation = Power Demand (neglecting losses)

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i} - P_D = 0 \quad (2.41)$$

ต้นทุนการผลิต $F_T = f(P_{G,i})$ ในการทำงานต้องมีค่าต่ำที่สุด นั่นคือ จะได้รูปแบบของปัญหาเป็น

$$\text{Minimize} \quad F_T = f(P_{G,i}) = \sum_{i=1}^{N_G} f_{G,i}(P_{G,i}) \quad (2.42)$$

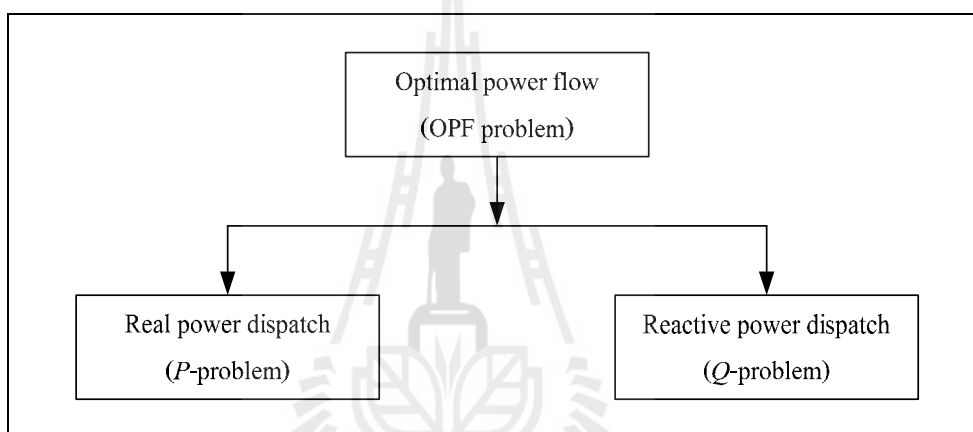
$$\text{Subject to} \quad \sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i} - P_D = 0 \quad (2.43)$$

ปัญหาดังกล่าวนี้ เรียกว่า ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ (constrained optimization problem) โดยใช้เทคนิคการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด จะได้ผลเฉลยของปัญหาเมื่อจุดทำงานของระบบที่ให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด

2.10 การไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดหรือที่เรียกทับศัพท์ว่า ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ (optimal power flow : OPF) หรืออีกชื่อหนึ่ง คือ ออปติมัลโหลดโฟลว์ (optimal load flow : OLF) (11-14) ถูกนำเสนอโดย Carpentier ในปี 1962 เป็นการศึกษาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดของต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไขบังคับสมการหนึ่งชุด ได้แก่ กำลังผลิตเท่ากับโหลดบวกกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ซึ่งกำลังไฟฟ้าสูญเสียนี้เป็นผลมาจากการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่าย การปรับการไหลกำลังไฟฟ้าส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบโดยตรง นั่นคือ การจ่ายโหลดอย่างประหยัดนั้น ถึงแม้จะพิจารณาเงื่อนไขหลายประการ แต่เงื่อนไขบังคับสมการจะใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าสูญเสียในรูปอย่างง่าย เช่น ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ถึงแม้การแก้ปัญหด้วยการจ่ายโหลดอย่างประหยัดจะง่ายมากกว่า แต่ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าจะหายไป ส่งผลกระทบต่อปัญหาการรักษาระดับแรงดันการทำงานของระบบ ดังนั้น ปัญหาที่ใช้หลักการสมดุลของกำลังผลิตในรูปของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดนี้พิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง นิยมเรียกสั้น ๆ ว่า ปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริง (problem of real-power allocation หรือ *P-problem*) เมื่อได้ผลการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงจากหน่วยการผลิตของโรงไฟฟ้าต่าง ๆ แล้ว ปัญหาที่สำคัญสืบเนื่องกันมาคือการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าไปยังโหลดผ่านระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้าให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมต่ำที่สุดและการกระจายของแรงดันที่บัสต่าง ๆ ยังอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ปัญหาสืบเนื่องนี้

เรียกว่า ปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (problem of reactive power allocation หรือ *Q-problem*) โดยจะกำหนดการปรับเปลี่ยนตัวแปรควบคุม ได้แก่ ขนาดแรงดันของบัสควบคุม แรงดันต่าง ๆ ที่กระจายอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าเทปหม้อแปลงในระบบ ค่าอุปกรณ์ชดเชย กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสโหลด หรืออุปกรณ์ชดเชยต่าง ๆ เป็นต้น ภายใต้การแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด โดยหาจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ปัญหาการสูญเสียที่น้อยที่สุด (loss minimization problem) ปัจจุบันนี้ ระบบไฟฟ้ากำลังซับซ้อนมากขึ้น ปัญหาแรงดันตกและเสถียรภาพแรงดันมีบทบาทอย่างมากในการทำงานนอกเหนือจากเงื่อนไขของการทำงานอย่างประหยัด พิจารณาจากแผนภาพต่อไปนี้



รูปที่ 2.11 รูปแบบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดอาจแบ่งแยกออกเป็นปัญหาย่อย 2 ปัญหาย่อย (real and reactive power decomposition) คือปัญหา P และปัญหา Q ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

2.10.1 การจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริง (P -problem)

การจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ต้นทุนการผลิตเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และใช้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวแปรควบคุม (Control variables) แรงดันที่บัสควบคุมและบัสอ้างอิง ค่าเทปหม้อแปลง เป็นตัวแปรคงที่ (Fixed variable) เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด มีรูปแบบของปัญหาเป็นดังนี้

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{G,i}) \quad (2.44)$$

เมื่อ $F_i(P_{G,i}) = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i + b_i P_{G,i} + c_i P_{G,i}^2)$ (ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง) หรือ
 $F_i(P_{G,i}) = a_i + b_i P_{G,i} + c_i P_{G,i}^2 + \left| d_i \sin(e_i (P_{G,i}^{\min} - P_{G,i})) \right|$ (ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น)
Subject to คือ สมการการไหลกำลังไฟฟ้า
 ตัวแปรควบคุม คือ กำลังผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากหน่วยการผลิตย่อยต่าง ๆ
 เป็นตัวแปรคงที่ คือ ขนาดแรงดันบังคับควบคุม ขนาดกำลังไฟฟ้าของตัวชดเชยต่าง ๆ ค่าเทียบ
 หม้อแปลง หรืออื่น ๆ
 ตัวแปรสถานะ คือ ขนาดแรงดันของบัสโหลด มุมเฟสแรงดันของบัสต่าง ๆ กำลังไฟฟ้ารี
 แอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลัง N_B บัส และมีจำนวนโรงจักรไฟฟ้าในระบบ

N_G เครื่อง

- 1) ระบบไฟฟ้ามีจำนวน Voltage controller bus จำนวน N_{PV}
- 2) ระบบไฟฟ้ามีจำนวนแท็บหม้อแปลง จำนวน N_T
- 3) ระบบไฟฟ้ามีบัสอ้างอิง 1 บัส

กำหนดให้ u เป็นตัวแปรควบคุม และ p เป็นตัวแปรคงที่ $u = [P_{G,i}]$ และ $p = [V_j \ V_{ref} \ T_k]$

โดยที่ $P_{G,i} \in [P_{G,i}^{\min}, P_{G,i}^{\max}] ; i=1,2,...,N_G-1$

$V_j \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}] ; j=1,2,...,N_{PV}$

$T_k \in [T_k^{\min}, T_k^{\max}] ; k=1,2,...,N_T$

$V_{ref} \in [V_{ref}^{\min}, V_{ref}^{\max}]$

เมื่อ $V_j^{\min}, V_j^{\max}$ คือ ขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของแรงดันที่บัสควบคุม

$T_k^{\min}, T_k^{\max}$ คือ ขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของแท็บหม้อแปลง

$V_{ref}^{\min}, V_{ref}^{\max}$ คือ ขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของแรงดันที่บัสอ้างอิง

ถ้ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบใช้การคำนวณจากผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าของการ
 คำนวณผลเฉลี่ยการไหลของกำลังไฟฟ้า นั้นหมายความว่า ขนาดแรงดันบังคับควบคุม
 ขนาดกำลังไฟฟ้าของตัวชดเชยต่าง ๆ ค่าเทียบหม้อแปลง หรืออื่น ๆ จะต้องถูกกำหนดให้คงที่หรือ
 เป็นตัวแปรคงที่ โดยตัวแปรเหล่านี้จะถูกปรับในส่วนของการแก้ปัญหากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

2.10.2 การจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q-problem)

การจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้การสูญเสียกำลังไฟฟ้าของระบบเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แรงดันที่บัสควบคุมและบัสอ้างอิง ค่าเทียบหม้อแปลงเป็นตัวแปรควบคุม กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดเป็นตัวแปรคงที่ เพื่อให้ระบบมีกำลังสูญเสียต่ำสุดรูปแบบของปัญหาเป็นดังนี้

$$\text{Minimize} \quad F_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N_L} g_{i,j} \{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad (2.45)$$

เมื่อ F_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งทั้งหมด
 N_L คือ จำนวนสายส่งทั้งหมด
 V_i, V_j คือ ขนาดของแรงดันที่บัส i และ บัส j
 δ_i, δ_j คือ มุมของแรงดันที่บัส i และ บัส j
 $g_{i,j}$ คือ ความนำไฟฟ้าจากบัส i ไป บัส j

Subject to สมการการไหลกำลังไฟฟ้า
 ตัวแปรควบคุม ขนาดแรงดันบัสควบคุม ขนาดกำลังไฟฟ้าของตัวชดเชยต่าง ๆ ค่าเทียบหม้อแปลง หรืออื่น ๆ
 เป็นตัวแปรคงที่ กำลังผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากหน่วยการผลิตย่อยต่าง ๆ
 ตัวแปรสถานะ ขนาดแรงดันของบัสโหลด มุมเฟสแรงดันของบัสต่าง ๆ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ปัญหาทั้ง 2 นี้ จำเป็นต้องทำควบคู่กัน ไปจนกระทั่งได้จุดคำตอบที่ไม่สามารถลดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้อีก

2.10.3 การแก้ปัญหาร่วมของการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

จากการแก้ปัญหาร่วมแบบลำดับในหัวข้อ 2.10.1 และ 2.10.2 เป็นปัญหาการแยกคู่กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (real and reactive power decomposition : PQ decomposition) ถูกนำมาใช้ในช่วงเวลาที่เครื่องช่วยคำนวณมีประสิทธิภาพต่ำ ปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีสมรรถนะสูงขึ้นมาก ทำให้การรวมปัญหาทั้ง 2 เข้าด้วยกันมีประสิทธิภาพมากกว่า เรียกว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด การเลือกใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทำได้หลากหลาย เช่น ต้นทุนการผลิตโดยรวมของระบบ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายส่ง อัตราการ

ปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก หรืออื่น ๆ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะใช้ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตโดยรวมของระบบเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายส่ง ซึ่งรูปแบบของปัญหาเป็นดังนี้

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimize} & \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{G,i}) \text{ หรือ } F_{\text{loss}} \text{ หรืออื่น ๆ} \\
 \text{Subject to} & \text{สมการการไหลกำลังไฟฟ้า} \\
 \text{ตัวแปรควบคุม} & \text{กำลังผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากหน่วยการผลิตย่อยต่าง ๆ} \\
 & \text{ขนาดแรงดันบังคับควบคุม ขนาดกำลังไฟฟ้าของตัวชดเชยต่าง ๆ} \\
 & \text{ค่าเทียบหม้อแปลง หรืออื่น ๆ} \\
 \text{ตัวแปรสถานะ} & \text{ขนาดแรงดันของบัสโหลด มุมเฟสแรงดันของบัสต่าง ๆ กำลังไฟฟ้า} \\
 & \text{รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า}
 \end{array}$$

ในกรณีของปัญหาร่วมของการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไม่มีเป็นตัวแปรคงที่

2.11 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยกล่าวถึงโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันซึ่งเป็นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบ อธิบายถึงหลักการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียผ่านสายส่ง และปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน สุดท้ายเป็นการกล่าวถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดเพื่อนำเสนอการคำนวณจุดการทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อให้ระบบมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด กำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด แรงดันบัส กำลังไฟฟารีแอกทีฟจากอุปกรณ์ชดเชย รวมถึงกำลังไฟฟ้าจริงจากหน่วยการผลิตที่ไม่เกินขีดจำกัดของการจัดสรรได้ ส่วนวิธีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดและการคำนวณจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด

3.1 บทนำ

การศึกษาปัญหาค่าเหมาะที่สุดนั้นไม่สามารถดำเนินการได้โดยตรง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาขึ้นมา ภายใต้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีคุณสมบัติที่ชัดเจน เช่น ความสามารถในการคำนวณอนุพันธ์ หรือความต่อเนื่องของฟังก์ชัน เป็นต้น ดังนั้น การศึกษาปัญหาค่าเหมาะที่สุดส่วนใหญ่จะเน้นไปที่เทคนิคการคำนวณบนพื้นฐานของฟังก์ชันคณิตศาสตร์ ปัญหาการทำงานบางประการของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมีความซับซ้อนสูง เนื่องจากการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไปยังโหลดนั้น ต้องมีการควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพ ความมั่นคง ความเชื่อถือได้ รูปแบบของปัญหาที่พบจึงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นทำให้มีการนำเทคนิคการแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้นมาใช้

การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดนั้นรูปแบบของปัญหาจะถูกกำหนดผ่านปริมาณทางกายภาพใด ๆ ที่ต้องการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุด โดยแทนปัญหาค่าด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) และอาจมีเงื่อนไขบังคับ (Constraints) ในการแก้ปัญหามาจากวิธีแบบดั้งเดิมนั้นอาศัยหลักการของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับศูนย์ ซึ่งจุดค่าตอบที่ค้นพบนี้อาจไม่เป็นจุดต่ำสุดโดยรวม (Global minimize) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการตามธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดที่ให้ผลของคำตอบที่ดีกว่าและความสามารถในการโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สะดวกรวดเร็วขึ้น ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้กระบวนการวิวัฒนาการอย่างแพร่หลาย

3.2 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

ปัญหาค่าเหมาะที่สุดปกติเป็นปัญหาเกี่ยวกับการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(X)$ เทียบกับตัวแปรควบคุม $X = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_N]^T$ โดยมีรูปแบบของปัญหาเป็นดังนี้

$$\text{Minimize} \quad f(X) \quad (3.1)$$

ภายใต้เงื่อนไขความเหมาะสม (Optimality conditions) ถ้ากำหนดให้จุดคำตอบที่เหมาะสมของปัญหามีค่าเป็น X^* โดยใช้การประมาณค่าด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ของฟังก์ชันที่พิจารณารอบ ๆ จุด X^* จะได้ว่า

$$f(X^*) < f(X^* + p) = f(X^*) + p^T \nabla f(X^*) + \frac{1}{2} p^T \nabla^2 f(\xi) p \quad (3.2)$$

โดยที่ p ต้องไม่เป็นเวกเตอร์ศูนย์

ξ เป็นค่าระหว่างจุด $X = X^* + p$

X^* จุดต่ำสุดมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ $\nabla f(X^*) = 0$

จากเงื่อนไขนี้เป็นเงื่อนไขแรกที่ต้องกำหนดไว้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดทุกประเภท เรียกว่า เงื่อนไขที่จำเป็นอันดับหนึ่ง (First-order necessary condition) แต่การใช้เงื่อนไขนี้เพียงเงื่อนไขเดียวไม่เพียงพอที่จะระบุว่าจุดดังกล่าวเป็นจุดต่ำสุดได้ เนื่องจาก $\nabla f(X^*) = 0$ บอกได้เพียงว่าจุดดังกล่าวเป็นจุดหยุดนิ่ง (stationary point) อาจจะเป็นจุดต่ำสุด จุดสูงสุด หรือจุดเปลี่ยนโค้ง ก็ได้ ดังนั้น ในการบ่งชี้จุดต่ำสุดอย่างชัดเจนนั้นต้องการเงื่อนไขที่เพียงพอ เรียกว่าเงื่อนไขเพียงพออันดับสอง (second-order sufficient condition) เมื่อแทน $\nabla f(X^*) = 0$ ลงในสมการที่ (3.2) จะได้สมการ

$$f(X) = f(X^* + p) = f(X^*) + \frac{1}{2} p^T \nabla^2 f(\xi) p \quad (3.3)$$

จากคุณสมบัติของจุดต่ำสุด $f(X^* + p) > f(X^*)$ ทำให้พจน์ที่สองทางขวามือในสมการที่ (3.3) ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์จึงจะสอดคล้องกับเงื่อนไขนี้ นั่นคือ $\nabla^2 f(X^*)$ ต้องเป็น *pdfs* (positive semi-definite matrix) นั่นคือ $v^T \nabla^2 f(X^*) v \geq 0$ สำหรับบางค่าของ v และเป็นจริงสำหรับ $v^T \nabla^2 f(\xi) v \geq 0$ ด้วย ถ้า $\|\xi - X^*\|$ มีค่าน้อย ๆ

ดังนั้นถ้าเลือก p ให้เหมาะสมแล้วค่า ξ จะเข้าใกล้ X^* มาเพียงพอที่จะรับประกันได้ว่า $f(X^*) < f(X)$ ซึ่งเงื่อนไขนี้เรียกว่า second-order sufficient condition

3.2.1 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นโดยไม่มีเงื่อนไขบังคับ

ปัญหาค่าเหมาะที่สุดโดยไม่มีเงื่อนไขบังคับเป็นการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เทียบกับตัวแปรควบคุมใด ๆ วิธีการที่ใช้แก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดโดยไม่มีเงื่อนไขอาศัยหลักของแคลคูลัสแบบหลายตัวแปร ดังนี้

ถ้ากำหนดปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับตามสมการ (3.4) และ (3.5) ซึ่งเรียกว่า เกรเดียนเวกเตอร์ (Gradient vector)

$$\frac{\partial f}{\partial X_i} = 0 \quad ; i=1,2,\dots,N \quad (3.4)$$

หรือ

$$\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial X_1}, \frac{\partial f}{\partial X_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial X_N} \right) = 0 \quad (3.5)$$

ในการแก้ปัญหามีการนำเอาวิธีการค้นหา (Search method) มาใช้เพื่อวิเคราะห์ในกรณีที่ความไม่เป็นเชิงเส้นของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าสูง โดยในที่นี้จะนำเสนอการค้นหาเกรเดียน (Gradient search) และระเบียบวิธีนิวตัน (Newton's method) ตามลำดับดังนี้

ตามวิธีการของ Gradient search นั้นเมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรควบคุม X จากนั้นทำการคำนวณค่าเกรเดียน (Gradient) ของฟังก์ชันตามสมการที่ (3.5) เพื่อนำมาสร้างจุดคำตอบในรอบการคำนวณครั้งต่อไปตามสมการที่ (3.6)

$$X_{k+1} = X_k + \alpha \nabla f(X_k) \quad (3.6)$$

ค่า α คำนวณได้จากการทำโปรแกรมย่อยการค้นหาเชิงเส้น (Line search subprogram) ที่มีรูปแบบปัญหาดังนี้

$$\text{Minimize } F(\alpha) \equiv f(X_k + \alpha \nabla f(X_k)) \quad \alpha > 0 \quad (3.7)$$

วิธีการ Gradient search นี้ เลือกทิศทางการค้นหา (search direction) หรือ เวกเตอร์ p ตามสมการที่ (3.8)

$$p_k \equiv \nabla f(X_k) \quad (3.8)$$

ในสมการที่ (3.8) เป็นการแก้ปัญหาย่อยเพื่อหาช่วงก้าวที่เหมาะสม (Step length) α ซึ่งในหลายๆ กรณี กระบวนการนี้อาจใช้เวลาในการคำนวณมากเกินไปจนทำให้การแก้ปัญหามีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ทั้งนี้จุดมุ่งหมายของการหาช่วงก้าวที่เหมาะสมนี้เพื่อรับประกันว่าในทุกๆ รอบการคำนวณตามกระบวนการค้นหาที่ใช้ ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะมีค่าลดลง

ในส่วนของ Newton's search method นั้น จะใช้การวิเคราะห์การกระจายอนุกรมของเทย์เลอร์เป็นหลัก แต่จะทำการประมาณถึงพจน์ของอนุพันธ์อันดับที่สองเท่านั้น ดังสมการที่ (3.9)

$$f(X_k + p_k) \cong f(X_k) + \nabla f(X_k)^T p_k + \frac{1}{2} p_k^T \nabla^2 f(X_k) p_k \quad (3.9)$$

คำนวณค่า Gradient ของสมการที่ (3.9) เทียบกับ p_k จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.10) ดังนี้

$$\nabla f(X_k + p_k) = \nabla f(X_k) + \nabla^2 f(X_k) p_k \quad (3.10)$$

โดยวิธีการนี้คาดหวังว่าจุดคำตอบต่อไปที่ค้นพบคือจุดที่สอดคล้องกับเงื่อนไข $\nabla f(X_{k+1}) = 0$ ดังนั้นจะได้สมการเป็น

$$\nabla f(X_k) + \nabla^2 f(X_k) p_k = 0 \quad (3.11)$$

$$p_k = -[\nabla^2 f(X_k)]^{-1} \nabla f(X_k) \quad (3.12)$$

ปกติวิธีการนี้ใช้ค่า $\alpha=1$ และเป็นวิธีที่มีอัตราการลู่เข้าที่รวดเร็วมาก แต่มีข้อเสีย คือ อาจประสบปัญหาในการลู่เข้าของคำตอบ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงเพื่อรับประกันการลู่เข้า โดยพิจารณาจากสมการที่ (3.9) จะพบว่าค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะมีค่าลดลงในรอบการคำนวณถัดไปเมื่อ

$$p_k^T \nabla f(X_k) < 0 \quad (3.13)$$

แทนค่า p_k จากสมการที่ (3.12) ในสมการที่ (3.14) จะได้ดังนี้

$$p_k^T \nabla f(X_k) = -\nabla f(X_k)^T [\nabla^2 f(X_k)]^{-1} \nabla f(X_k) < 0 \quad \text{หรือ}$$

$$\nabla f(X_k)^T [\nabla^2 f(X_k)]^{-1} \nabla f(X_k) > 0 \quad (3.14)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ (3.14) ดังนั้น $[\nabla^2 f(X_k)]^{-1}$ ต้องเป็น *pdf* (positive definite matrix) โดยจะเรียก $[\nabla^2 f(X_k)]^{-1}$ ว่าเป็นเฮสเซียนเมตริกซ์ (Hessian matrix) ในกรณีที่คำนวณเฮสเซียนเมตริกซ์ ได้ผลออกมาที่ไม่แน่นอน (indefinite) จะทำให้กระบวนการไม่ลู่เข้า ดังนั้น ต้องปรับปรุงโดยทำการประมาณค่าเฮสเซียนเมตริกซ์ ด้วย *pdf* matrix ที่เหมาะสม

3.2.2 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นโดยมีเงื่อนไขบังคับสมการ

แก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นโดยมีเงื่อนไขบังคับสมการนี้ เกิดขึ้นเมื่อตัวแปรควบคุมที่ใช้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้อย่างอิสระ การแก้ปัญหแบบนี้มีขั้นตอนบางอย่างเพิ่มเข้ามา และเพื่อให้การแก้ปัญหายู่ในรูปแบบทั่วไป ในที่นี้ได้กำหนดรูปแบบค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นโดยมีเงื่อนไขบังคับสมการเป็นดังสมการที่ (3.15)

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & f(X) \\ \text{Subject to} & g_i(X) = 0 \quad ; i=1,2,\dots,Eq \end{array} \quad (3.15)$$

เมื่อ Eq คือ จำนวนเงื่อนไขบังคับสมการ
 $g_i(X)$ คือ เงื่อนไขบังคับสมการ

วิธีการแก้ปัญหาก็ใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือ การแปลงปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับให้เป็นปัญหาแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับโดยใช้ฟังก์ชันของลากรองจ์ (Lagrange) โดยที่เงื่อนไขบังคับสมการต้องมีตัวคูณของลากรองจ์คูณอยู่ แล้วนำไปบวกเข้ากับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังสมการที่ (3.16)

$$L = f(X) + \sum_{i=1}^{Eq} \lambda_i g_i(X) \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.16) นี้ ปัญหาจะอยู่ในรูปแบบที่ไม่มีเงื่อนไขบังคับ แต่จำนวนตัวแปรจะเพิ่มเข้ามาเท่ากับจำนวนของเงื่อนไขบังคับแบบสมการ นั่นคือ จำนวนของตัวแปร X บวกด้วย จำนวนของ λ และจากเงื่อนไขเหมาะสมที่สุด (Optimality conditions) จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial L(X, \lambda)}{\partial X_i} = \frac{\partial f(X)}{\partial X_i} + \sum_{i=1}^{Eq} \lambda_i \frac{\partial g_i(X)}{\partial X_i} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial L(X, \lambda)}{\partial \lambda_i} = g_i(X) = 0 \quad (3.18)$$

3.2.3 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

โดยมีเงื่อนไขบังคับสมการ

ปัญหาในลักษณะนี้ โดยปกติเงื่อนไขบังคับสมการจะอยู่ในรูปขอบเขตของตัวแปรควบคุม เช่น ขอบเขตของกำลังผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว เป็นต้น รูปแบบการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นโดยมีเงื่อนไขบังคับสมการเป็นดังสมการที่ (3.19)

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & f(X) \\ \text{Subject to} & g_i(X) = 0 \quad ; i=1,2,\dots,Eq \\ & h_j(X) \leq 0 \quad ; j=1,2,\dots,Iq \end{array} \quad (3.19)$$

เมื่อ Iq คือ จำนวนเงื่อนไขบังคับอสมการ

$h_j(X)$ คือ เงื่อนไขบังคับอสมการ

ฟังก์ชันของลากรองจ์ที่ได้จากการแก้ปัญหานี้มีค่าดังสมการที่ (3.20)

$$L = f(X) + \sum_{i=1}^{Eq} \lambda_i g_i(X) + \sum_{j=1}^{Iq} \mu_j h_j(X) \quad (3.20)$$

จากสมการที่ (3.20) นี้ ปัญหาจะอยู่ในรูปแบบที่ไม่มีเงื่อนไขบังคับ แต่จำนวนตัวแปรจะเพิ่มเข้ามาเท่ากับจำนวนของเงื่อนไขบังคับแบบสมการรวมกับจำนวนของเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ นั่นคือ จำนวนของตัวแปร X บวกด้วย จำนวนของ λ บวกด้วย จำนวนของ μ และจากเงื่อนไขเหมาะสมที่สุด จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial L(X, \lambda)}{\partial X_k} = \frac{\partial f(X)}{\partial X_k} + \sum_{i=1}^{Eq} \lambda_i \frac{\partial g_i(X)}{\partial X_k} + \sum_{j=1}^{Iq} \mu_j \frac{\partial h_j(X)}{\partial X_k} \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial L(X, \lambda)}{\partial \lambda_i} = g_i(X) = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial L(X, \lambda)}{\partial X_k} = h_j(X) \leq 0 \quad (3.23)$$

$$\mu_j h_j(X) = 0 \text{ \& } \mu_j \geq 0 \quad (3.24)$$

จากสมการ (3.23) เงื่อนไขบังคับแบบอสมการจะไม่แอคทีฟเมื่อผลของสมการ (3.23) มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ และจะทำให้ $\mu_j = 0$ แต่ถ้าสมการที่ (3.23) เท่ากับศูนย์เงื่อนไขบังคับอสมการจะแอคทีฟ และ $\mu_j \geq 0$

3.3 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นด้วยระเบียบวิธี

คล้ายนิวตัน

การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของระเบียบวิธีนิวตันได้รับความนิยมมากที่สุด และถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ ได้แก่ ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน (Quasi-Newton Methods) เนื่องจากคุณสมบัติการลู่เข้าที่รวดเร็วแบบเชิงเส้นยิ่งยวด (super-linear convergence) และการรับประกันการลู่เข้าของจุดคำตอบ นอกจากนี้ระเบียบวิธีเหล่านี้มีข้อได้เปรียบคือ ไม่ต้องอาศัยการคำนวณเมตริกซ์เฮสเซียนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ต้องการเฉพาะเกรเดียนต์เท่านั้น โดยกำหนดทิศทางการค้นหาดังนี้

$$p_k = -[B_k]^{-1} \nabla f(x_k) \quad (3.25)$$

กรณีของฟังก์ชันตัวแปรเดียวการประมาณค่าเฮสเซียนหรืออนุพันธ์อันดับสองนี้ ใช้เทคนิคเชิงตัวเลขดังต่อไปนี้

$$f''(x_{k+1}) \approx \frac{f'(x_{k+1}) - f'(x_k)}{x_{k+1} - x_k} \quad (3.26)$$

นิยมเรียกระเบียบวิธีคล้ายนิวตันสำหรับตัวแปรหนึ่งมิติว่า ระเบียบวิธีซีแคนต์ (secant method) อย่างไรก็ตาม ในกรณีของตัวแปรหลายมิติ รูปแบบการประมาณค่าจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\nabla^2 f(x_{k+1})(x_{k+1} - x_k) \approx \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k) \quad (3.27)$$

ให้ B_{k+1} แทนการประมาณค่าเฮสเซียนดังกล่าว จะได้ว่า

$$B_{k+1}(x_{k+1} - x_k) = \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k) \quad (3.28)$$

ถ้ากำหนดให้ $s_k = x_{k+1} - x_k, y_k = \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k)$ จะได้ว่า

$$B_{k+1}s_k = y_k \quad (3.29)$$

เรียกสมการนี้ว่าสมการซีแคนต์ (secant equation)

การประมาณค่านี้อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงเมตริกซ์เฮสเซียนให้มีคุณสมบัติสมมาตรและเป็น *pdf* การเริ่มต้นกระบวนการอาจจะกำหนดให้ B_0 เป็นเมตริกซ์เอกลักษณะได้ โดยใช้หลักการ

$$B_{k+1} = B_k + \Delta B_k \quad (3.30)$$

ตัวอย่างหนึ่งของการประมาณค่า B_{k+1} ให้ได้เมตริกซ์สมมาตร แต่ไม่ใช่ *pdf* เรียกว่า สูตรการปรับปรุงสมมาตรลำดับขั้นที่หนึ่ง (symmetric rank-one update formular) ดังนี้

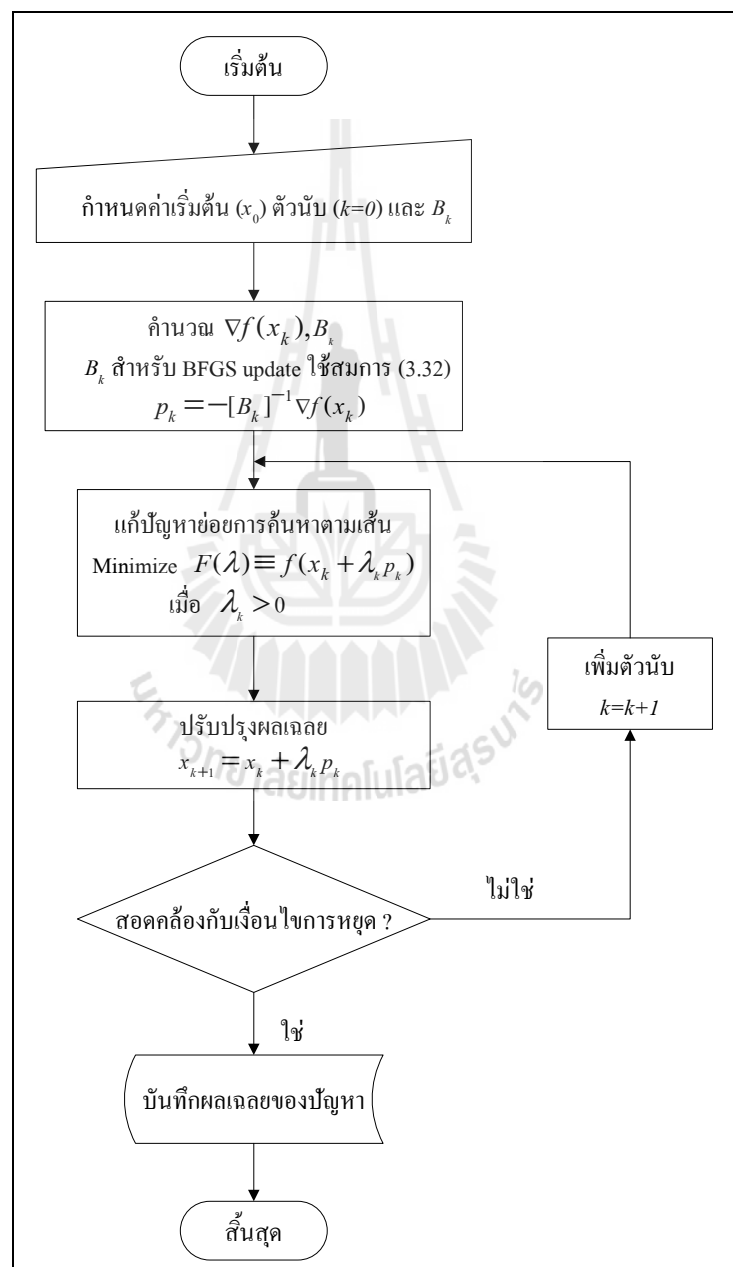
$$B_{k+1} = B_k + \frac{(y_k - B_k s_k)(y_k - B_k s_k)^T}{(y_k - B_k s_k)^T s_k} \quad (3.31)$$

เนื่องจากสูตรการปรับปรุงสมมาตรลำดับขั้นที่หนึ่งนี้ ไม่รับประกันความเป็น *pdf* ดังนั้นถ้าเลือกค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ B ไม่เหมาะสมปัญหาจะไม่ลู่อเข้า นอกจากสูตรการปรับปรุงสมมาตรลำดับขั้นที่หนึ่งแล้ว ยังมีสูตรการปรับปรุงขั้นอื่น ๆ ซึ่งนอกจากจะทำให้เมตริกซ์ B มีความสมมาตรแล้ว ยังมีคุณสมบัติ *pdf* อีกด้วย ซึ่งจะช่วยรับประกันการลู่อเข้าของปัญหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นใด ๆ ได้ ด้วยการประมาณค่ากำลังสอง ดังนั้น การใช้สูตรการปรับปรุงสมมาตรลำดับขั้นที่สองจะช่วยให้เมตริกซ์มีความเป็น *pdf* เนื่องจากการปรับปรุงสมมาตรลำดับขั้นที่สองนี้ มีนักคณิตศาสตร์สร้างสูตรขึ้นหลากหลาย แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นมาตรฐานสำหรับการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด ได้แก่ สูตรการปรับปรุง BFGS (BFGS update formular) ตามชื่อของผู้พัฒนา ได้แก่ บรอยเดน (Broyden) เฟตเชอร์ (Fletcher) โกลด์ฟาร์บ (Goldfarb) และชานนอน (Shannon) ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} B_{k+1} &= B_k - \frac{(B_k s_k)(B_k s_k)^T}{s_k^T B_k s_k} + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k} \\ &= B_k - \frac{B_k y_k y_k^T B_k}{y_k^T B_k y_k} + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k} \end{aligned} \quad (3.32)$$

สูตรการปรับปรุง BFGS นี้รับประกันการลู่เข้าของปัญหา โดยการเลือกค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ B ใด ๆ ที่เป็น pdf ที่ง่ายที่สุด คือ ให้มีค่าเมตริกซ์เป็นเอกลักษณ์ อย่างไรก็ตาม การเลือกค่าเมตริกซ์เอกลักษณ์อาจจะทำให้อัตราการลู่เข้าค่อนข้างช้าสำหรับปัญหาบางรูปแบบได้

รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพการทำงานของระเบียบวิธีคล้ายนิวตันที่ใช้ในการปรับปรุง BFGS (ธนัชชัย กุลวรรณิพงษ์, 2554)



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน

3.4 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการปรับโทษ

การแก้ปัญหาโดยไม่ใช้การหาคำตอบที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับจะทำให้ลดความยุ่งยาก และการแก้ปัญหาที่มีความคงทนขึ้น เมื่อกระบวนการค้นหาที่ใช้สร้างจุดคำตอบที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ถึงแม้จุดคำตอบนั้นจะทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นที่น่าสนใจ ก็ต้องไม่นำจุดดังกล่าวมาใช้งาน การจะทำเช่นนี้ได้ นั้น ต้องมีการกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพิ่มเติมในกรณีที่คำตอบไม่สอดคล้องกับสมการ ซึ่งอยู่ในรูปของการบวกค่าปรับโทษ (penalty term) ที่กำหนดขึ้นมา ทำให้เมื่อจุดคำตอบที่ได้ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับจะทำให้ได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูง และจุดนี้จะโดนกำจัดออกไปในกระบวนการค้นหาช่วงกว้างที่เหมาะสม ดังนั้น ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับจะถูกกลืนไปเป็นปัญหาแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับทำให้วิธีการแก้ปัญหามองใช้ ระเบียบวิธีขั้นที่สุดหรือระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน โดยระเบียบวิธีการปรับโทษ (penalty method) มีรูปแบบดังนี้

พิจารณาปัญหาค่าเหมาะที่สุดดังต่อไปนี้

$$\text{Minimize} \quad f(x)$$

$$\text{Subject to} \quad x \in S$$

ปัญหานี้จะแบ่งจุดคำตอบออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ และกลุ่มที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ โดยกำหนดพจน์การปรับโทษ $\Omega(x)$ ดังนี้

$$\Omega(x) = \begin{cases} 0 & ; x \in S \\ +\infty & ; x \notin S \end{cases} \quad (3.33)$$

ทำให้ได้ปัญหาในรูปฟังก์ชันการปรับโทษ (penalty function) $P(x)$ ดังนี้

$$\text{Minimize} \quad P(x) = f(x) + \Omega(x) \quad (3.34)$$

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้ว เมื่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ที่ได้มีค่าเป็นอนันต์ในกรณีที่คำตอบไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ จะทำให้การคำนวณค่าเกรเดียนต์หรือข้อมูลอื่น ๆ ทำได้ยาก เนื่องจากไม่มีการนิยามการคำนวณค่า ∞ ในการคำนวณเชิงตัวเลข นอกจากนี้ ฟังก์ชันนี้ไม่มีความต่อเนื่องอีกด้วย ดังนั้น การใช้ฟังก์ชันต่อเนื่องทำให้ค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อคำตอบเคลื่อนตัวเข้าหาขอบ (boundary) ของเซตคำตอบที่เป็นไปได้ โดยจะใช้พจน์การปรับโทษที่เขียนในรูปของฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับ ดังนี้

$$\Omega(x, \rho) = \rho \cdot \gamma\{g(x), h(x)\} \quad (3.35)$$

พจน์การปรับโทษอาจจะใช้ฟังก์ชันดังต่อไปนี้

1) ฟังก์ชันพาราโบลาหรือกำลังสอง

$$\Omega(x, \rho) = \rho \cdot [g(x)]^2, \quad \Omega(x, \rho) = \rho \cdot [h(x)] \quad (3.36)$$

2) ฟังก์ชันลอการิทึม

$$\Omega(x, \rho) = -\rho \cdot \ln\{g(x)\}, \quad \Omega(x, \rho) = -\rho \cdot \ln\{h(x)\} \quad (3.37)$$

3) ฟังก์ชันส่วนกลับ

$$\Omega(x, \rho) = \rho \frac{1}{g(x)}, \quad \Omega(x, \rho) = \rho \frac{1}{h(x)} \quad (3.38)$$

ปัญหาสำคัญที่ทำให้เงื่อนไขบังคับข้อสมการมีความยุ่งยาก คือ ถ้า $h(x) < 0$ ค่าของพจน์การปรับโทษต้องมีค่าสูงคล้ายการสร้างกำแพงขึ้นกันไม่ให้จุดคำตอบข้ามไปในพื้นที่ของเซตคำตอบที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ดังนั้น การกำหนดค่าพจน์การปรับโทษในกรณีนี้ต้องพิจารณาสถานการณ์ดังกล่าวด้วยนั่นเอง ซึ่งอาจทำได้ดังนี้

$$\Omega(x, \rho) = \rho [\min\{h(x), 0\}]^2 \quad (3.39)$$

อย่างไรก็ตาม การกำหนดค่าพารามิเตอร์การปรับโทษให้มีค่าสูงมาก ๆ จะเกิดผลเสีย คือ การลู่เข้าจะช้าลงตามค่าพารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้น และจากความคลาดเคลื่อนสะสมเนื่องจากการคำนวณเชิงตัวเลขที่ค่าพารามิเตอร์การปรับโทษมีค่าสูง อาจส่งผลให้ปัญหาไม่ลู่เข้าได้

วิทยานิพนธ์นี้ใช้พจน์การปรับโทษในรูปของฟังก์ชันพาราโบลาหรือกำลังสอง ในการแก้ปัญหาต้องดำเนินการโดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์การปรับโทษ จากนั้นใช้ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาแบบไม่มีเงื่อนไขเพื่อหาคำตอบ ดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์การปรับโทษ

แล้วทำการหาคำตอบไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งจุดคำตอบที่ได้เข้าสู่ค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งก็คือค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา

3.5 การแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม

จินเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยมีพื้นฐานมาจากกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติ (Natural selection) และกระบวนการคัดเลือกทางพันธุศาสตร์ (Natural genetic-selection) ซึ่งคิดค้นโดย John Holland เมื่อปี ค.ศ. 1975 โดยการสร้างกลุ่มประชากรโครโมโซมแทนผลเฉลย จากนั้น ประชากรในกลุ่มจะแข่งขันกันเพื่อความอยู่รอด โครโมโซมที่ถูกเลือกในแต่ละรุ่นการถ่ายทอด (Generation) เท่านั้นที่มีสิทธิ์สร้างลูกหลานหรือทายาทในรุ่นถัดไป การสร้างลูกหลานจะใช้การดำเนินการทางสายพันธุ์ (Genetic Operators) ซึ่งประกอบด้วย ครอสโอเวอร์ (Crossover) และการผ่าเหล่า (Mutation) ลูกหลานหรือทายาทที่ถูกสร้างขึ้นจะแทนที่โครโมโซมต้นแบบโดยสมบูรณ์ โดยใช้หลักการคัดเลือกตามธรรมชาติ (Darwin's natural-selection) สามารถสร้างผลเฉลยที่ดีได้จากกระบวนการนี้ สำหรับองค์ประกอบหลัก ๆ ของจินเนติกอัลกอริทึม มีดังนี้ (รัช ชูจิต, 2552)

การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome encoding) คือ ขั้นตอนสำหรับแปลงทางเลือกสำหรับการแก้ปัญหาที่เป็นไปได้ให้อยู่ในรูปแบบของโครโมโซม ในการแปลงวิธีการสำหรับแก้ปัญหาที่เป็นไปได้ ให้อยู่ในรูปแบบของโครโมโซมนั้นสามารถที่จะทำได้ในหลายรูปแบบซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมของแต่ละปัญหา ในการแก้ปัญหาเวกเตอร์ค่าจริงการเข้ารหัสโครโมโซมเป็นการแปลงเลขจากฐานสิบไปเป็นฐานสอง การเข้ารหัสนี้อาศัยหลักการเดียวกันกับการแปลงสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นดิจิทัล ถ้ากำหนดให้ตัวแปร x มีค่าพิสัยในช่วง $x_{\min}$ ถึง $x_{\max}$ กำหนดให้แบ่งช่วงจากจุดทั้งสองเป็น n จุดเท่า ๆ กันระยะห่างของข้อมูลที่ถูกแบ่งออกเป็นส่วน ๆ สองจุดที่อยู่ติดกันสามารถคำนวณได้จาก $\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{n - 1}$ เนื่องจากใช้เลขฐานสอง ดังนั้น $n = 2^m$ นั่นคือ $\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^m - 1}$ เรียก m ว่าจำนวนบิตของชุดข้อมูลหรือของสตริง

ประชากรเริ่มต้น (Initial population) คือ การสุ่มเลือกเพื่อสร้างประชากรต้นแบบขึ้นมาเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของขั้นตอนการวิวัฒนาการ ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนแรกที่เกิดขึ้นก่อนที่จะเริ่มกระบวนการของจินเนติกอัลกอริทึม โดยประชากรกลุ่มแรก หรือประชากรต้นกำเนิดจะเกิดจากการสุ่มเลือกขึ้นมาจาก กลุ่มของประชากรทั้งหมดที่มีอยู่ โดยในการสุ่มเลือกจะทำการสุ่มตามจำนวนของประชากรที่ได้กำหนดไว้เป็นพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

การดำเนินการทางสายพันธุ์ คือ การดำเนินการต่าง ๆ ตามขั้นตอนของจินเนติกอัลกอริทึม เพื่อให้การเกิดวิวัฒนาการไปสู่คำตอบที่ดีขึ้น ซึ่งได้แก่ การครอสโอเวอร์ และการผ่าเหล่า

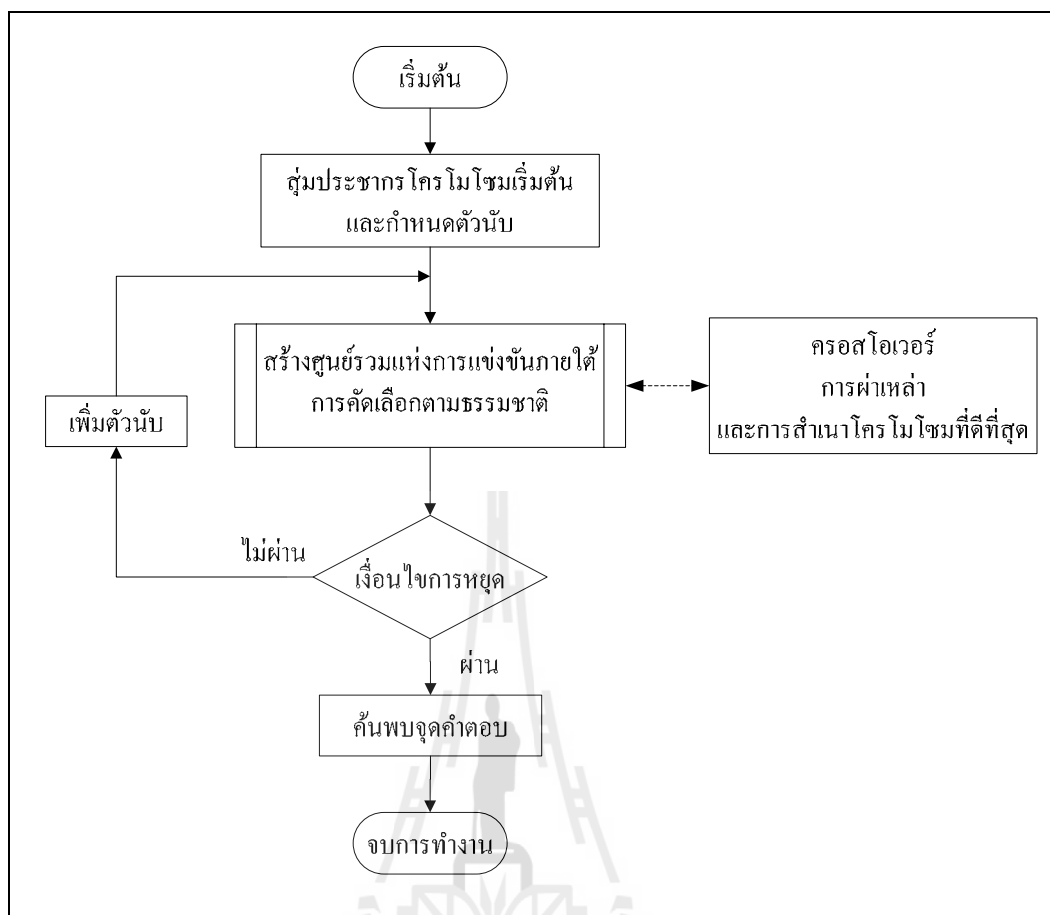
1) การครอสโอเวอร์ เป็นขั้นตอนที่ทำภายหลังการรีโพรดักชัน โดยการแลกเปลี่ยนของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ (parent) ตามอัตราความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (probability of crossover) เพื่อสร้างชุดโครโมโซมรุ่นใหม่หรือโครโมโซมรุ่นลูก (offspring) อัตราการครอสโอเวอร์ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการหาคำตอบของจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งก็คืออัตราส่วนของจำนวนโครโมโซมลูกที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละรุ่นต่อขนาดของประชากร (population size) โดยปกติ จินเนติกอัลกอริทึมจะทำการครอสโอเวอร์ในสัดส่วนที่สูง ประมาณ 60-70% ของจำนวนประชากรทั้งหมด

2) การผ่าเหล่า เป็นขั้นตอนที่อาจช่วยให้โครโมโซมมีค่าความเหมาะสมดีขึ้นหลังจากการครอสโอเวอร์ โดยการปรับเปลี่ยนข้อมูลบางส่วนของโครโมโซมเป็นค่าใหม่ในตำแหน่งที่สุ่มได้ ตามอัตราส่วนความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่า (probability of mutation) ที่กำหนด อัตราการมิวเตชันหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนยีนต์ทั้งหมดในประชากรที่จะเกิดการผ่าเหล่าขึ้น โดยปกติแล้ว จินเนติกอัลกอริทึมจะยอมให้การผ่าเหล่าเกิดขึ้นได้น้อยมากเพียง 1-2% เท่านั้น

การคัดเลือกสายพันธุ์ (Genetic Selection) การคัดเลือกโครโมโซมเดี่ยวหรือคู่ของโครโมโซมใด ๆ จากกลุ่มประชากรเพื่อนำมาดำเนินการทางสายพันธุ์ใช้หลักการของความน่าจะเป็นเข้าช่วย อย่างไรก็ตาม โครโมโซมแต่ละชุดจะมีโอกาสที่จะอยู่รอดสร้างรุ่นถ่ายทอดได้ไม่เท่ากัน โดยจะใช้การวัดความเหมาะสมของการอยู่รอดที่เรียกว่า ค่าความฟิต (Fitness Value) ที่ได้จากฟังก์ชันความฟิต (Fitness function) คือ ฟังก์ชันสำหรับประเมินค่าความเหมาะสม เพื่อให้คะแนนสำหรับคำตอบต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ของปัญหา โครโมโซมทุกตัวจะมีค่าความเหมาะสมของตัวเองเพื่อใช้สำหรับพิจารณาว่าโครโมโซมตัวนั้นเหมาะสมหรือไม่ที่จะนำมาใช้สืบทอดพันธุกรรมสำหรับสร้างโครโมโซมรุ่นใหม่ โดยวิธีการสำหรับหาค่าความเหมาะสมนั้นจะใช้สมการที่สอดคล้องกับแต่ละปัญหา

พารามิเตอร์ (Parameter) คือ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม เช่น ขนาดของประชากรความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์หรือความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า

พิจารณาการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึมดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยจินเนติกอัลกอริทึม

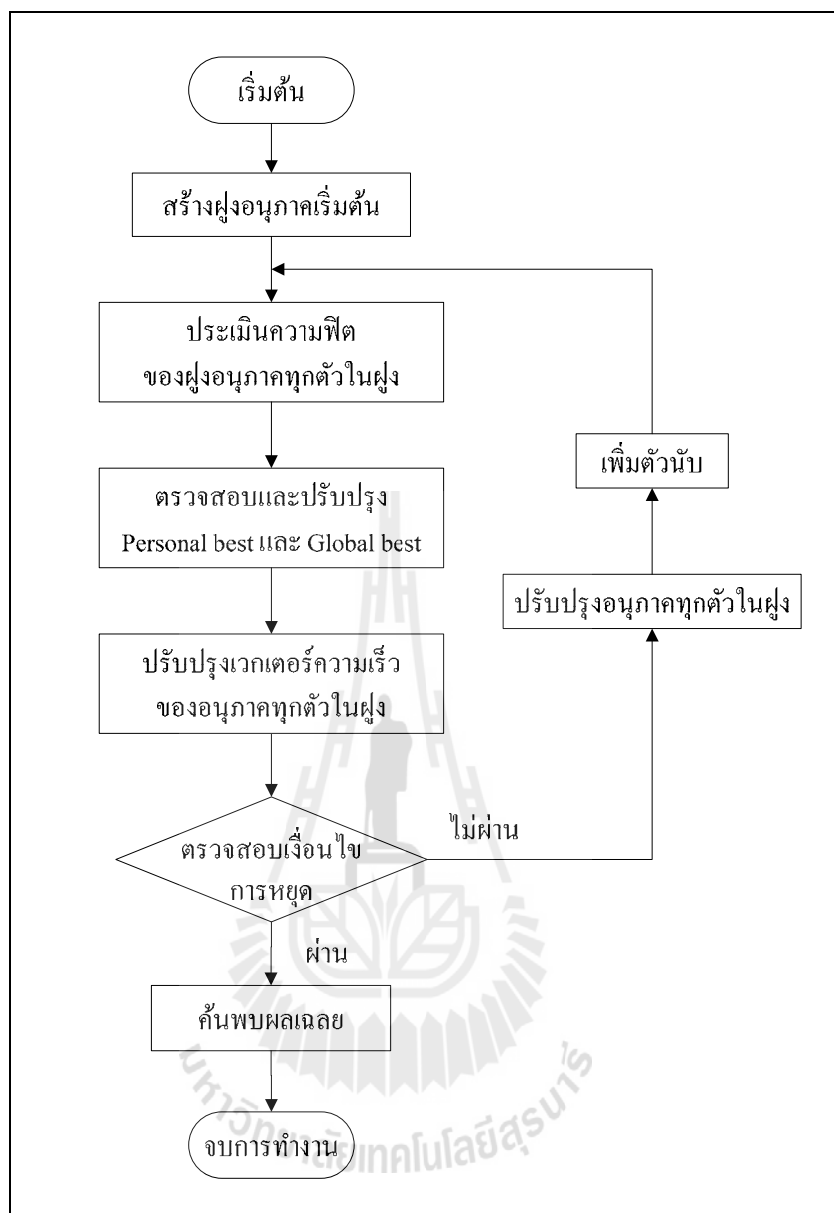
จินเนติกอัลกอริทึมได้ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาดัง ๆ มากมาย เช่น ปัญหาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการค้นหาคำตอบโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมมาใช้ในการแก้ปัญหาค่ากำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดเพื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีที่ได้ทำการศึกษา

3.6 การแก้ปัญหาเหมาะที่สุดด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค

การหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคเป็นการจำลองระบบหรือโครงสร้างทางสังคมของกลุ่มสิ่งมีชีวิตอย่างง่าย การรวมกลุ่มทางสังคมของสิ่งมีชีวิตเพื่อวัตถุประสงค์บางประการ เช่น การหาอาหารเพื่อการอยู่รอดของกลุ่ม เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยผลักดันให้ประชากรส่วนใหญ่ในกลุ่มหรือสังคม หรือทั้งหมดมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคถูกพัฒนา โดย อีเบอร์ฮาร์ท(Eberhart) และ เคนเนดี้ (Kennedy) ในปี ค.ศ. 1995 ซึ่งมีแนวคิดจากการหา

อาหารของฝูงนก หรือ หาอาหารของฝูงปลา และ ทฤษฎีการเคลื่อนที่ (Velocity Theory) ซึ่งต้องอาศัยการเคลื่อนที่กันเป็นกลุ่มและการเว้นระยะห่างระหว่างนกแต่ละตัว การจำลองฝูงอนุภาคอาศัยหลักการนี้ โดยการกำหนดอนุภาคเพื่อใช้แทนผลเฉลยพร้อมด้วยการประเมินค่าความฟิตที่ดีที่สุด กล่าวคือ มีระยะห่างของฝูงกับแหล่งอาหารน้อยที่สุด นอกจากนี้ คุณสมบัติที่สำคัญในการจำลองหาอาหารของฝูง ได้แก่ เวกเตอร์ความเร็ว (particle's velocity) ของอนุภาคแต่ละตัวใช้เป็นตัวกำหนดทิศทางในการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้น ๆ อนุภาคทุกตัวในฝูงจะต้องถูกปรับปรุงทิศทางในการเคลื่อนที่ให้สอดคล้องกับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวที่มีค่าความฟิตดีที่สุด ผลจากการดำเนินการนี้จะช่วยให้ฝูงอนุภาคมีทิศทางเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการหาค่าเหมาะที่สุดดังแผนภาพการทำงานในรูปต่อไปนี้





รูปที่ 3.3 แผนผังการทำงานการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยฝูงอนุภาค

กำหนดให้ฝูงอนุภาคประกอบด้วยอนุภาคทั้งสิ้น n ตัว อนุภาคแต่ละตัวจะได้รับการปรับปรุงระหว่างกระบวนการวนรอบ ดังนี้

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + v_i^{(k+1)} \quad (3.40)$$

$$v_i^{(k+1)} = v_i^{(k)} + \alpha_i (x_i^{lbest} - x_i^{(k)}) + \beta_i (x_i^{gbest} - x_i^{(k)}) \quad (3.41)$$

เมื่อ	$x_i^{(k)}$	คือ อนุภาคซึ่งนำเสนอผลเฉลยตัวที่ i ในรอบการคำนวณที่ k
	$v_i^{(k)}$	คือ เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคตัวที่ i ในรอบการคำนวณที่ k
	α_i, β_i	คือ ตัวเลขสุ่มแบบสม่ำเสมอ (uniform random) ในช่วง $[0,1]$
	x_i^{lbest}	คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่อนุภาคตัวที่ i ค้นพบ (personal best)
	x_i^{gbest}	คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่ฝูงอนุภาคค้นพบ (global best)

ดำเนินการคำนวณรอบภายใต้เงื่อนไขการหยุดที่เหมาะสม จะได้ผลเฉลยของปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด

3.7 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้เลือกจุดทำงานที่เหมาะสมของการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด ในที่นี้ได้แนะนำการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค โดยมีการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการปรับโทษ เพื่อให้รูปแบบการวิเคราะห์ปัญหาง่ายขึ้น

การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่แนะนำนั้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน และการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยเทคนิคชาอูญลาด ได้แก่ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค ส่วนวิธีที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 4

ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

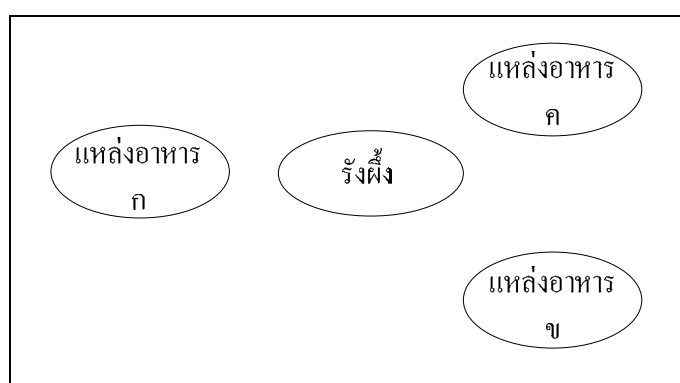
4.1 บทนำ

ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์เป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดวิธีการหนึ่ง ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 2005 โดย เดอร์วิส คาราโบกา (Dervis Karaboga) ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมความฉลาดในการหาอาหารของผึ้ง คล้ายกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค และวิธีการวิวัฒนาการเชิงแตกต่าง (Differential Evolution) แต่ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ใช้เพียงวิธีการควบคุมค่าพารามิเตอร์ของขนาดประชากรและจำนวนรอบสูงสุดของการคำนวณ จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจริง ทำให้ประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาและประสิทธิภาพของคำตอบมีมากขึ้น โดยรายละเอียดของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์จะกล่าวในหัวข้อที่ 4.3

4.2 พฤติกรรมการหาอาหารของผึ้ง

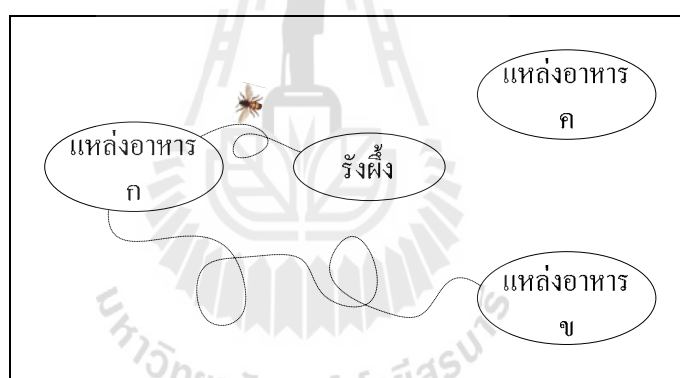
ผึ้งเป็นแมลงสังคมที่มีวิวัฒนาการสูง มีระบบสังคมมาเป็นเวลาช้านานประมาณถึง 30 ล้านปี ผึ้งแต่ละรังเปรียบเสมือนครอบครัวหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วย 3 วรรณะคือ ผึ้งนางพญาหนึ่งตัว ผึ้งตัวผู้หลายร้อยตัว และผึ้งงานอีกจำนวนมากเป็นหมื่นตัว การออกหาน้ำหวานเป็นหน้าที่ของผึ้งงานเท่านั้น วิธีการหาน้ำหวานของผึ้งไม่ซ้ำแบบกับแมลงอื่น ๆ เพราะผึ้งไม่ได้บินออกจากรังเป็นฝูง แล้วแยกย้ายไปหาน้ำหวานอย่างเดาสุ่ม แต่จะส่งผึ้งทำหน้าที่ “ลาดตระเวน” ออกไปก่อน ถ้าผึ้งลาดตระเวนค้นพบแหล่งอาหารอยู่ที่ใด จะกลับมายังรังเพื่อส่งสัญญาณให้บรรดาผึ้งงานทั้งหลายรับรู้ ซึ่งพฤติกรรมการหาอาหารของผึ้งมีกระบวนการดังนี้

1) อาหารของผึ้ง ได้แก่ น้ำหวานซึ่งน้ำหวานนั้นมียูโททั่วไปหลากหลายทิศทางรอบรังผึ้ง ซึ่งน้ำหวานจากดอกไม้หรือจากเกสรดอกไม้จะดึงดูดให้ผึ้งบินไปยังตำแหน่งที่มีอาหารดังรูปที่ 4.1



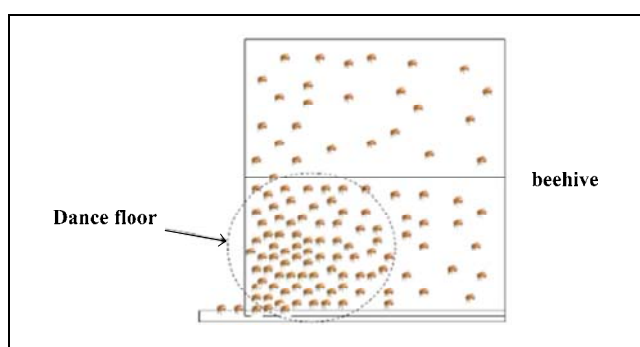
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งแหล่งอาหาร

2) ผึ้งสำรวจ (Scout bees) จะทำหน้าที่ “ลาดตระเวน” ออกไปสำรวจแหล่งอาหารในแต่ละแหล่งซึ่งอยู่นอกกรงผึ้งออกไป ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เส้นทางสำรวจแหล่งอาหารของผึ้งสำรวจ

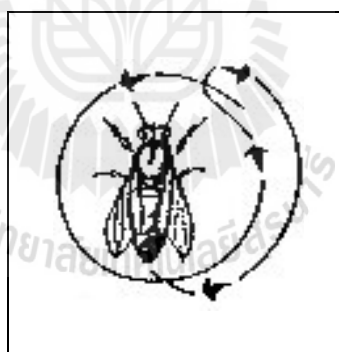
3) เมื่อผึ้งสำรวจพบน้ำหวานหรือเกสรดอกไม้จึงบินกลับมาที่รังยังบริเวณ “ลานเต้นรำ (Dance-floor)” เพื่อเต้นรำส่งสัญญาณให้ผึ้งสนามหรือผึ้งงาน (Working Habit-of Field Bees) รับรู้ รูปที่ 4.3 แสดงการเต้นรำของผึ้งเพื่อส่งสัญญาณผึ้งในกลุ่มรับรู้



รูปที่ 4.3 ลานเต้นรำสำหรับส่งสัญญาณ

4) การสื่อสารของผึ้งคือการเต้นรำ (Waggle dance) เมื่อผึ้งสำรวจที่ออกไปหาอาหารและพบว่าแหล่งอาหารจึงบินกลับมาส่งสัญญาณให้ผึ้งในฝูงรับรู้ ซึ่งพฤติกรรมการเต้นรำ จะอยู่บนผิวของรวงผึ้งโดยแบ่งลักษณะการสื่อสารเป็น 3 ประเภท ดังนี้

- เต้นรำเป็นรูปวงกลม เมื่อแหล่งอาหารอยู่ใกล้รัง เป็นการแสดงตำแหน่งของแหล่งอาหาร ดังรูปที่ 4.4

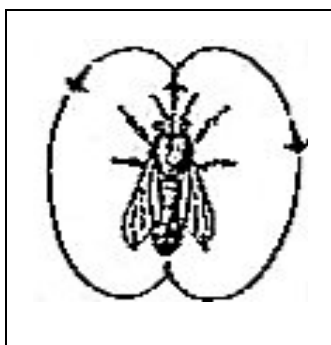


รูปที่ 4.4 การเต้นรำแบบวงกลมของผึ้งสำรวจ

- เต้นรำแบบสายตัวและทำมุมกับดวงอาทิตย์ ท้องจะขยับไปมาอย่างช้า ๆ เมื่อแหล่งอาหารอยู่ไกลออกไป ดังรูปที่ 4.5

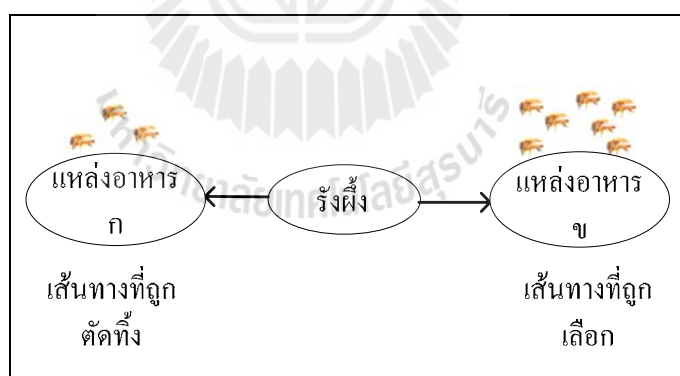
- เต้นรำแบบสายตัวและทำมุมกับดวงอาทิตย์ ท้องจะขยับไปมาอย่างรวดเร็ว เมื่อแหล่งอาหารอยู่ใกล้ ดังรูปที่ 4.5 เช่นเดียวกัน

จะเห็นได้ว่าการเต้นรำของผึ้งแต่ละแบบเป็นการบอกทิศทางและระยะทางของแหล่งอาหาร



รูปที่ 4.5 การเดินร่าแบบสายตัวของผึ้งสำรวจ

5) เมื่อผึ้งสำรวจเดินร่า ผึ้งงานจะเข้ามาเฝ้าดูสังเกตจนเข้าใจจังหวะที่ผึ้งสำรวจแสดง หลังจากนั้นผึ้งงานจึงออกบินไปด้วยกันเป็นหมู่ตรงไปยังที่ซึ่งมีอาหารอย่างรวดเร็ว เมื่อได้น้ำหวานผึ้งจะชนกลับมาที่รังอีกครั้งและทำการกลั่นกรองจนได้น้ำหวานที่ดีและคัดเลือกให้แหล่งอาหารนั้นเป็นแหล่งอาหารใหม่ ผึ้งตัวอื่นก็จะไปหาอาหารยังแหล่งอาหารนั้นต่อไป ดังนั้น เมื่อทำการประเมินคุณภาพของน้ำหวานในแต่ละเส้นทางของการหาอาหารของผึ้ง เส้นทางที่ไม่เหมาะสมจะถูกตัดทิ้งไป รูปที่ 4.6 เป็นการคัดเลือกเส้นทางที่เหมาะสมในการค้นหาอาหารของฝูงผึ้ง



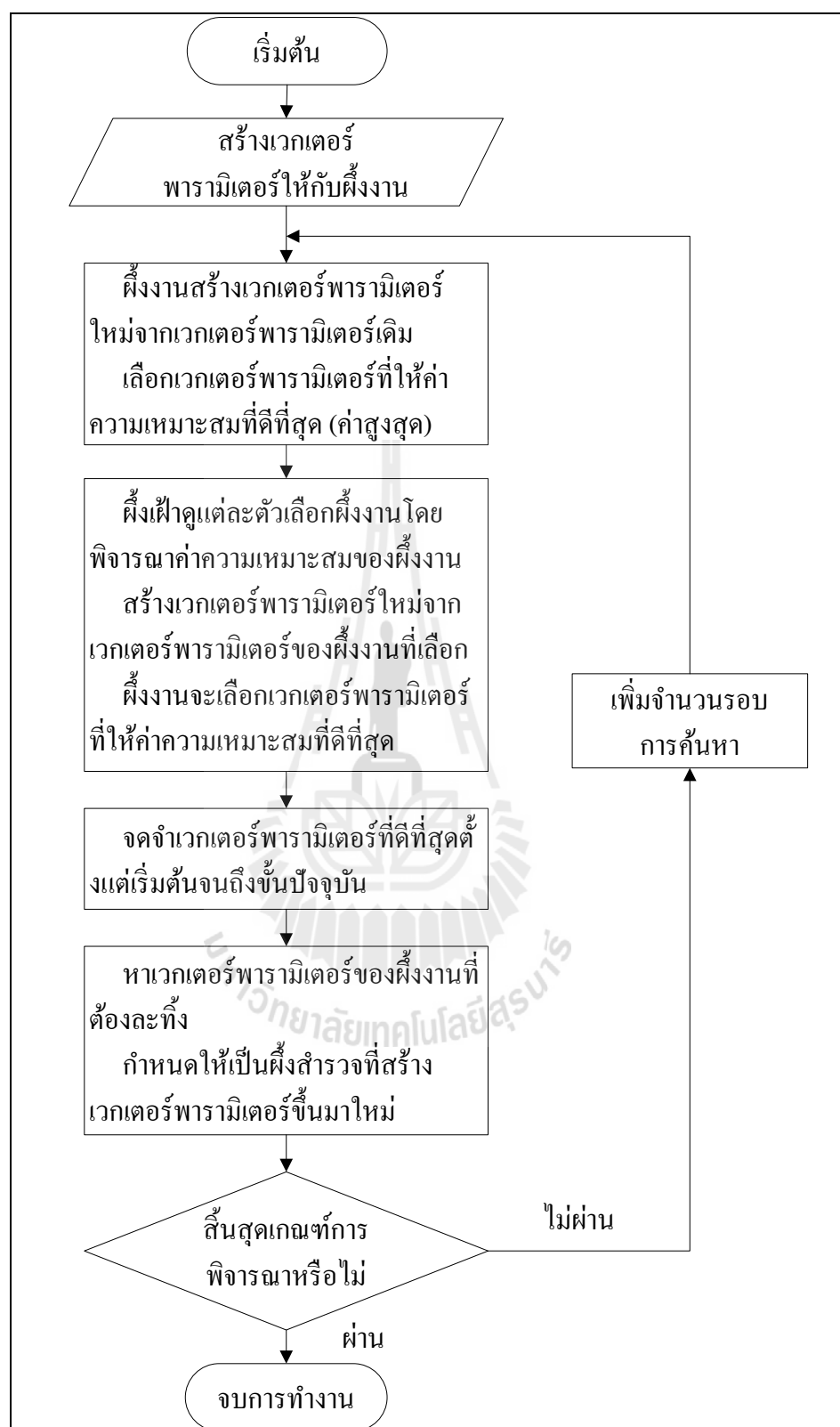
รูปที่ 4.6 เส้นทางของแหล่งอาหารที่เหมาะสม

พฤติกรรมความฉลาดในการหาอาหารของผึ้งนี้ได้นำประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมเพื่อใช้แก้ปัญหา ต่าง ๆ ซึ่งเรียกว่า ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

4.3 ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

จากกระบวนการหาอาหารของผึ้งที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4.2 สามารถนำมาประยุกต์สำหรับกระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดได้ กระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดหรือวิธีการที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อให้ได้คำตอบที่ต้องการ โดยใช้พื้นฐานพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของกลุ่มประชากรผึ้งแต่ละฝูงมาพัฒนาโดยพิจารณาเป้าหมายของแหล่งอาหารที่ดีที่สุดหรือคุณภาพของน้ำหวานที่ดีที่สุด ประชากรของฝูงผึ้งประดิษฐ์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน จำนวนเท่าๆ กัน คือ ผึ้งงาน (Employed bees) และผึ้งเฝ้าดู (Onlooker bees) โดยผึ้งงานจะออกหาอาหารแล้วกลับมาให้ข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งอาหารที่พบให้กับผึ้งเฝ้าดูที่รออยู่ในรัง ผึ้งเฝ้าดูจะเลือกผึ้งงานเพื่อตามออกไปเก็บอาหารโดยขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้รับจากผึ้งงาน ถ้าอาหารแหล่งใดถูกเก็บจนหมด ผึ้งงานที่เป็นเจ้าของแหล่งอาหารนั้นจะกลายไปเป็นผึ้งสำรวจ (Scout bees) เพื่อสุ่มสำรวจหาแหล่งอาหารใหม่ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์สำหรับปัญหาการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เริ่มต้นสร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ให้กับผึ้งงาน
 - 2) ผึ้งงานสร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ใหม่จากเวกเตอร์พารามิเตอร์เดิมแล้วเลือกเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่ให้ค่าความเหมาะสมมากกว่า
 - 3) ผึ้งเฝ้าดูแต่ละตัวเลือกผึ้งงาน โดยขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะสมของผึ้งงาน แล้วสร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ใหม่จากเวกเตอร์พารามิเตอร์ของผึ้งงานที่เลือก ซึ่งผึ้งงานจะเลือกเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่ให้ค่าความเหมาะสมมากกว่า
 - 4) จดจำเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงขั้นตอนนี้
 - 5) หาเวกเตอร์พารามิเตอร์ของผึ้งงานที่ต้องละทิ้ง แล้วกำหนดให้เป็นผึ้งสำรวจที่สร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ขึ้นมาใหม่
 - 6) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-5 จนกระทั่งครบตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้
- ซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนภาพการทำงานของอัลกอริทึมได้ดังรูปที่ (4.7)



รูปที่ 4.7 แผนภาพการทำงานของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

จากแผนภาพการทำงานของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์อธิบายรายละเอียดของขั้นตอนการทำงานที่สำคัญได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : เวกเตอร์พารามิเตอร์ $\bar{x}_i$ ประกอบด้วยสมาชิก x_{ij} เมื่อ $i=1,2,3,...,SN$; SN คือ จำนวนของฝูงงานทั้งหมด และ $j=1,2,...,D$; D คือ จำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสม โดย x_{ij} ถูกกำหนดโดยใช้สมการที่ (4.1) แล้วคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และความเหมาะสมโดยสมการที่ (4.2)

$$x_{ij} = x_{\min j} + rand(0,1) \times (x_{\max j} - x_{\min j}) \quad (4.1)$$

เมื่อ x_{ij} คือ ประชากรผึ้งเริ่มต้นของผึ้งตัวที่ i พารามิเตอร์ตัวที่ j
 $x_{\min j}$ คือ ขอบเขตค่าพารามิเตอร์ต่ำสุดตัวที่ j
 $x_{\max j}$ คือ ขอบเขตค่าพารามิเตอร์สูงสุดตัวที่ j
 $rand$ คือ การสุ่มค่าแบบสม่ำเสมอ (uniform random)

$$fit_i(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i(\bar{x}_i)} & \text{If } f_i(\bar{x}_i) \geq 0 \\ 1 + |(f_i(\bar{x}_i))| & \text{If } f_i(\bar{x}_i) < 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

เมื่อ $f_i(\bar{x}_i)$ คือ ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับเวกเตอร์พารามิเตอร์ $\bar{x}_i$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

เมื่อกำหนดจำนวนของฝูงงานและจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสม อัลกอริทึมจะสร้างกลุ่มประชากรของฝูงผึ้งดังรูปที่ 4.8

	จำนวนพารามิเตอร์ (D)			
จำนวนฟังก์ชัน (SN)	x_{11}	x_{12}	$\dots$	x_{1j}
	x_{21}	x_{22}	$\dots$	x_{2j}
	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
	x_{i1}	x_{i2}		x_{ij}

รูปที่ 4.8 การสร้างกลุ่มประชากรฟังก์ชัน

ขั้นตอนที่ 2 : ฟังก์ชันสร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ใหม่ $\vec{x}_i$ จาก $\vec{x}_i$ โดยใช้สมการที่ (4.3) แล้วคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความเหมาะสม (fitness) เช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ 1

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (4.3)$$

เมื่อ $\vec{x}_k$ คือ เวกเตอร์พารามิเตอร์ที่สุ่มจาก $\vec{x}$ ที่ไม่ใช่เวกเตอร์พารามิเตอร์เดียวกันกับ $\vec{x}_i$
 j คือ จำนวนเต็มสุ่มที่มีค่าระหว่าง 1 ถึง D
 ϕ_{ij} คือ เป็นตัวเลขสุ่มที่มีค่าระหว่าง -1 ถึง 1

ฟังก์ชันจะเลือกเวกเตอร์พารามิเตอร์ระหว่าง $\vec{x}_i$ และ $\vec{x}_i$ ที่ให้ค่าความเหมาะสมที่มากกว่า

ขั้นตอนที่ 3 : ฟังก์ชันเลือกฟังก์ชันโดยพิจารณาค่าความน่าจะเป็น p_i ของค่า $fit_i(x_i)$ ที่หาได้โดยสมการ (4.4)

$$p_i = \frac{fit_i(x_i)}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i(x_i)} \quad (4.4)$$

กระบวนการเลือกฟังก์ชันของฟังก์ชัน จะเริ่มจากฟังก์ชันแต่ละตัวสุ่มค่าระหว่าง 0 ถึง 1 มาหนึ่งค่าแล้วเทียบกับค่า p_i ถ้าค่าสุ่มนั้นมีค่าน้อยกว่า ฟังก์ชันก็จะเลือกฟังก์ชันตัวนั้น ฟังก์ชันจะสร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ใหม่จากเวกเตอร์พารามิเตอร์ของฟังก์ชันที่เลือก พร้อมทั้งคำนวณค่า

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความเหมาะสม แล้วฟังก์ชันจะเลือกเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่ให้ค่าความเหมาะสมที่มากกว่า (คุณภาพของน้ำหวานที่ดีที่สุด) เช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 4 : ฟังก์ชันตัวใดที่ไม่ถูกปรับค่าเวกเตอร์พารามิเตอร์ติดต่อกันจนถึงจำนวนที่กำหนดไว้ (Limit or abandonment criterion) ก็จะถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันสำรวจแล้วกำหนดเวกเตอร์พารามิเตอร์ใหม่ด้วยสมการที่ (4.1)

4.3.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

สำหรับพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ มีดังนี้

- 1) จำนวนประชากรผึ้งในฝูง (Colony size)
- 2) จำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Iteration)
- 3) จี๊ดจำกัดในการละทิ้งแหล่งอาหารที่ไม่เหมาะสม (limit value)
- 4) จำนวนพารามิเตอร์ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (number of variables in the problem)
- 5) ขอบเขตต่ำสุดของพารามิเตอร์ควบคุมเหมาะสมที่สุด (x_{min})
- 6) ขอบเขตสูงสุดของพารามิเตอร์ควบคุมเหมาะสมที่สุด (x_{max})

จากขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค สามารถสรุปพารามิเตอร์ที่ควบคุมต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ควบคุมของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค

ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์	วิธีจินเนติกอัลกอริทึม	วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค
number of paremeters in the problem	number of paremeters in the problem	number of paremeters in the problem
Iteration	Iteration	Iteration
x_{min}, x_{max}	x_{min}, x_{max}	x_{min}, x_{max}
Population size	Population size	Population size
Limit or Abandonment criterion	Crossover rate	Acceleration constants
-	Mutation rate	-

4.4 ทดสอบขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์โดยใช้ฟังก์ชันคณิตศาสตร์พื้นฐาน

สำหรับการทดสอบขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์นี้ ได้ทำการทดสอบกับฟังก์ชันคณิตศาสตร์พื้นฐาน นั้น ได้ทำการทดสอบกับฟังก์ชัน 4 ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาการลู่เข้าของจุดคำตอบที่เหมาะสมเมื่อรูปแบบของฟังก์ชันแตกต่างกันไป

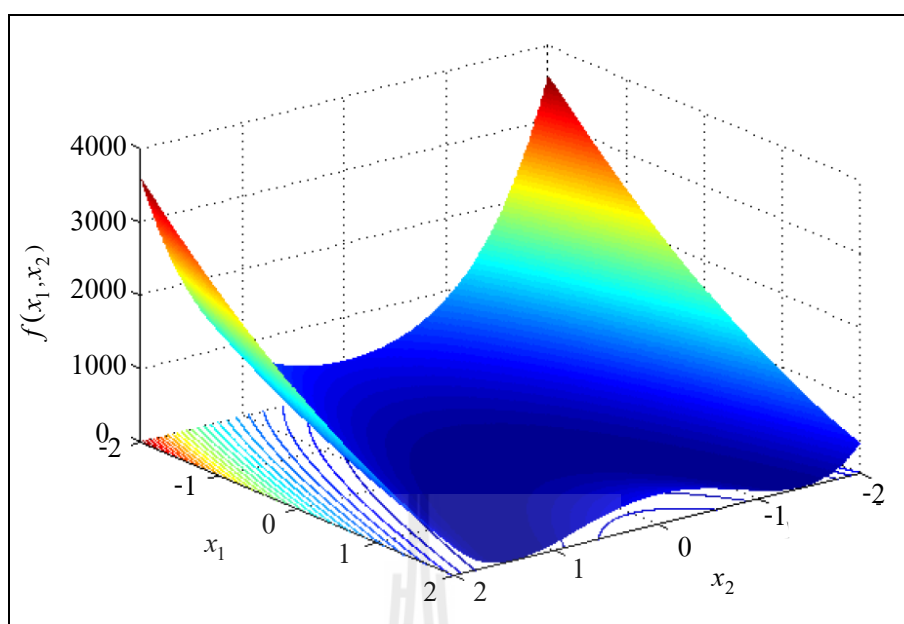
4.4.1 ฟังก์ชันคณิตศาสตร์พื้นฐาน

ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่นำมาทดสอบนี้มีจุดต่ำสุดของคำตอบเพียงค่าเดียว ซึ่งเหมาะสำหรับการทดสอบด้วยขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะที่สุด เนื่องจากตรวจสอบคำตอบได้ง่าย ซึ่งฟังก์ชันที่ใช้ทดสอบ มีดังนี้

1) ฟังก์ชันโรเซนบรอก (Rosenbrock's function)

ฟังก์ชันโรเซนบรอกเป็นฟังก์ชัน ไม่นูน (non-convex function) ซึ่งมักเรียกว่า ฟังก์ชันกล้วย ซึ่งจุดคำตอบที่ได้เป็นจุดต่ำสุดแบบวงแคบ รูปร่างเรียบมีส่วนโค้งน้อย มีความบรรจบของค่าเหมาะสมแบบวงกว้างค่อนข้างยาก [Sheng Liu] มีขอบที่สูงและพื้นผิวรอบเป็นรูปโค้งดังนั้น มักใช้เป็นปัญหาการทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด สมการโรเซนบรอกแสดงไว้ในสมการที่ (4.5) ซึ่งมีค่าต่ำสุดแบบวงกว้างของ $f(x)=0$ เมื่อ $x_1=1$ และ $x_2=1$

$$f(x)=100 \times (x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (4.5)$$

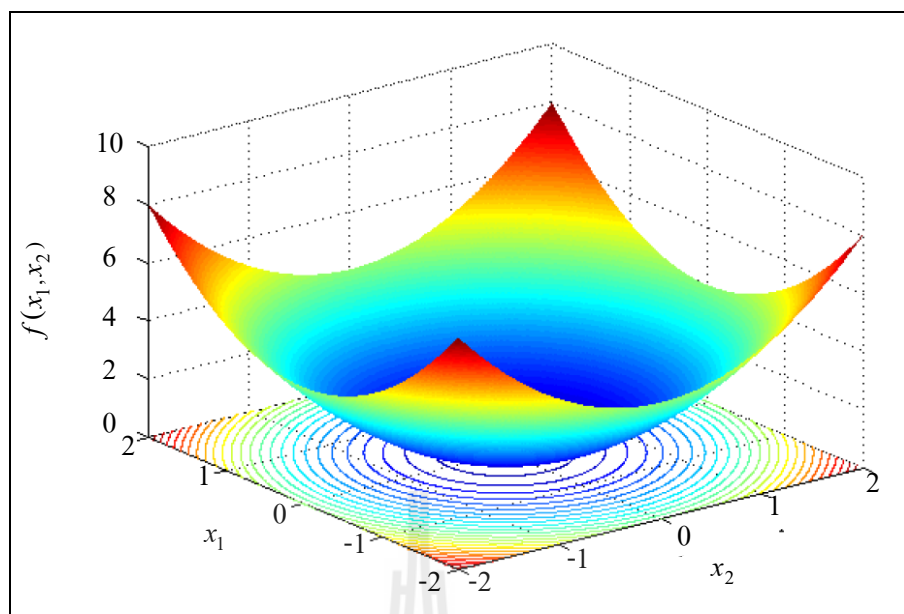


รูปที่ 4.9 พื้นผิวดอสนองของฟังก์ชัน โรเซนบรอก กรณี 2 ตัวแปร

2) ฟังก์ชันกำลังสอง (quadratic's function)

ฟังก์ชันกำลังสองหรือสมการกำลังสอง คือสมการของพหุนามตัวแปรเดียวที่มีดีกรีเท่ากับ 2 โดยมีจุดต่ำสุดของฟังก์ชันเพียงจุดเดียว อยู่ที่ (0,0) และค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน คือ $f(x)=0$ รูปแบบทั่วไปของสมการกำลังสองที่ใช้สำหรับทดสอบ คือ

$$f(x)=x_1^2+x_2^2 \quad (4.6)$$

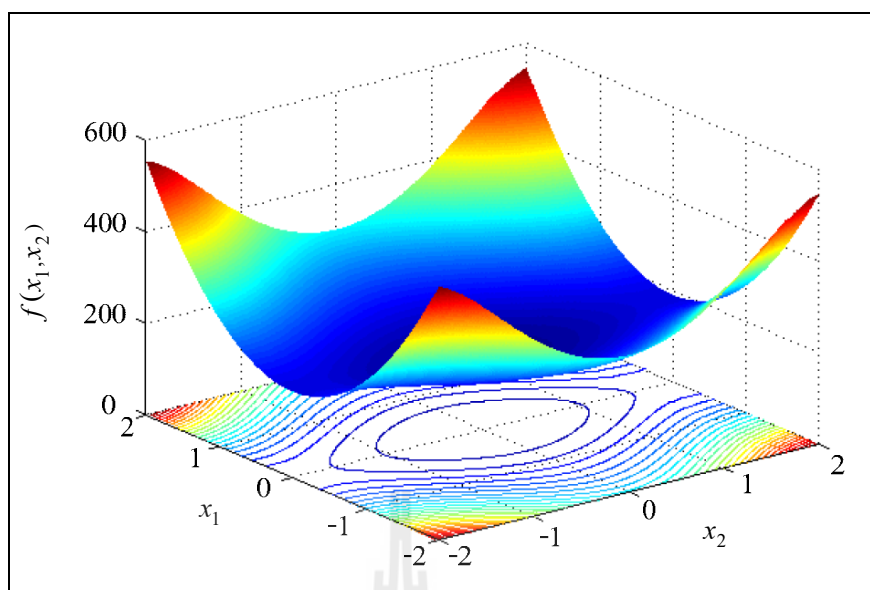


รูปที่ 4.10 พื้นผิวตอบสนองของฟังก์ชันกำลังสอง กรณี 2 ตัวแปร

3) ฟังก์ชันวงกลม (circle's function)

ฟังก์ชันวงกลมที่ใช้ทดสอบ มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ (0,0) และค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน คือ $f(x)=0$ ดังสมการที่ (4.7)

$$f(x) = (x_1^2 + x_2^2)^{\frac{1}{4}} \times \left\{ \sin^2 \left(50(x_1^2 + x_2^2)^{\frac{1}{10}} + 0.1 \right) \right\} \quad (4.7)$$

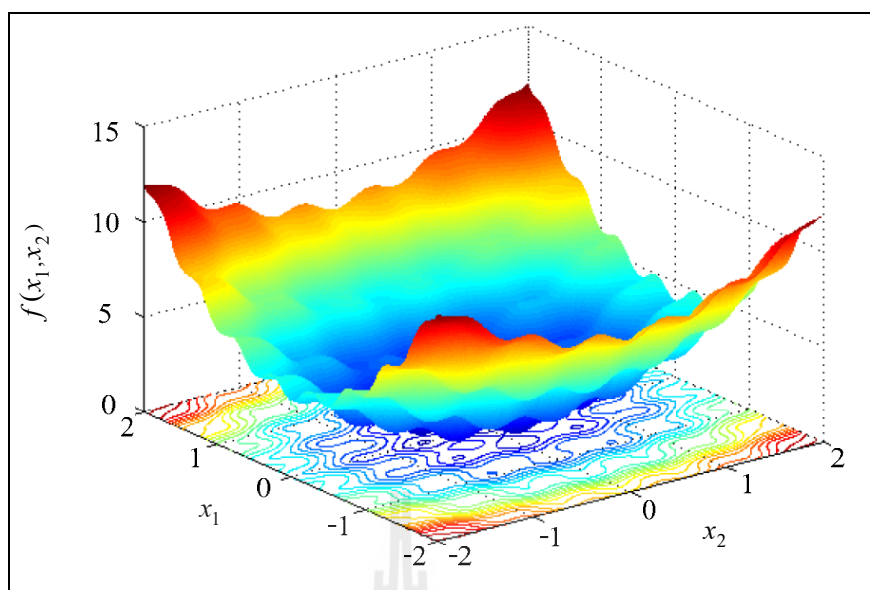


รูปที่ 4.11 แสดงพื้นผิวตอบสนองของฟังก์ชันวงกลมกรณี 2 ตัวแปร

3) ฟังก์ชัน Bohachevsky

ฟังก์ชัน Bohachevsky เป็นฟังก์ชันที่มีจุดต่ำสุดแบบวงแคบหลายจุด ดังรูปที่ 4.12 มีจุดต่ำสุดแบบวงกว้างที่ $x_1=0$ และ $x_2=0$ ที่ทำให้ $f(x)=0$ ฟังก์ชัน Bohachevsky ดังสมการที่ (4.8)

$$f(x) = x_1^2 + 2x_2^2 - 0.3\cos(3\pi x_1) - 0.4\cos(4\pi x_2) + 0.7 \quad (4.8)$$



รูปที่ 4.12 พื้นผิวดอบนองของฟังก์ชัน Bohachevsky กรณี 2 ตัวแปร

4.4.2 ผลการทดสอบด้วยฟังก์ชันคณิตศาสตร์พื้นฐาน

จากรูปแบบฟังก์ชันที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 4.4.1 นั้น เมื่อคำนวณหาค่าเหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ได้เป็นดังนี้

1) ผลการทดสอบด้วยฟังก์ชันโรเซนบรอก

สำหรับการทดสอบด้วยฟังก์ชันโรเซนบรอก กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของการค้นหาค่าเหมาะที่สุดเป็นการสุ่มในช่วง $-2 \leq x_1 \leq 2$ และ $-2 \leq x_2 \leq 2$ และทำการคำนวณ 30 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ คำย่อ เพื่อแทนชื่อของวิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อให้มีความเข้าใจตรงกัน ดังนี้

BFGS คือ ระเบียบวิธีควาเลียนวนตัน

PSO คือ การหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค

GA คือ จินเนติกอัลกอริทึม

ABC คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

จากการทดสอบด้วยฟังก์ชันกำลังสองซึ่งทำการสุ่มค่าเริ่มต้นในการค้นหาให้อยู่ในช่วง $-2 \leq x_1 \leq 2$ และ $-2 \leq x_2 \leq 2$ และทำการคำนวณ 30 ครั้ง พบว่า จุดคำตอบที่ได้มีค่าเท่ากัน แต่ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันใช้เวลาในการค้นหาน้อยที่สุด วิธีจินเนติกอัลกอริทึมใช้เวลาในการค้นหามากที่สุด ส่วนขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ใช้เวลาในการค้นหามากกว่าระเบียบวิธีคล้ายนิวตันและวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค แต่น้อยกว่าวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากัน แต่วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคมีค่ามากกว่า

3) ฟังก์ชันวงกลม

สำหรับการทดสอบด้วยฟังก์ชันวงกลม กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของการค้นหาค่าเหมาะที่สุดเป็นการสุ่มในช่วง $-2 \leq x_1 \leq 2$ และ $-2 \leq x_2 \leq 2$ เช่นเดียวกับการทดสอบด้วยฟังก์ชันโรเซนบรอก และทำการคำนวณ 30 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบการทดสอบด้วยฟังก์ชันวงกลม

วิธี	$f(x)$				x_1	x_2	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน-มาตรฐาน			
BFGS	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1456	0.1914	0.0142
PSO	0.0000	0.0006	0.0001	0.0001	0.0100	0.2300	0.1164
GA	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008	0.0074	5.4770
ABC	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0527	0.1511	0.2411

จากการทดสอบด้วยฟังก์ชันวงกลมซึ่งทำการสุ่มค่าเริ่มต้นในการค้นหาให้อยู่ในช่วง $-2 \leq x_1 \leq 2$ และ $-2 \leq x_2 \leq 2$ และทำการคำนวณ 30 ครั้ง พบว่า จุดคำตอบที่ได้มีค่าแตกต่างกัน วิธีจินเนติกอัลกอริทึมค้นพบจุดคำตอบต่ำสุดแต่ใช้เวลาในการค้นหามากที่สุด รองลงมาคือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ส่วนขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ใช้เวลาในการค้นหามากกว่าระเบียบวิธีคล้ายนิวตันแต่จุดคำตอบที่พบมีค่าต่ำกว่าระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน

4) ฟังก์ชัน Bohachevsky

สำหรับการทดสอบด้วยฟังก์ชัน Bohachevsky กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของการค้นหาค่าเหมาะที่สุดเป็นการสุ่มในช่วง $-2 \leq x_1 \leq 2$ และ $-2 \leq x_2 \leq 2$ เช่นเดียวกับการทดสอบด้วยฟังก์ชันโรเซนบรอก และทำการคำนวณ 30 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบการทดสอบด้วยฟังก์ชัน Bohachevsky

วิธี	$f(x)$				x_1	x_2	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน-มาตรฐาน			
BFGS	0.0000	0.1812	0.0156	0.0314	0.0000	0.0000	0.0156
PSO	0.0000	0.0046	0.0006	0.0010	0.0003	-0.0001	0.1479
GA	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	5.1959
ABC	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.2302

จากการทดสอบด้วยฟังก์ชัน Bohachevsky ซึ่งทำการสุ่มค่าเริ่มต้นในการค้นหาให้อยู่ในช่วง $-2 \leq x_1 \leq 2$ และ $-2 \leq x_2 \leq 2$ และทำการคำนวณ 30 ครั้ง พบว่า จุดคำตอบที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งวิธีจินเนติกอัลกอริทึมใช้เวลาในการค้นหามากที่สุด รองลงมาคือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค และระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน แต่ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุด

4.5 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการนำพฤติกรรมความฉลาดในการหาอาหารของผึ้งมาพัฒนาสำหรับแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด เรียกว่า ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ และทำการทดสอบขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ด้วยฟังก์ชันคณิตศาสตร์พื้นฐาน เปรียบเทียบกับการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค จากผลการทดสอบด้วยฟังก์ชันคณิตศาสตร์พื้นฐานที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า เมื่อรูปแบบของปัญหาแตกต่างกันไป ประสิทธิภาพการค้นหาก็จะแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นการแก้ปัญหาแต่ละรูปแบบควรเลือกใช้วิธีการค้นหาที่เหมาะสมกับปัญหานั้น

บทที่ 5

การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

5.1 บทนำ

บทนี้เป็นการแสดงผลการแก้ปัญหาการทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้าแต่ละระบบ การทดสอบกระทำโดยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณวิธีการที่เสนอ ทำการทดสอบกับระบบทดสอบ 7 ระบบ ประกอบด้วย ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE ขนาด 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส และ 118 บัส ระบบทดสอบนครราชสีมา 2 (9 บัส) และระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส โดยมีกรณีศึกษาแบ่งเป็น 3 กรณีที่สำคัญ คือ

1) การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง โดยใช้ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน (BFGS) วิธีจินเนติกอัลกอริทึม (GA) วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค (PSO) และขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ (ABC) โดยกำหนดให้ทำการทดสอบกับระบบทดสอบระบบเดียวกัน แล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับการแก้ปัญหาแต่ละวิธี เพื่อให้เหมาะสมกับระบบทดสอบแต่ละระบบ สำหรับการทดสอบแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสองนั้น ได้ทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE ขนาด 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส และระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส คุณลักษณะที่ทำการทดสอบ คือ ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และทำการกำหนดตัวแปรควบคุมต่าง ๆ เพื่อใช้ในการแก้ปัญหา

2) การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาเช่นเดียวกับการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง โดยกำหนดให้ทดสอบกับระบบทดสอบระบบเดียวกัน แต่ทำการทดสอบเฉพาะระบบทดสอบ 6 บัส 14 บัส และ 30 เท่านั้น แล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับการแก้ปัญหาแต่ละวิธี เพื่อให้เหมาะสมกับระบบทดสอบแต่ละระบบ คุณลักษณะที่ทำการทดสอบ คือ ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบมีจุดเปิดวาล์วหลายจุด (valve-point loading fuel-cost function) และทำการกำหนดตัวแปรควบคุมต่าง ๆ เพื่อใช้ในการแก้ปัญหา

3) การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ใช้วิธีการแก้ปัญหาเช่นเดียวกับการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชัน

พหุนามอันดับสองและฟังก์ชันค่าเชื่อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น โดยทำการทดสอบกับระบบทดสอบบนคราชสีมา 2 ซึ่งเป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ จึงพิจารณาเพียงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งเท่านั้น ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับการแก้ปัญหาแต่ละวิธีเพื่อให้เหมาะกับระบบทดสอบ

5.2 การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

ในบทที่ 4 ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์สำหรับการหาค่าเหมาะที่สุด โดยมีกระบวนการทำงานของโปรแกรมผังแผนภาพการทำงานของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์รูปที่ 4.7 สำหรับหัวข้อนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เพื่อใช้ในการค้นหาค่าต้นทุนเชื่อเพลิงรวมภายในระบบและการค้นหาลำดับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งที่ต่ำที่สุด เพื่อให้ได้จุดคำตอบที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของระบบ โดยการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์สำหรับการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อให้เหมาะสมกับปัญหา สรุปเป็นขั้นตอนดังนี้

1) เวกเตอร์พารามิเตอร์ $\vec{x}$ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ ขนาดแรงดัน มุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ ขนาดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าเทปหม้อแปลง และขนาดกำลังไฟฟ้าของตัวชดเชยต่าง ๆ

2) ค่าต่ำสุดและสูงสุดของพารามิเตอร์แต่ละตัว กำหนดพจน์การปรับโทษ

3) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสม คือ

- ฟังก์ชันค่าเชื่อเพลิง

$$F_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{G,i}) + \Omega(x, \rho) \quad (5.1)$$

เมื่อ $F_i(P_{G,i})$ คือ ฟังก์ชันค่าเชื่อเพลิงแบบฟังก์ชันพหุนามอันดับสองหรือฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

$\Omega(x, \rho)$ คือ พจน์การปรับโทษ

- ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

$$F_{\text{loss}} = \sum_{l=1}^{N_L} g_{l,j} \{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)\} + \Omega(x, \rho) \quad (5.2)$$

ค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ ในการสอบนี้มีการกำหนดค่าที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับระบบทดสอบ นั้น ๆ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ที่ต้องมีการกำหนด ได้แก่

- 1) ประชากรของผึ้งในฝูง
- 2) จำนวนรอบของการค้นหา
- 3) ค่าจำกัดการละทิ้งคำตอบ

เมื่อพิจารณาการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดกับขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันดังนี้

ตารางที่ 5.1 เปรียบกับกระบวนการหาค่าความเหมาะสมในการค้นหาอาหารของฝูงผึ้งกับการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด	การหาค่าความเหมาะสมในการค้นหาอาหารของฝูงผึ้ง
ตัวแปรควบคุม	ประชากรผึ้ง
ค่าต่ำสุดและสูงสุดตัวแปรควบคุม	ขอบเขตเส้นทางการค้นหาแหล่งอาหาร
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	คุณภาพของน้ำหวาน
ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด	คุณภาพของน้ำหวานที่ดีที่สุด
จำนวนรอบการคำนวณ	จำนวนรอบของการเก็บน้ำหวาน

5.3 การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสองนี้ ทำการทดสอบกับระบบทดสอบ 6 ระบบ คือ ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE ขนาด 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส และระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออก ขนาด 147 บัส ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในที่นี้จะใช้ตัวแปรตามที่ได้นิยามไว้ในบทที่ 3

1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในที่นี้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ คือ ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ซึ่งอยู่ในรูป $f(x)=a+bx+cx^2$ ดังแสดงในสมการที่ (5.3)

$$F_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{G,i})$$

$$F_i(P_{G,i}) = a_i + b_i P_{G,i} + c_i P_{G,i}^2 \quad (5.3)$$

เมื่อ a_i, b_i และ c_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ i

2) เงื่อนไขบังคับสมการ

เงื่อนไขบังคับสมการ ใช้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าในรูปพิกัดเชิงขั้วซึ่งแสดงไว้ในหัวข้อ 2.4 โดยจัดรูปเงื่อนไขบังคับสมการให้อยู่ในรูปต่อไปนี้

$$g(x,u)=0 \quad (5.4)$$

เมื่อ g คือ เงื่อนไขบังคับสมการ

x คือ ตัวแปรสถานะ

u คือ ตัวแปรควบคุม

3) เงื่อนไขบังคับอสมการ

เงื่อนไขบังคับอสมการจัดให้อยู่ในรูป ของอสมการต่อไปนี้

$$h(x,u) \leq 0 \quad (5.5)$$

เมื่อ h คือ เงื่อนไขบังคับอสมการ

• เงื่อนไขบังคับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เงื่อนไขบังคับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประกอบด้วย แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (V_G) , กำลังไฟฟ้าแอกทีฟเอาต์พุต (P_G) และ กำลังไฟฟารีแอกทีฟเอาต์พุต (Q_G) ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ดังสมการ (5.6)-(5.8)

$$V_{G_i}^{\min} \leq V_{G_i} \leq V_{G_i}^{\max}, \quad i=1,2,3,...,N_G \quad (5.6)$$

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max}, \quad i=1,2,3,\dots,N_G \quad (5.7)$$

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max}, \quad i=1,2,3,\dots,N_G \quad (5.8)$$

- เงื่อนไขบังคับของหม้อแปลง

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max}, \quad i=1,2,3,\dots,N_T \quad (5-9)$$

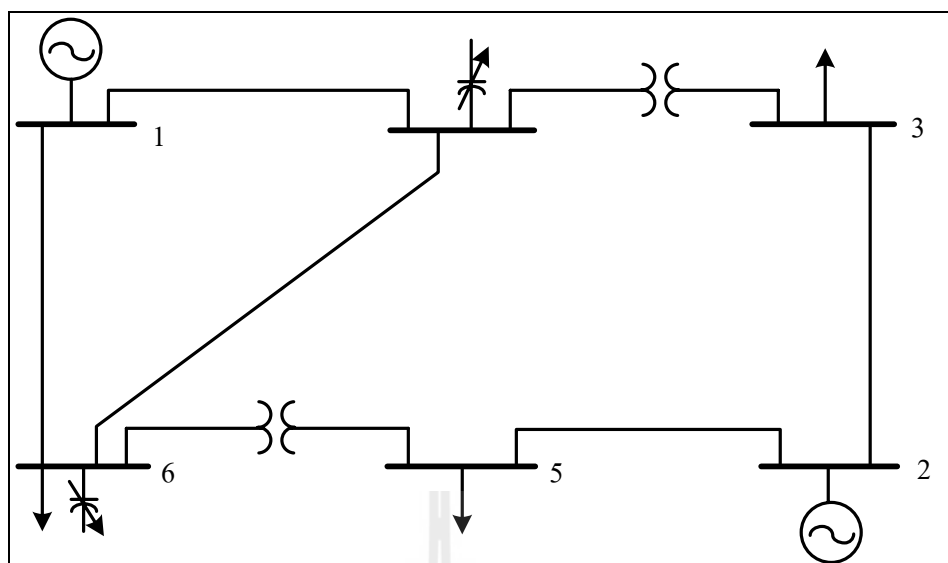
- เงื่อนไขบังคับของตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้าขนาน (Shunt VAR compensations)

$$Q_{C_i}^{\min} \leq Q_{C_i} \leq Q_{C_i}^{\max}, \quad i=1,2,3,\dots,N_C \quad (5-10)$$

เมื่อ	N_G	คือ จำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
	N_T	คือ จำนวนของแท็บหม้อแปลง
	N_C	คือ จำนวนของตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้า

5.3.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส

การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าใช้หลักการตามที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 2.9 โดยพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์หนึ่งฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงซึ่งเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง รูปแบบสมการดังสมการที่ (5.3) ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส แสดงดังรูปที่ 5.1 ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 230 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ตัว ระบบทดสอบนี้มีตัวแปรที่ควบคุมทั้งหมด 4 ชนิด คือ กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าแท็บหม้อแปลง ขนาดแรงดันบัสควบคุม และขนาดของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ค่าสัมประสิทธิ์ของต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถทำงานได้ของระบบทดสอบนี้ กำหนดดังตารางที่ 5.2 รายละเอียดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส

ตารางที่ 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง		
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	a	b	c
1	50	200	0	100	100
2	20	80	0	500	100

หมายเหตุ : ขอบเขตของขนาดแรงดัน กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

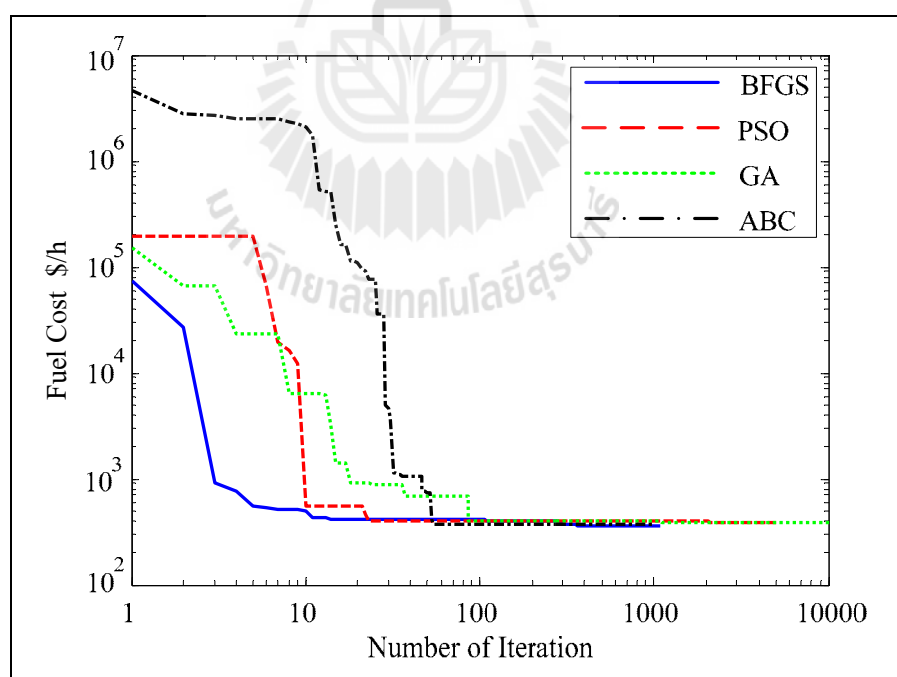
ขอบเขตของค่าแท็บหม้อแปลง กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

การทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฟังก์ชันประคิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส เมื่อใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^6$	Iteration = 10000	Iteration = 5000	Iteration = 1000
Default	Population size = 30	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง แต่ละวิธีหาคำตอบทั้ง 30 ครั้ง การหาคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.2 ค่าเชื้อเพลิงดังตารางที่ 5.4 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.5 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.3



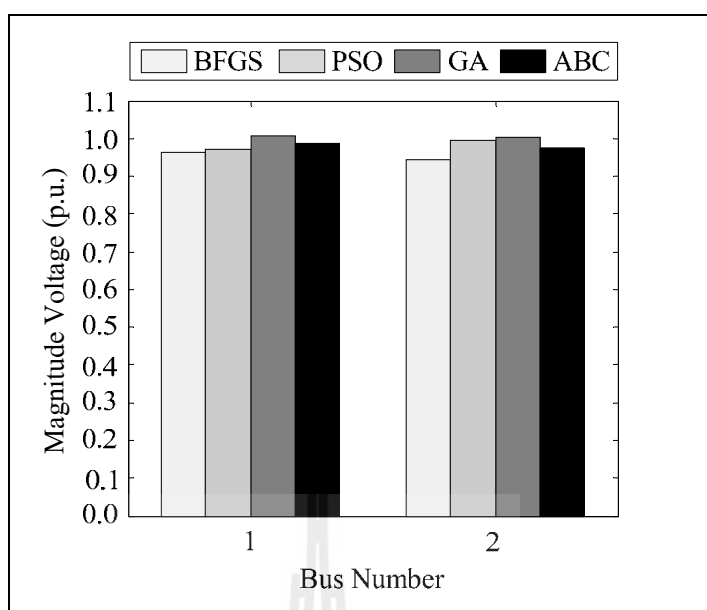
รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบการหาคำตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

ตารางที่ 5.4 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

วิธี	ค่าเชื้อเพลิง (\$/h)				เวลาการคำนวณ เฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน- มาตรฐาน	
BFGS	351.6008	584.6193	460.3693	61.5680	3.0016
PSO	388.5910	629.1744	490.2717	73.5639	42.8290
GA	368.9266	572.4588	469.1800	50.6467	64.5425
ABC	353.2910	445.5460	401.5240	25.0385	6.1873

ตารางที่ 5.5 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด (MW)			
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	BFGS	PSO	GA	ABC
1	50	200	110.5915	115.2073	114.2510	118.6686
2	20	80	40.5125	35.9465	40.4411	26.1533
Total Generation (MW)			151.1040	151.1538	154.6921	144.8219
Total Load (MW)			135			

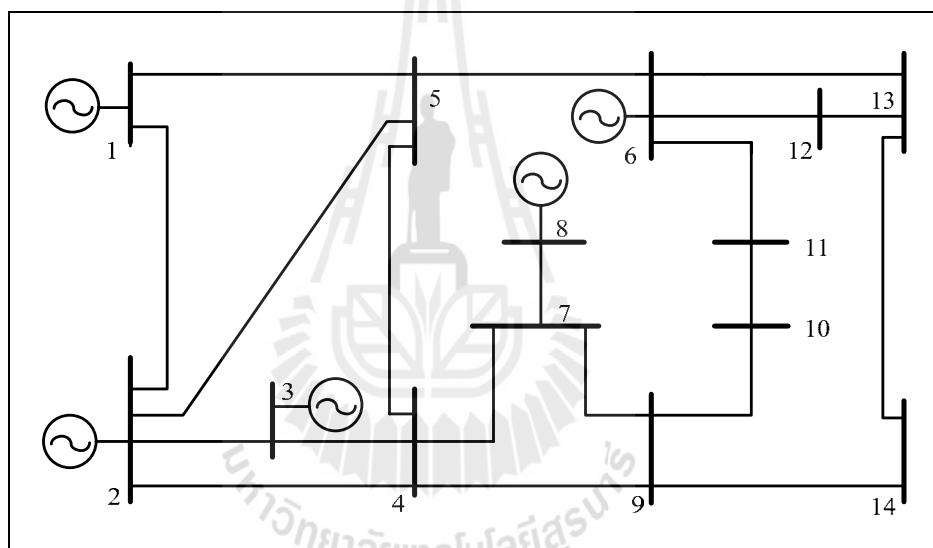


รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.2 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบที่ใกล้เคียงกัน โดยวิธีคล้ายนิวตันมีการลู่เข้าเร็วที่สุด ตามด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ ส่วนวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่เข้าช้าที่สุด เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบวิธีคล้ายนิวตันมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำกว่าวิธีอื่น รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม เปรียบวิธีคล้ายนิวตันและวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย เปรียบวิธีคล้ายนิวตันใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จากตารางที่ 5.4 แสดงกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นกำลังงานเอาต์พุตอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่ากำลังงานเอาต์พุตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าต่ำที่สุด รองลงมา คือ เปรียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค และวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีค่าสูงที่สุด และจากรูปที่ 5.3 แสดงขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้

5.3.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์หนึ่ง ฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง รูปแบบสมการดังสมการที่ (5.3) ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส แสดงดังรูปที่ 5.4 ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 230 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 ตัว ระบบทดสอบนี้มีตัวแปรที่ควบคุมทั้งหมด 3 ชนิด คือ กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าเทปหม้อแปลง ขนาดแรงดันบัลลูนควบคุม ค่าสัมประสิทธิ์ของต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถทำงานได้ของระบบทดสอบนี้ กำหนดดังตารางที่ 5.6 รายละเอียดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 5.4 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

ตารางที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส สำหรับฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง		
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	a	b	c
1	50	200	150.0000	2.4500	0.0150
2	20	80	44.4000	3.5100	0.0225
3	15	50	55.0000	2.7500	0.0175
6	10	30	40.6000	3.8900	0.0130
8	10	35	75.0000	2.8500	0.0275

หมายเหตุ : ขอบเขตของขนาดแรงดัน กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

ขอบเขตของค่าเทียบหม้อแปลง กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

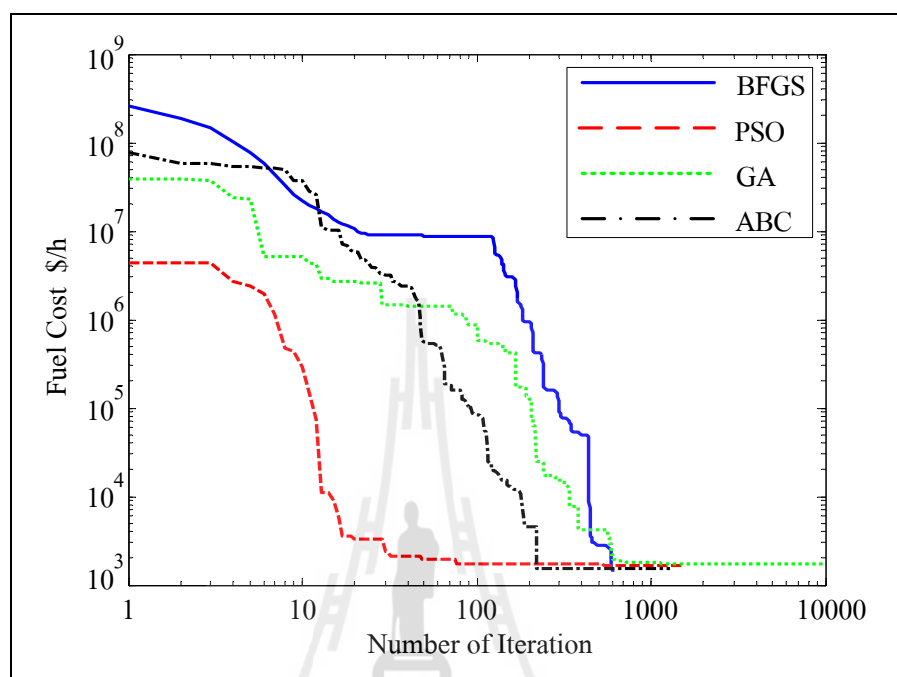
การทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส เมื่อใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^6$	Iteration = 10000	Iteration = 5000	Iteration = 1300
Default	Population size = 30	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง แต่ละวิธีเข้าสู่หาคำตอบทั้ง 30 ครั้ง การเข้าสู่ของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูง

อนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.5 ค่าเชื้อเพลิงดังตารางที่ 5.8 และกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.9 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.6



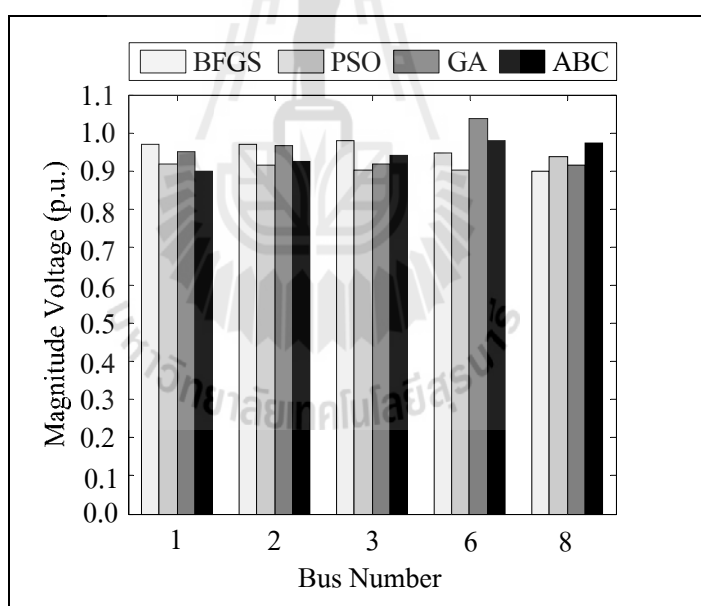
รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบการลู่เข้าของค่าตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

ตารางที่ 5.8 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

วิธี	ค่าเชื้อเพลิง (\$/h)				เวลาการคำนวณ เฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน- มาตรฐาน	
BFGS	1429.5000	1942.0000	1605.6000	150.2039	10.6229
PSO	1611.1000	1931.6000	1730.6000	83.4181	21.8212
GA	1558.0000	2039.1000	1773.1000	106.8417	148.4788
ABC	1569.3000	1915.0000	1732.0000	98.9770	20.1666

ตารางที่ 5.9 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด (MW)			
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	BFGS	PSO	GA	ABC
1	50	200	90.1345	134.2725	111.4308	122.7676
2	20	80	59.3984	77.1323	70.5266	58.6069
3	15	50	50.0000	15.6556	43.7188	50.0000
6	10	30	29.9997	11.1706	23.7303	23.4407
8	10	35	33.0443	34.9872	32.3377	30.9965
Total Generation (MW)			262.5769	273.2182	281.7442	285.8117
Total Load (MW)			259			



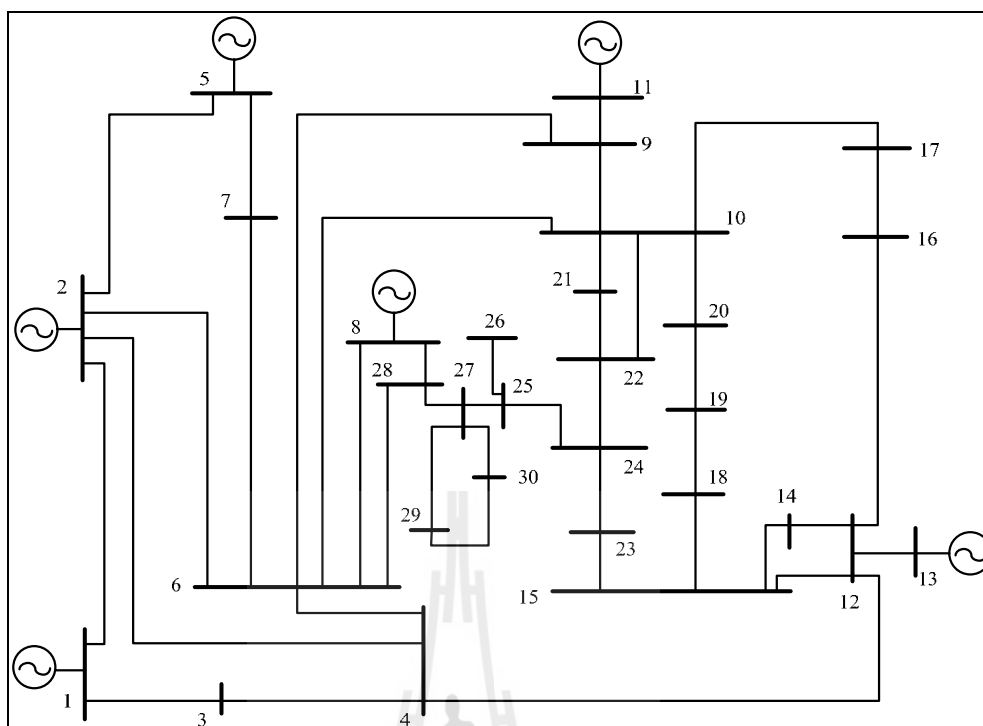
รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.5 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่าการลู่เข้าหาคำตอบที่ใกล้เคียงกัน โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคมีการลู่เข้าเร็วที่สุด ตามด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้ง

ประดิษฐ์ ส่วนวิธีคล้ายนิวตันและวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่ออกช้าที่สุด เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.8 ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำกว่าวิธีอื่น รองลงมา คือ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีจินเนติกอัลกอริทึมและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จากตารางที่ 5.4 แสดงกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นกำลังงานเอาต์พุตอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่ากำลังงานเอาต์พุตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีค่าต่ำที่สุด รองลงมา คือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าสูงที่สุด และจากรูปที่ 5.6 แสดงขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้

5.3.3 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์หนึ่งฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง รูปแบบสมการดังสมการที่ (5.3) ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส แสดงดังรูปที่ 5.7 ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 230 kV ที่กำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 ตัว ระบบทดสอบนี้มีตัวแปรที่ควบคุมทั้งหมด 3 ชนิด คือ กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าเทปหม้อแปลง ขนาดแรงดันบัสควบคุม ค่าสัมประสิทธิ์ของต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถทำงานได้ของระบบทดสอบนี้ กำหนดดังตารางที่ 5.10 รายละเอียดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 5.7 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

ตารางที่ 5.10 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส สำหรับฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง		
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	a	b	c
1	50	200	0	2.0000	0.00375
2	20	80	0	1.7500	0.01750
5	15	50	0	1.0000	0.06250
8	10	35	0	3.2500	0.00834
11	10	30	0	3.0000	0.02575
13	12	40	0	3.0000	0.02500

หมายเหตุ : ขอบเขตของขนาดแรงดัน กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

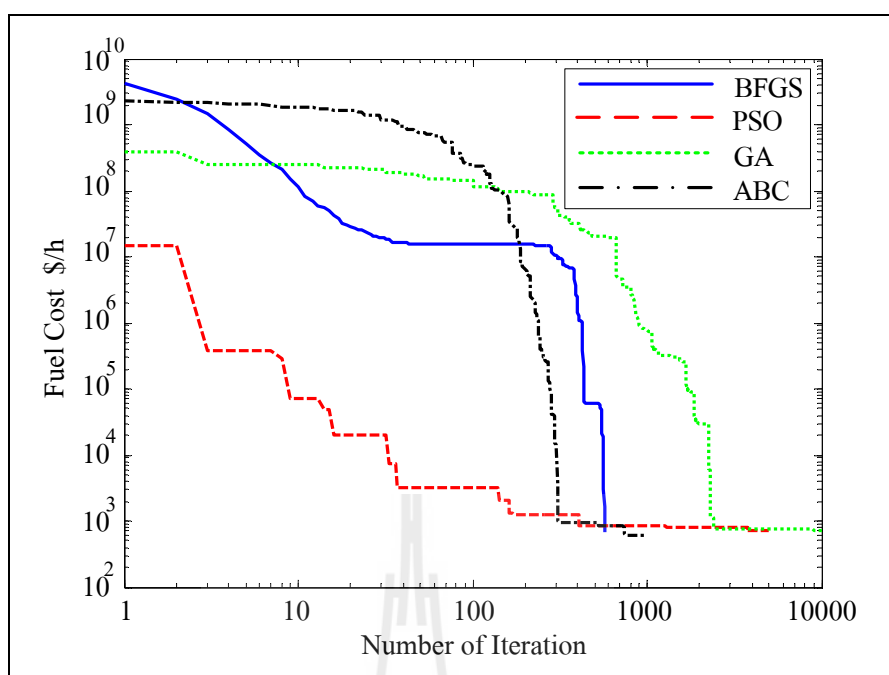
ขอบเขตของค่าเทียบหม้อแปลง กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

การทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส เมื่อใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^6$	Iteration = 10000	Iteration = 5000	Iteration = 1000
Default	Population size = 30	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง ทุกวิธีถูกรู้หาคำตอบทั้ง 30 ครั้ง ยกเว้นระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีการรู้หาคำตอบเพียง 26 ครั้ง การรู้เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.8 ค่าเชื้อเพลิงดังตารางที่ 5.12 และกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดดังตารางที่ 5.13 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.9



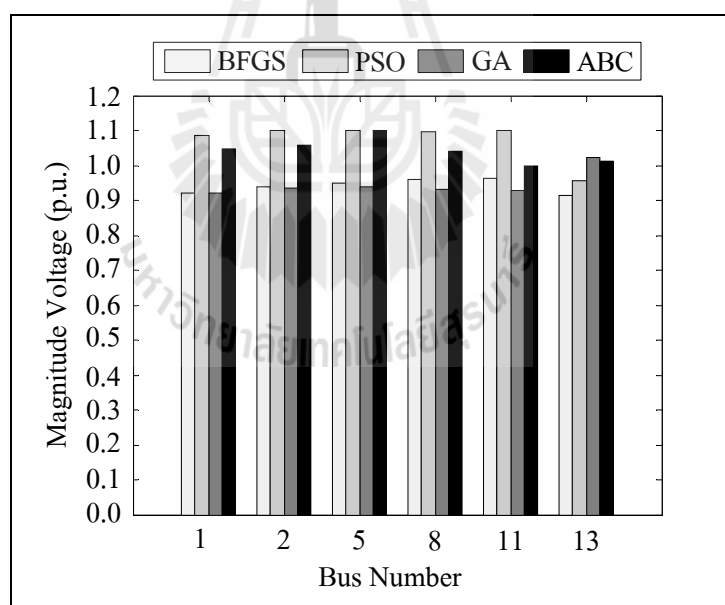
รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบการลู่เข้าของค่าตอบของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

ตารางที่ 5.12 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

วิธี	ค่าเชื้อเพลิง (\$/h)				เวลาการคำนวณ เฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน- มาตรฐาน	
BFGS	647.355	1097.0000	779.0385	99.4290	48.8614
PSO	781.389	1268.65	916.346	87.1992	111.695
GA	700.524	921.911	804.953	58.2257	448.126
ABC	633.353	908.609	804.028	60.4100	48.8014

ตารางที่ 5.13 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด (MW)			
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	BFGS	PSO	GA	ABC
1	50	200	98.9902	67.5361	177.3583	134.3811
2	20	80	28.3032	79.8351	21.3704	20.0000
5	15	50	27.3165	36.6322	18.9010	31.8423
8	10	35	31.0150	11.6092	12.5315	25.2747
11	10	30	26.6229	13.6836	12.0465	10.0000
13	12	40	19.5116	36.5087	17.2714	12.0000
Total Generation (MW)			231.7594	245.8049	259.4791	233.4981
Total Load (MW)			189.2			

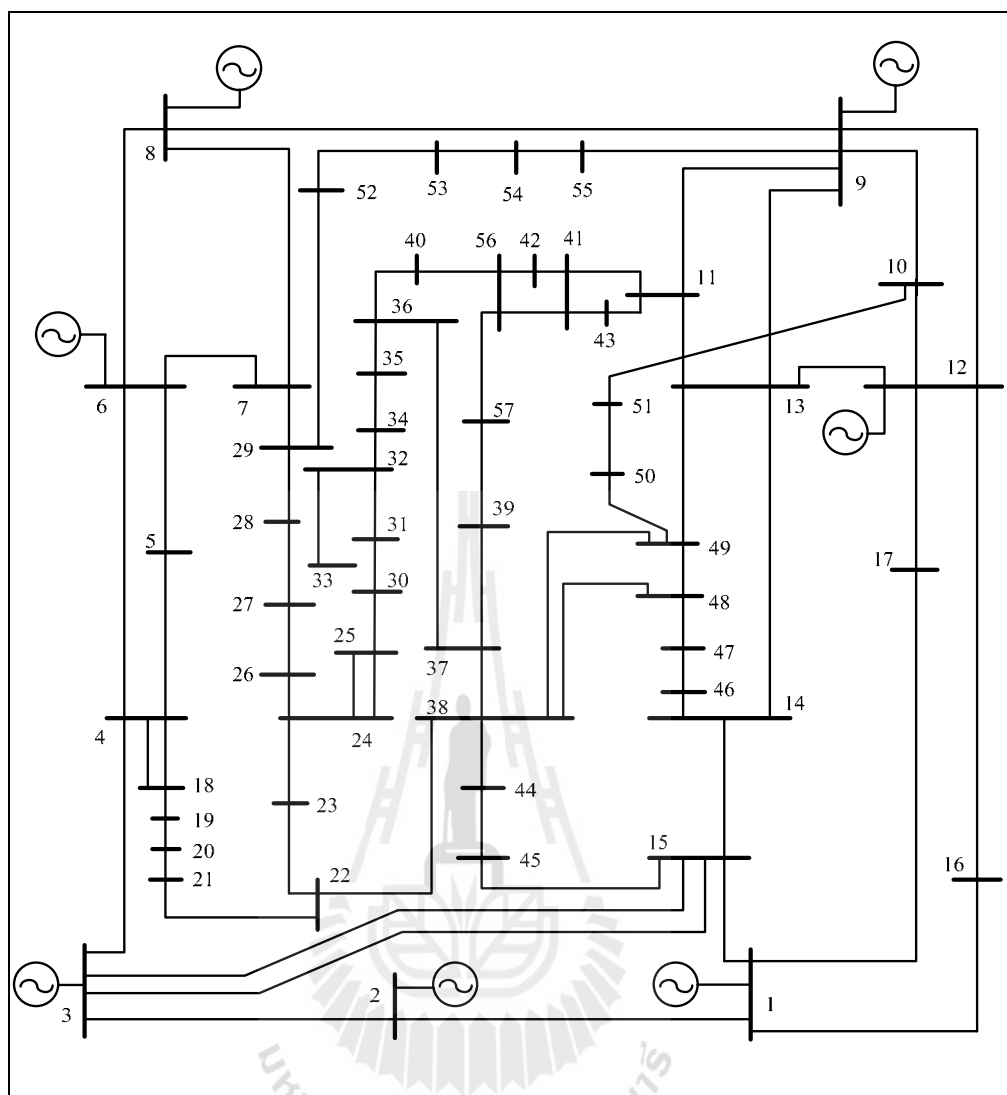


รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.5 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคมีการลู่เข้าเร็วที่สุด ตามด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีคล้ายนิวตันและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.12 ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำกว่าวิธีอื่น รองลงมาคือ ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีจินเนติกอัลกอริทึมและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ ใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จากตารางที่ 5.13 แสดงกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นกำลังงานเอาต์พุตอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่ากำลังงานเอาต์พุตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีค่าต่ำที่สุด รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีค่าสูงที่สุด และจากรูปที่ 5.9 แสดงขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ แต่ขนาดแรงดันบัสโดยส่วนใหญ่ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคมีค่าสูงกว่าวิธีอื่น

5.3.4 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์หนึ่งฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง รูปแบบสมการดังสมการที่ (5.3) ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส แสดงดังรูปที่ 5.10 ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 135 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 7 ตัว ระบบทดสอบนี้มีตัวแปรที่ควบคุมทั้งหมด 3 ชนิด คือ กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าเทปหม้อแปลง ขนาดแรงดันบัสควบคุม ค่าสัมประสิทธิ์ของต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถทำงานได้ของระบบทดสอบนี้ กำหนดดังตารางที่ 5.14 รายละเอียดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 5.10 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

ตารางที่ 5.14 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง		
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	a	b	c
1	20	300	105	2.45	0.0150
2	10	150	90.5	3.25	0.0225
3	25	100	44.4	3.89	0.0175
6	15	300	50.5	2.75	0.0155
8	15	200	95	2.85	0.0210
9	20	200	120	3.4	0.0185
12	10	250	40.6	3.51	0.0130

หมายเหตุ : ขอบเขตของขนาดแรงดัน กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

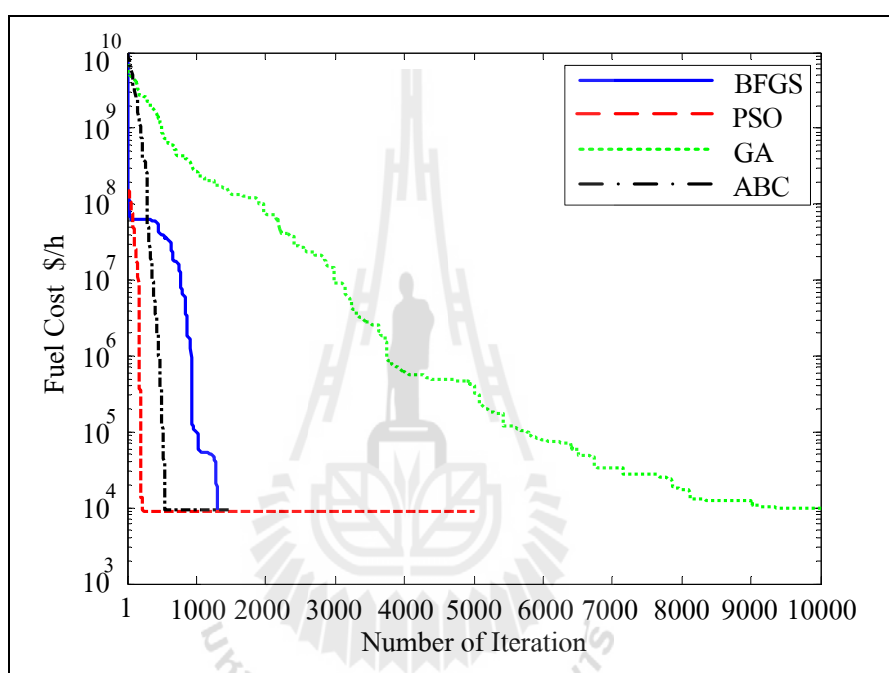
ขอบเขตของค่าแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลง กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

การทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส เมื่อใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 แต่สำหรับระเบียบวิธีคล้ายนิวตันกำหนดให้ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้มีค่าน้อยกว่า 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^{10}$	Iteration = 10000	Iteration = 5000	Iteration = 1500
Default	Population size = 30	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง ทุกวิธีหาค่าตอบทั้ง 30 ครั้ง ยกเว้นระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีการหาค่าตอบเพียง 25 ครั้ง การหาค่าตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.11 ค่าเชื้อเพลิงดังตารางที่ 5.16 และกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดดังตารางที่ 5.17 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.12



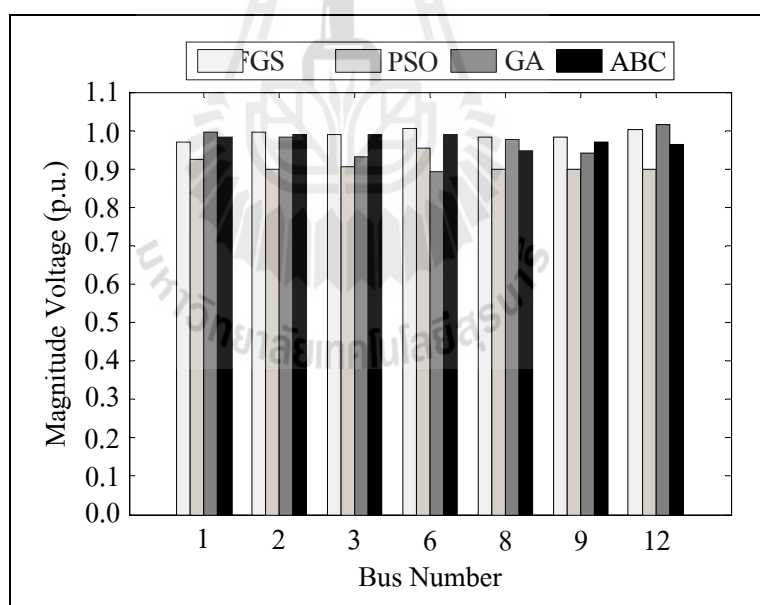
รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบการหาค่าตอบของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

ตารางที่ 5.16 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

วิธี	ค่าเชื้อเพลิง (\$/h)				เวลาการคำนวณเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน-มาตรฐาน	
BFGS	8938.0000	15243.0000	10168.0800	1511.5919	1040.1240
PSO	9063.2000	10108.0000	9437.0000	221.6625	271.5082
GA	9422.0000	11624.0000	10268.0000	452.4591	1418.8000
ABC	9254.2000	10562.0000	10006.0000	343.4083	234.9953

ตารางที่ 5.17 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด (MW)			
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	BFGS	PSO	GA	ABC
1	20	300	297.9809	71.5326	290.9263	300.0000
2	10	150	150.0000	149.9971	142.2501	130.2081
3	25	100	99.8890	99.9528	95.0227	100.0000
6	15	300	161.1496	299.9803	195.6763	199.6136
8	15	200	153.3258	199.9975	194.9341	196.2707
9	20	200	199.9999	192.6666	195.9033	200.0000
12	10	250	224.4631	249.9962	235.5764	208.8033
Total Generation (MW)			1286.8083	1264.1231	1350.2892	1334.896
Total Load (MW)			1250.8			



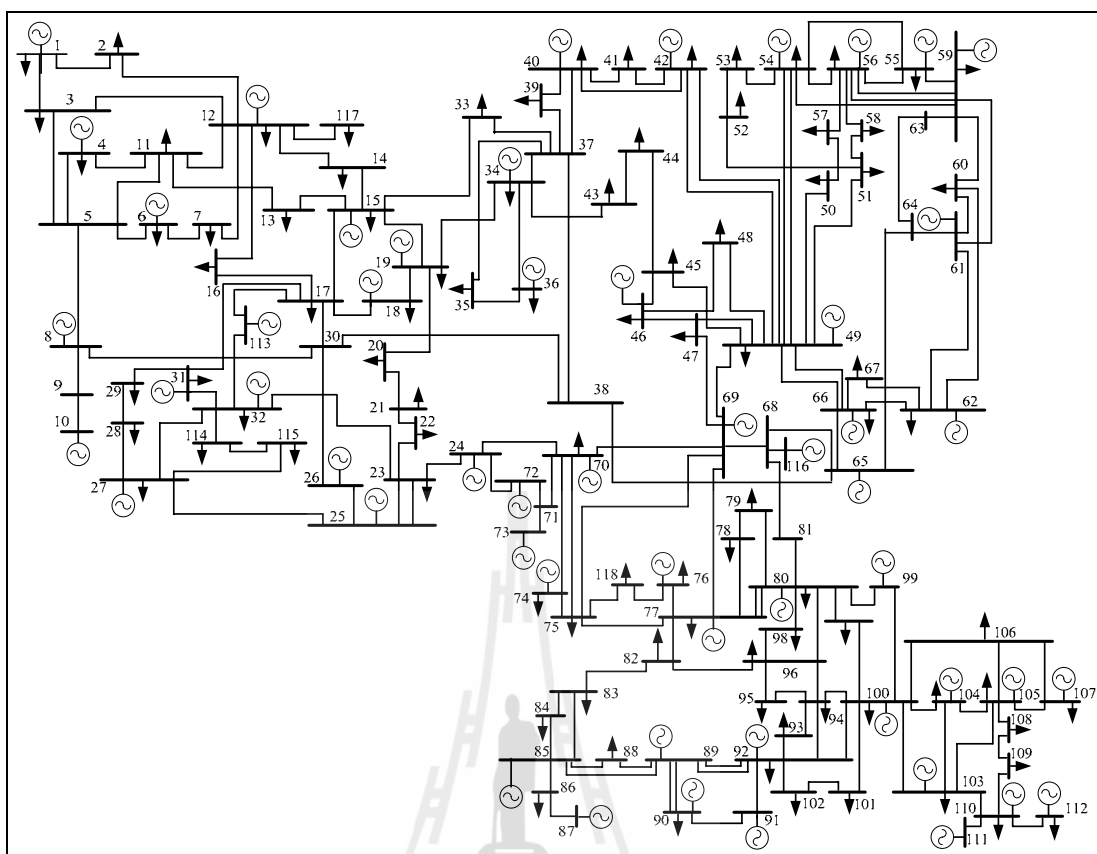
รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.11 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดใกล้เคียงกัน โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคมีการลู่เข้าเร็วที่สุด ตามด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้ง

ประดิษฐ์ วิธีคล้ายนิวตันและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.16 ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำกว่าวิธีอื่น รองลงมา คือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์และวิธีจินเนติกอัลกอริทึม พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีจินเนติกอัลกอริทึมและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จากตารางที่ 5.17 แสดงกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นกำลังงานเอาต์พุตอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่ากำลังงานเอาต์พุตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคมีค่าต่ำที่สุด รองลงมา คือ ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์และวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีค่าสูงที่สุด จากรูปที่ 5.12 แสดงขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ และใกล้เคียง 1 p.u. แต่วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคขนาดแรงดันที่ค่อนข้างต่ำ

5.3.5 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส

การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์หนึ่งฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง รูปแบบสมการดังสมการที่ (5.3) ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส แสดงดังรูปที่ 5.13 ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 135 kV ที่กำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 54 ตัว ระบบทดสอบนี้มีตัวแปรที่ควบคุมทั้งหมด 3 ชนิด คือ กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าเทปหม้อแปลง ขนาดแรงดันบัสควบคุม ค่าสัมประสิทธิ์ของต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถทำงานได้ของระบบทดสอบนี้ กำหนดดังตารางที่ 5.18 รายละเอียดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 5.13 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส

ตารางที่ 5.18 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง		
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	a	b	c
1	5	30	0.0187	1.2000	55
4	5	30	0.0275	2.1750	35
6	5	30	0.0500	2.1250	30
8	5	30	0.0417	2.2250	80
10	150	500	0.0135	3.1430	125
12	100	300	0.0125	3.1250	60
15	10	30	0.0276	2.1950	54
18	25	100	0.0220	2.2200	45

ตารางที่ 5.18 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง		
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	a	b	c
19	5	30	0.0318	2.1250	36
24	5	30	0.0125	2.1300	90
25	100	300	0.0365	2.2300	83
26	100	350	0.0156	3.1430	44
27	8	30	0.0333	3.1400	120
31	8	30	0.0225	3.1550	66
32	25	100	0.0350	2.1600	82
34	8	30	0.0125	3.1450	44
36	25	100	0.0225	3.1270	35
40	8	30	0.0165	2.1520	60
42	8	30	0.0175	2.1750	35
46	25	100	0.0450	1.1250	30
49	50	250	0.0315	1.2250	35
54	50	250	0.0225	2.1430	40
55	25	100	0.0135	2.1250	75
56	25	100	0.0276	1.1950	54
59	50	200	0.0220	1.2200	80
61	50	200	0.0318	2.1500	60
62	25	100	0.0125	2.1000	90
65	100	420	0.0365	3.2300	83
66	100	420	0.0156	2.1450	50
69	80	300	0.0352	1.5400	110
70	30	80	0.0525	2.1550	75
72	10	30	0.0350	2.1600	82
73	5	20	0.0125	2.1440	95

ตารางที่ 5.18 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง		
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	a	b	c
74	5	20	0.0213	1.7700	50
76	25	100	0.0187	2.2300	135
77	25	100	0.0275	2.1750	65
80	150	500	0.0325	2.1250	70
85	10	30	0.0417	2.2250	50
87	200	650	0.0125	1.1540	115
89	150	500	0.0125	1.7250	75
90	8	20	0.0276	2.1950	70
91	20	50	0.0220	1.2500	65
92	100	300	0.0318	2.1250	100
99	100	300	0.0125	2.1350	90
100	100	300	0.0365	2.2300	83
103	8	20	0.0175	2.1250	70
104	25	100	0.0335	3.1450	120
105	25	100	0.0225	3.1550	80
107	8	20	0.0350	1.8600	55
110	25	50	0.0125	2.1450	45
111	25	100	0.0225	2.4500	35
112	25	100	0.0135	2.1600	85
113	25	100	0.0125	2.1550	40
116	25	50	0.0115	2.4500	65

หมายเหตุ : ขอบเขตของขนาดแรงดัน กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

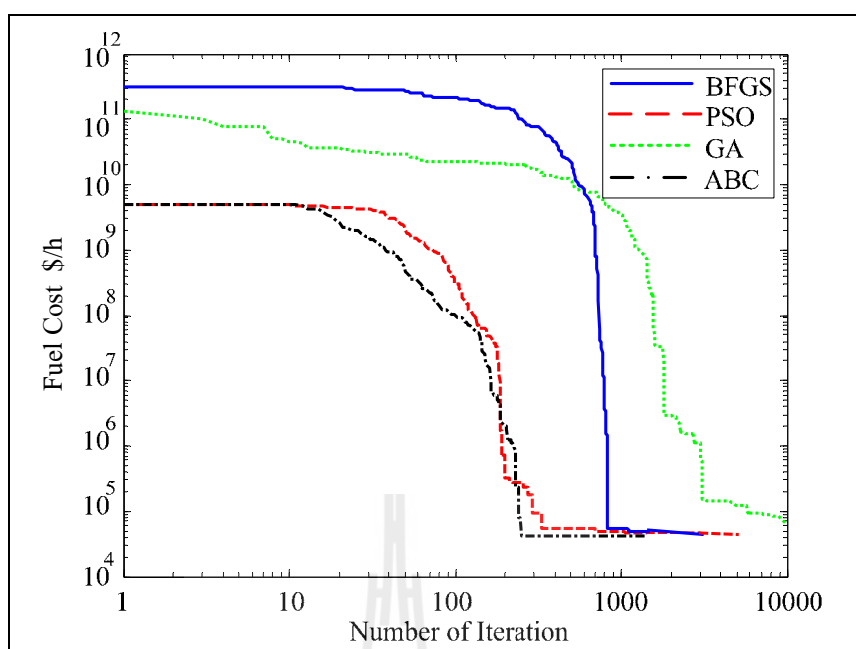
ขอบเขตของค่าเทียบหม้อแปลง กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

การทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส เมื่อใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 ยกเว้นระเบียบวิธีคล้ายนิวตันที่ค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าน้อยกว่า 10^{-10} และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^6$	Iteration = 10000	Iteration = 5000	Iteration = 1500
Default	Population size = 90	Population size = 20	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 10	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง ทุกวิธีถูกรู้เข้าหาคำตอบทั้ง 30 ครั้ง ยกเว้นระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีการรู้เข้าหาคำตอบเพียง 12 ครั้ง การรู้เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.14 ค่าเชื้อเพลิงดังตารางที่ 5.20 และกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดดังตารางที่ 5.21 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส

ตารางที่ 5.20 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส

วิธี	ค่าเชื้อเพลิง (\$/h)				เวลาการคำนวณ เฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน- มาตรฐาน	
BFGS	46167	89080	63578.5455	14211.4862	19215.5000
PSO	44388	90166	69178.2927	13085.9220	1922.2375
GA	50365	89410	63755.4333	10331.6743	16667.4333
ABC	43885	56156	50424.1333	8534.8029	998.1711

ตารางที่ 5.21 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส

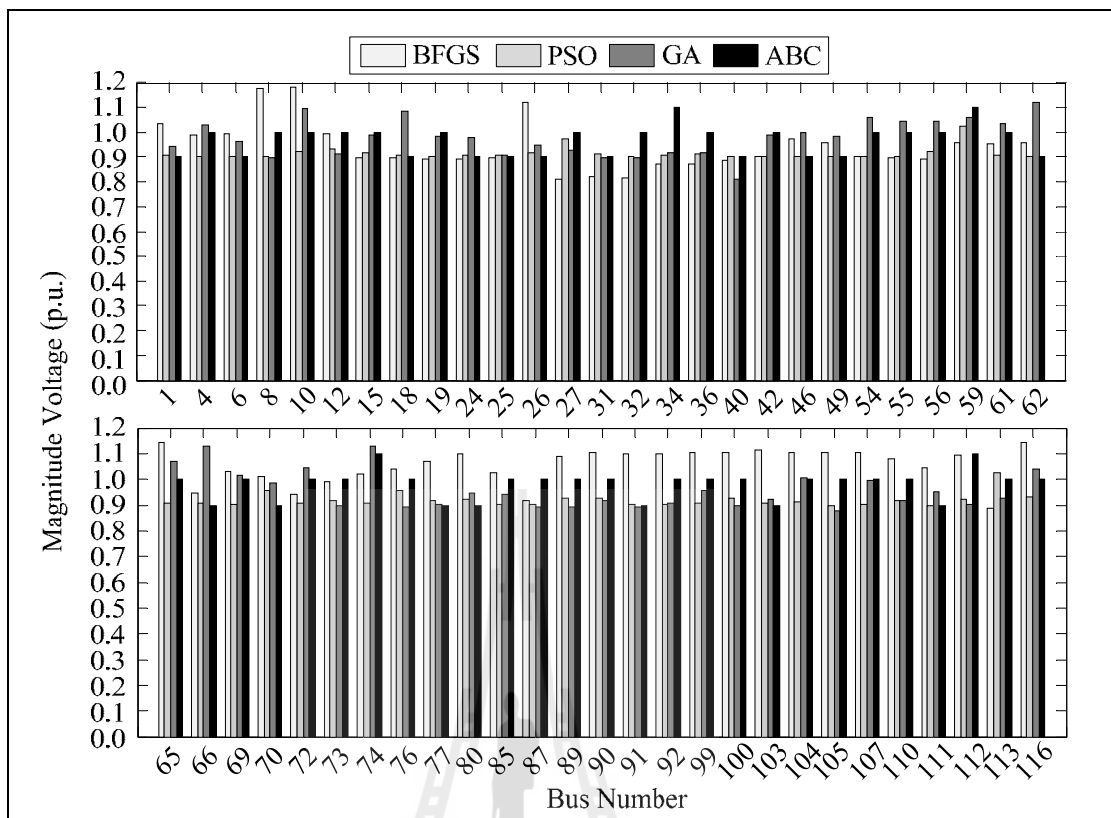
บัส	กำลังงานเอาต์พุต		กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด (MW)			
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	BFGS	PSO	GA	ABC
1	5	30	9.4000	21.6285	25.7247	5.0180
4	5	30	8.3000	9.1188	22.8824	5.0104
6	5	30	19.8000	11.0956	27.9832	5.6024

ตารางที่ 5.21 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด (MW)			
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	BFGS	PSO	GA	ABC
8	5	30	27.4000	23.9507	7.1229	5.2500
10	150	500	341.9000	320.2773	388.3207	429.0755
12	100	300	227.5000	269.3840	245.6153	193.2429
15	10	30	30.0000	16.7927	21.7406	10.0198
18	25	100	86.4000	27.0011	84.4360	38.1576
19	5	30	18.7000	11.1377	19.1789	6.1380
24	5	30	24.9000	20.9534	29.4770	5.1557
25	100	300	247.2000	238.9262	160.4308	102.5491
26	100	350	293.7000	257.1794	237.9644	349.6995
27	8	30	30.0000	18.7149	21.4504	10.3415
31	8	30	25.3000	9.0827	11.6374	28.7690
32	25	100	82.0000	66.0107	86.0655	99.8888
34	8	30	16.9000	14.4202	13.8489	23.8245
36	25	100	25.0000	80.6071	89.0706	51.7227
40	8	30	18.7000	9.9171	24.5312	8.8782
42	8	30	9.6000	7.9983	11.3907	9.5942
46	25	100	63.0000	26.2118	90.3110	28.9103
49	50	250	140.2000	177.0499	240.1166	75.7981
54	50	250	50.0000	116.7657	232.3928	91.9603
55	25	100	70.7000	53.6794	72.1043	26.8492
56	25	100	43.3000	27.0865	47.5535	28.8618
59	50	200	172.2000	71.7282	186.1124	59.0143
61	50	200	82.5000	86.0261	181.4056	63.6598
62	25	100	94.6000	84.1259	94.6010	90.7911
65	100	420	238.3000	237.1809	396.6095	103.4930
66	100	420	420.0000	246.8515	383.5674	376.7031
69	80	300	252.9000	282.5297	278.6976	152.4151

ตารางที่ 5.21 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

P_G	ค่าต่ำสุด (MW)	ค่าสูงสุด (MW)	กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด (MW)			
			BFGS	PSO	GA	ABC
70	30	80	40.7000	55.9401	79.0906	30.4487
72	10	30	15.2000	10.0139	29.1648	13.8533
73	5	20	18.2000	11.3816	11.8244	5.0904
74	5	20	12.1000	10.7879	7.9468	17.0558
76	25	100	56.6000	40.9969	44.5779	25.0809
77	25	100	100.0000	45.5125	94.0251	25.1317
80	150	500	216.3000	295.7033	257.0482	458.7402
85	10	30	29.0000	20.9529	28.6561	10.1563
87	200	650	443.5000	486.9172	237.1349	202.0131
89	150	500	488.9000	358.9955	452.8559	469.9277
90	8	20	20.0000	8.2004	12.3067	9.6118
91	20	50	21.4000	28.7786	34.7194	22.2673
92	100	300	255.5000	264.4145	217.7367	106.1516
99	100	300	274.4000	191.8326	131.7235	280.6127
100	100	300	300.0000	120.2575	274.3755	100.0618
103	8	20	19.8000	9.5491	17.7208	14.1967
104	25	100	25.0000	47.2729	68.4946	28.9349
105	25	100	30.3000	57.0908	96.9900	97.0010
107	8	20	8.0000	8.0210	15.4392	8.3343
110	25	50	25.0000	39.8349	25.1939	25.3297
111	25	100	89.7000	74.8774	84.0709	99.6363
112	25	100	72.2000	68.1635	98.8938	27.4191
113	25	100	86.7000	35.7836	98.4316	99.8111
116	25	50	30.9000	46.3513	41.5467	25.3787
Total Generation (MW)			5849.8	5181.0619	6192.3113	4688.639
Total Load (MW)			4242			



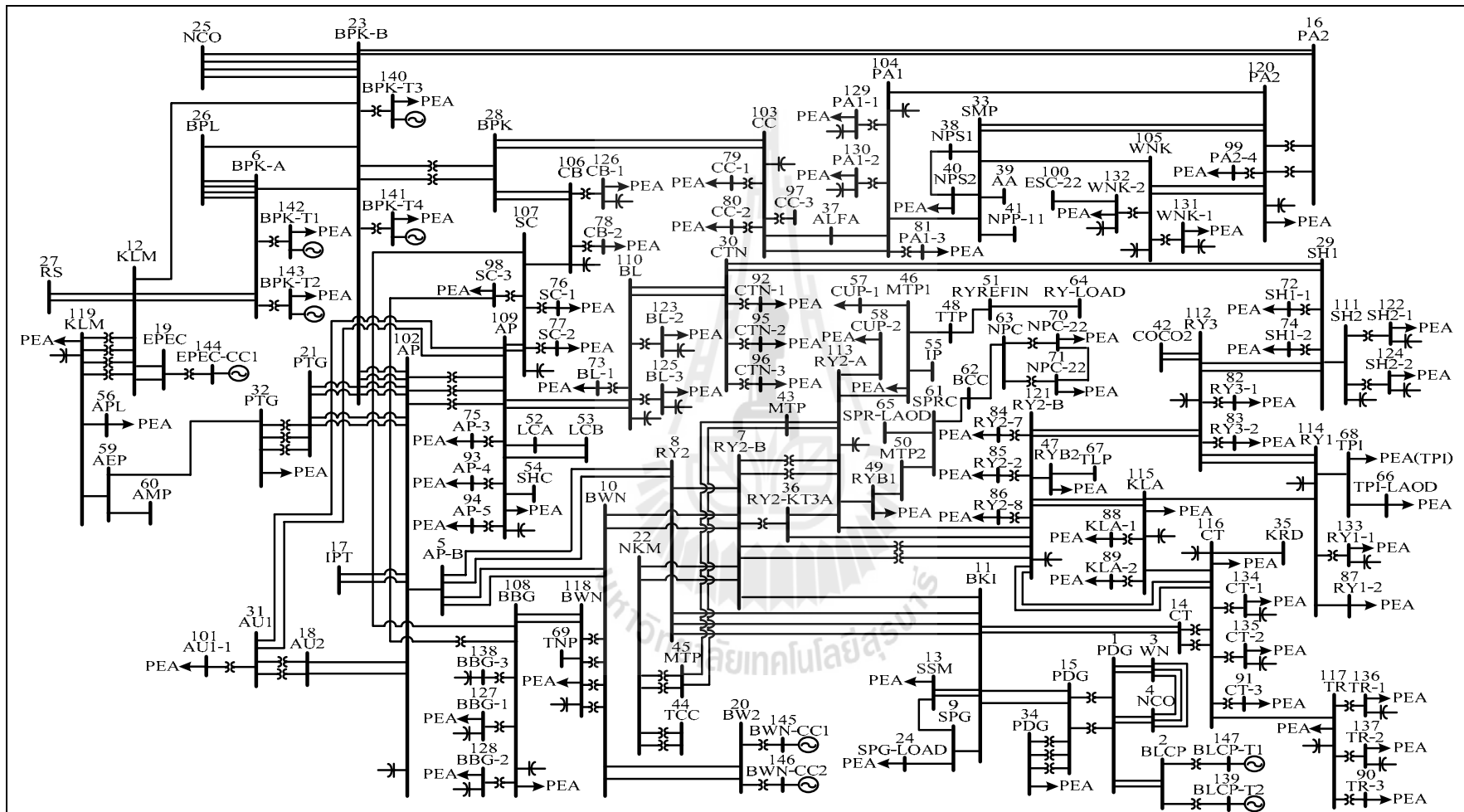
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.14 เปรียบเทียบการเข้าสู่ของคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละวิธี พบว่าการเข้าสู่ของคำตอบที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน แต่วิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีคำตอบที่สูงกว่าวิธีอื่น โดยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีการเข้าสู่เร็วที่สุด ตามด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.20 ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำกว่าวิธีอื่น รองลงมา คือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค วิธีจินเนติกอัลกอริทึมและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน จากตารางที่ 5.21 แสดงกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นกำลังงานเอาต์พุตอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่ากำลังงานเอาต์พุตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าต่ำที่สุด

รองลงมา คือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันและวิธีจินเนติก อัลกอริทึมมีค่าสูงที่สุด จากรูปที่ 5.15 แสดงขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ และใกล้เคียง 1 p.u. ในทุกบัส ยกเว้นระเบียบวิธีคล้ายนิวตันที่ขนาดแรงดันไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ในบางบัส

5.3.6 ระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส

ระบบทดสอบนี้เป็นระบบไฟฟ้าในประเทศไทยซึ่งใช้ระบบไฟฟ้าของส่วนพื้นที่ภาคกลางตะวันออก โดยระบบที่นำมาทดสอบนั้นเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ประกอบด้วยจำนวนบัส 147 บัส มีค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 300 kVA มีสายส่งจำนวน 245 เส้น มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ 9 บัส มีตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 37 ตัว และหม้อแปลง 94 ตัว แสดงดังรูปที่ 5.16 ระบบทดสอบนี้มีตัวแปรที่ควบคุมทั้งหมด 3 ชนิด คือ กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าเทปหม้อแปลง ขนาดแรงดันบัสควบคุม การแก้ปัญหาค่าโหลดของกำลังไฟฟ้าพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์หนึ่งฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง รูปแบบสมการดังสมการที่ (5.3) ค่าสัมประสิทธิ์ของต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถทำงานได้ของระบบทดสอบนี้ กำหนดดังตารางที่ 5.22 รายละเอียดของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 5.16 ระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส

ตารางที่ 5.22 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง		
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	a	b	c
139	300	717	36	2.1250	0.0318
140	240	600	35	2.1750	0.0275
141	240	600	35	2.1750	0.0275
142	220	550	35	3.1270	0.0225
143	220	550	35	3.1270	0.0225
144	200	350	30	2.1250	0.0500
145	210	356.5	30	1.1250	0.0450
146	210	356.5	30	1.1250	0.0450
147	300	717	36	2.1250	0.0318

หมายเหตุ : ขอบเขตของขนาดแรงดัน กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

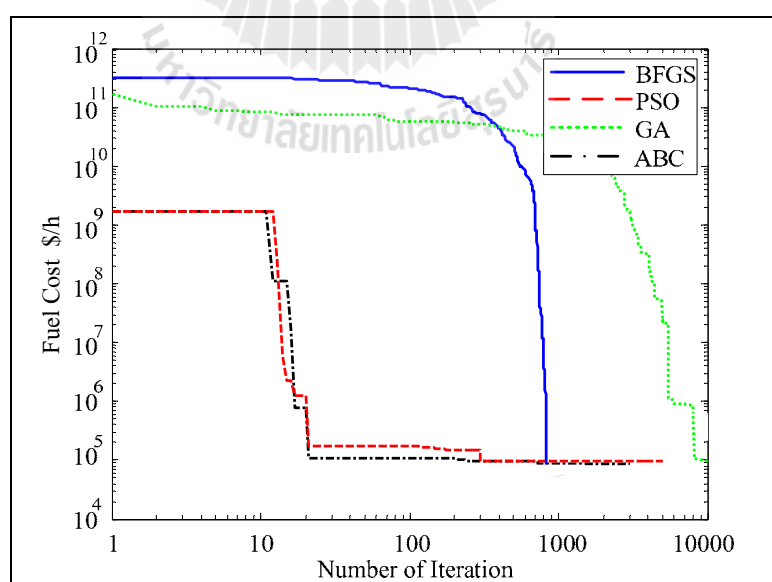
ขอบเขตของค่าแท็บหม้อแปลง กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

การทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส เมื่อใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 แต่สำหรับระเบียบวิธีคล้ายนิวตันกำหนดให้ ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้มีค่าน้อยกว่า 0.0000001 ยกเว้นระเบียบวิธีคล้ายนิวตันที่ค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าน้อยกว่า 10^{-10} และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.23

ตารางที่ 5.23 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลาง
ตะวันออกขนาด 147 บัส

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^6$	Iteration = 10000	Iteration = 5000	Iteration = 3000
Default	Population size = 90	Population size = 20	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 10	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%	-	-

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง แต่ละวิธีมีจำนวนครั้งในการลู่เข้าหาคำตอบทั้ง 30 ครั้ง ดังนี้ ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน มีการลู่เข้าหาคำตอบ 14 ครั้ง วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคมีการลู่เข้าหาคำตอบ 27 ครั้ง วิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่เข้าหาคำตอบ 29 ครั้ง ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีการลู่เข้าหาคำตอบ ทั้ง 30 ครั้ง การลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.17 ค่าเชื้อเพลิงดังตารางที่ 5.24 และกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.25 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลาง
ตะวันออกขนาด 147 บัส

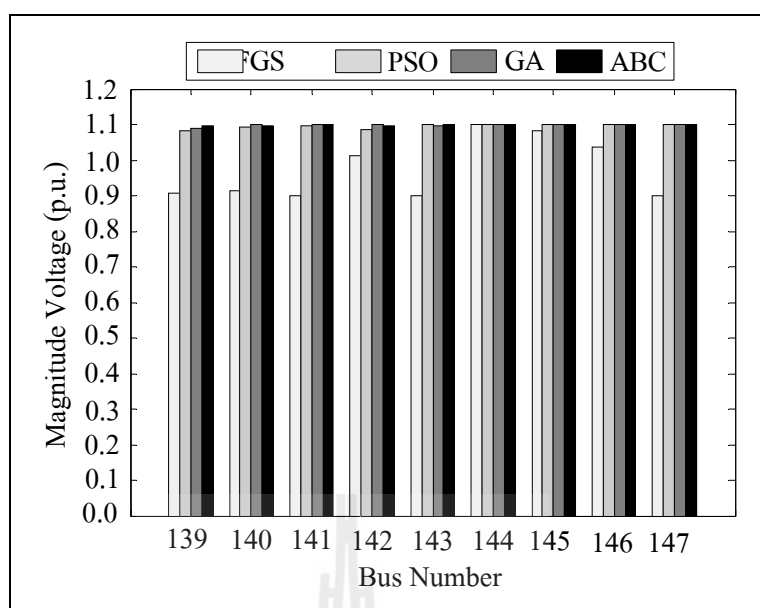
ตารางที่ 5.24 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส

วิธี	ค่าเชื้อเพลิง (\$/h)				เวลาการคำนวณ เฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน- มาตรฐาน	
BFGS	88608.3266	195932.5821	108413.2575	32408.1788	23514.1429
PSO	88027.0000	112596.0000	94764.9655	4449.4701	5889.3031
GA	88276.2162	105010.8505	93424.6573	4452.8444	19515.4815
ABC	86986.3875	96808.8558	92275.3550	2683.2750	3536.3833

หมายเหตุ : อัตราแลกเปลี่ยนเงินบาทต่อดอลลาร์ U.S.A เท่ากับ 30.81 บาท ต่อ 1 ดอลลาร์ U.S.A
ณ วันที่ 19 ตุลาคม พ.ศ. 2554 เวลา 17.08 น. (อ้างอิงจาก ธนาคารกรุงศรี)

ตารางที่ 5.25 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด (MW)			
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	BFGS	PSO	GA	ABC
139	300	717	715.2982	716.4611	711.4665	712.8581
140	240	600	599.9936	598.3085	599.9868	558.6376
141	240	600	599.8262	599.9616	587.3794	599.6881
142	220	550	549.5840	547.2088	547.1472	409.4264
143	220	550	526.4719	529.2513	549.1110	549.6331
144	200	350	348.6637	347.2354	347.8239	325.1350
145	210	356.5	356.3224	352.3929	355.3524	356.4019
146	210	356.5	356.4134	355.8136	355.8864	343.3854
147	300	717	650.8712	619.6422	639.2363	707.0082
Total Generation (MW)			4703.4446	4666.2752	4693.3898	4562.1736
Total Load (MW)			4189.7			



รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.17 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดใกล้เคียงกัน โดยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีการลู่เข้าเร็วที่สุด ตามด้วย วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค วิธีคล้ายนิวตันและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.24 ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำกว่าวิธีอื่น รองลงมาคือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค วิธีจินเนติกอัลกอริทึมและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมาคือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาควิธี จินเนติกอัลกอริทึมและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค วิธีจินเนติกอัลกอริทึมและระเบียบวิธีคล้ายนิวตันจากตารางที่ 5.25 แสดงกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นกำลังงานเอาต์พุตอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่ากำลังงานเอาต์พุตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าต่ำที่สุด รองลงมา คือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค วิธีจินเนติกอัลกอริทึมและระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีค่าสูงที่สุด จากรูปที่ 5.18 แสดงขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ และใกล้เคียง 1 p.u. แต่ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีขนาดแรงดันที่ค่อนข้างต่ำ

5.4 การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดที่มีฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดที่มีฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นนี้ ทำการทดสอบกับระบบทดสอบ 3 ระบบ คือ ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE ขนาด 6 บัส 14 บัส และ 30 บัส ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในที่นี่จะใช้ตัวแปรตามที่ได้นิยามไว้ในบทที่ 3

1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในที่นี้ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ คือ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น รูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในที่นี่จะอยู่ในรูป $f(x) = a + bx + cx^2 + e|\sin f(x^{\min} - x)|$ ดังแสดงในสมการที่ (5.11)

$$F_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{G,i})$$

$$F_i(P_{G,i}) = a_i + b_i P_{G,i} + c_i P_{G,i}^2 + e_i |\sin f(P_{G,i}^{\min} - P_{G,i})| \quad (5.11)$$

เมื่อ a_i, b_i, c_i, e_i และ f_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ i

เงื่อนไขบังคับสมการ เงื่อนไขบังคับอสมการ เงื่อนไขบังคับของตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้าขนาน เงื่อนไขบังคับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเงื่อนไขบังคับของหม้อแปลง นิยามเช่นเดียวกับการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดโดยฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

5.4.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส

พิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงที่ไม่เป็นเชิงเส้น รูปแบบสมการดังสมการที่ (5.11) ระบบทดสอบนี้มีตัวแปรที่ควบคุมเช่นเดียวกับการทดสอบโดยใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถทำงานได้ของระบบทดสอบนี้ ดังตารางที่ 5.26

ตารางที่ 5.26 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง				
	$P_{min}(MW)$	$P_{max}(MW)$	a	b	c	d	e
1	50	200	0.0016	2.0000	150	50	0.0630
2	20	80	0.0100	2.5000	25	40	0.0980

หมายเหตุ : ขอบเขตของขนาดแรงดัน กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

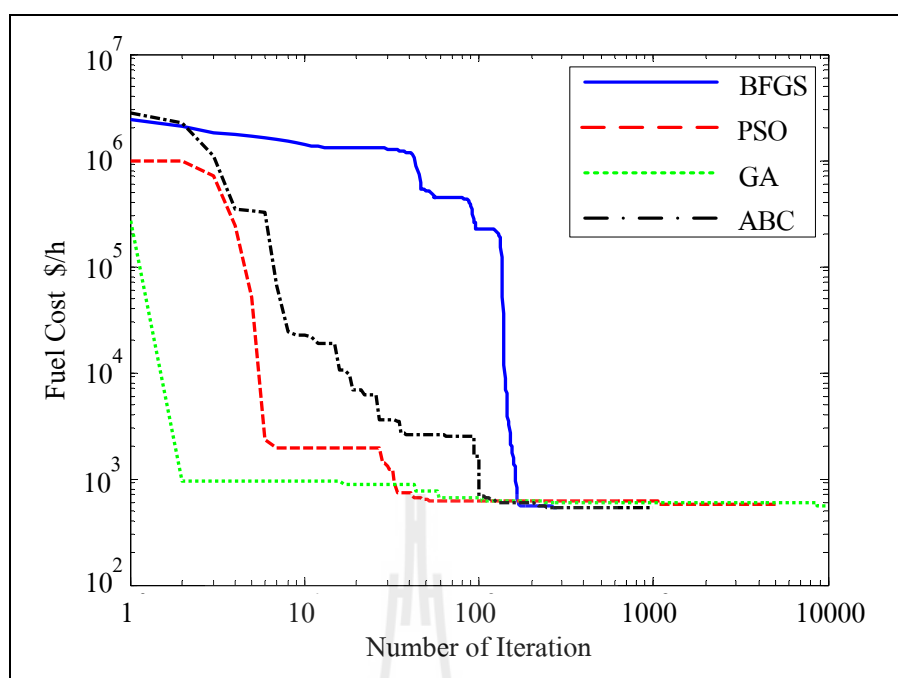
ขอบเขตของค่าเทียบหม้อแปลง กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

การทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส เมื่อใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.27

ตารางที่ 5.27 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^6$	Iteration = 10000	Iteration = 5000	Iteration = 1000
Default	Population size = 30	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง แต่ละวิธีหาค่าตอบทั้ง 30 ครั้ง การหาค่าที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.19 ค่าเชื้อเพลิงดังตารางที่ 5.8 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดดังตารางที่ 5.29 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.20



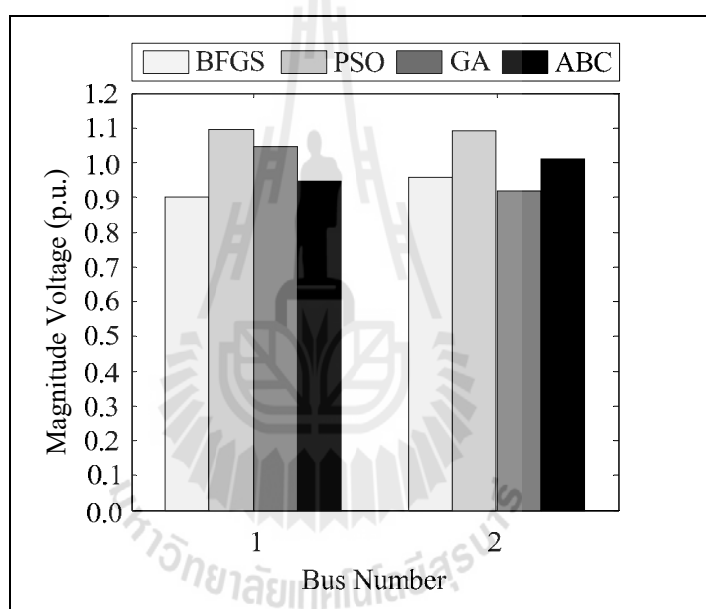
รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบการลู่เข้าของค่าตอบของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 5.28 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

วิธี	ค่าเชื้อเพลิง (\$/h)				เวลาการคำนวณ เฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
BFGS	523.9852	662.3799	576.7023	34.4387	1.8217
PSO	549.5419	714.1646	639.2568	42.3330	42.9922
GA	546.1901	725.8822	605.0125	46.7529	64.2757
ABC	526.1690	594.5960	555.5290	18.1600	5.7443

ตารางที่ 5.29 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้γκันไม่เป็นเชิงเส้น

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด (MW)			
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	BFGS	PSO	GA	ABC
1	50	200	115.7335	100.7476	119.4964	116.2696
2	20	80	20.0000	38.8522	21.1816	20.0000
Total Generation (MW)			135.7335	139.5998	140.678	136.2696
Total Load (MW)			135			



รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้γκันไม่เป็นเชิงเส้น

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.19 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่าการลู่เข้าหาคำตอบที่ใกล้เคียงกัน โดยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่เข้าเร็วที่สุด ตามด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ ส่วนระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีการลู่เข้าช้าที่สุด เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.28 ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำกว่าวิธีอื่น รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะสม

ที่สุดของฝูงอนุภาค พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จากตารางที่ 5.29 แสดงกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นกำลังงานเอาต์พุตอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่ากำลังงานเอาต์พุตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน มีค่าต่ำที่สุด รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีค่าสูงที่สุด จากรูปที่ 5.20 แสดงขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ แต่วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคมีขนาดแรงดันที่ค่อนข้างสูงกว่า 1.0 p.u. ในทุกบัส

5.4.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

พิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงที่ไม่เป็นเชิงเส้น รูปแบบสมการดังสมการที่ (5.11) ระบบทดสอบนี้มีตัวแปรที่ควบคุมเช่นเดียวกับการทดสอบโดยใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถทำงานได้ของระบบทดสอบนี้ ดังตารางที่ 5.30

ตารางที่ 5.30 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง				
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	a	b	c	d	e
1	50	200	150	2.00	0.00160	50	0.063
2	20	80	25	2.50	0.01000	40	0.098
3	15	50	55.0	2.75	0.0175	0	0
6	10	30	40.6	3.89	0.0130	0	0
8	10	35	75.0	2.85	0.0275	0	0

หมายเหตุ : ขอบเขตของขนาดแรงดัน กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

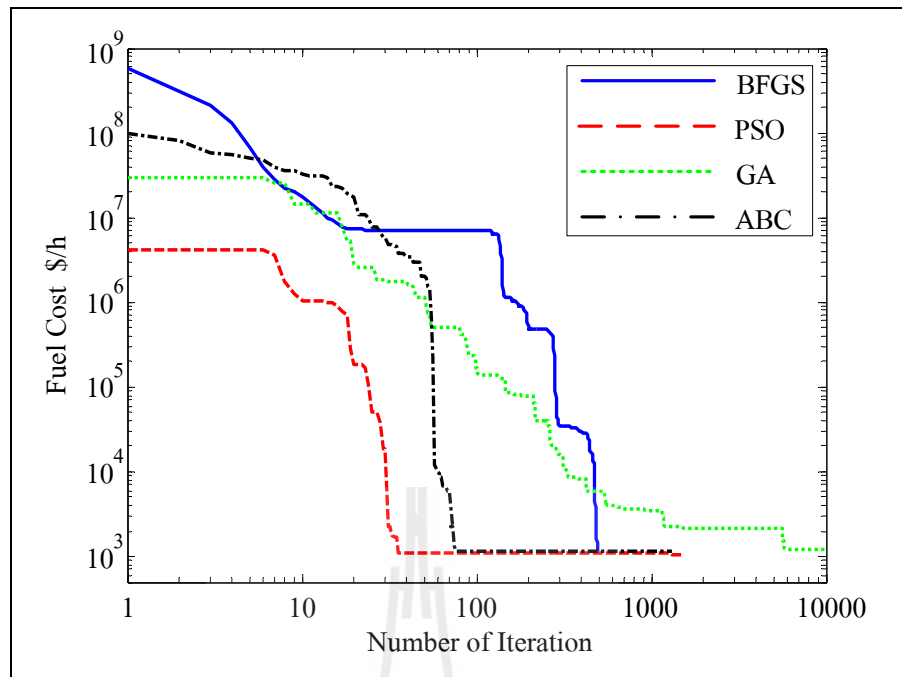
ขอบเขตของค่าเทียบหม้อแปลง กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

การทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส เมื่อใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.31

ตารางที่ 5.31 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^6$	Iteration = 10000	Iteration = 1500	Iteration = 1300
Default	Population size = 30	Population size = 20	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง แต่ละวิธีหาค่าตอบทั้ง 30 ครั้ง การหาค่าที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.21 ค่าเชื้อเพลิงดังตารางที่ 5.32 และกำลังงานแอคทีฟที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.33 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.22



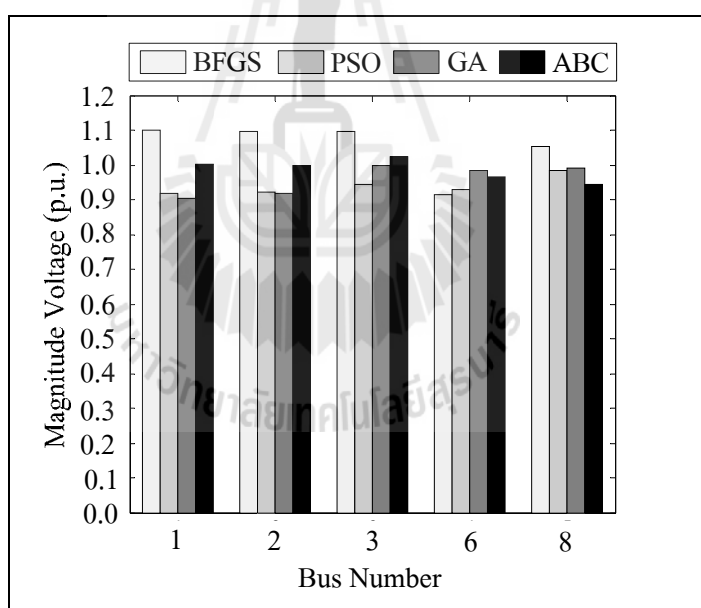
รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 5.32 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

วิธี	ค่าเชื้อเพลิง (\$/h)				เวลาการคำนวณเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	1116.3000	1399.7000	1225.9000	55.3235	10.5466
PSO	1050.6000	1398.5000	1186.8000	91.3760	22.0758
GA	1188.7000	1419.4000	1289.2000	57.3860	149.6503
ABC	1123.8000	1277.9000	1224.6000	38.0512	20.1900

ตารางที่ 5.33 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด (MW)			
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	BFGS	PSO	GA	ABC
1	50	200	144.8525	199.2905	150.7764	175.7472
2	20	80	47.1143	21.0977	52.1114	46.4024
3	15	50	22.9953	22.8756	38.0946	27.4803
6	10	30	30	10.9841	22.3208	17.8144
8	10	35	21.182	10.3731	32.2427	22.3706
Total Generation (MW)			266.1441	264.621	295.5459	289.8149
Total Load (MW)			259			



รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.21 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบที่ใกล้เคียงกัน โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคมีการลู่เข้าเร็วที่สุด ตามด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้ง

ประดิษฐ์ ส่วนวิธีคล้ายนิวตันและวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมมีการลู่ออกเข้าช้าที่สุด เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.32 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำกว่าวิธีอื่น รองลงมา คือ ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์และวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม จากตารางที่ 5.33 แสดงกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นกำลังงานเอาต์พุตอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่ากำลังงานเอาต์พุตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคมีค่าต่ำที่สุด รองลงมา คือ ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์และวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมมีค่าสูงที่สุด และจากรูปที่ 5.22 แสดงขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ แต่ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีขนาดแรงดันที่ค่อนข้างสูงกว่า 1.0 p.u ในบางบัส

5.4.3 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

พิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงที่ไม่เป็นเชิงเส้น รูปแบบสมการดังสมการที่ (5.11) ระบบทดสอบนี้มีตัวแปรที่ควบคุมเช่นเดียวกับการทดสอบโดยใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถทำงานได้ของระบบทดสอบนี้ ดังตารางที่ 5.34

ตารางที่ 5.34 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

บัส	กำลังงานเอาต์พุต (MW)		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง				
	$P_{min}(MW)$	$P_{max}(MW)$	a	b	c	d	e
1	50	200	150	2.00	0.00160	50	0.063
2	20	80	25	2.50	0.01000	40	0.098
5	15	50	0	1.00	0.06250	0	0
8	10	35	0	3.25	0.00834	0	0
11	10	30	0	3.00	0.02575	0	0

ตารางที่ 5.34 ค่าสัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและช่วงการผลิตกำลังงานเอาต์พุตของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น (ต่อ)

บัส	กำลังงานเอาต์พุต (MW)		สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิง				
	$P_{min}(MW)$	$P_{max}(MW)$	a	b	c	d	e
13	12	40	0	3.00	0.02500	0	0

หมายเหตุ : ขอบเขตของขนาดแรงดัน กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

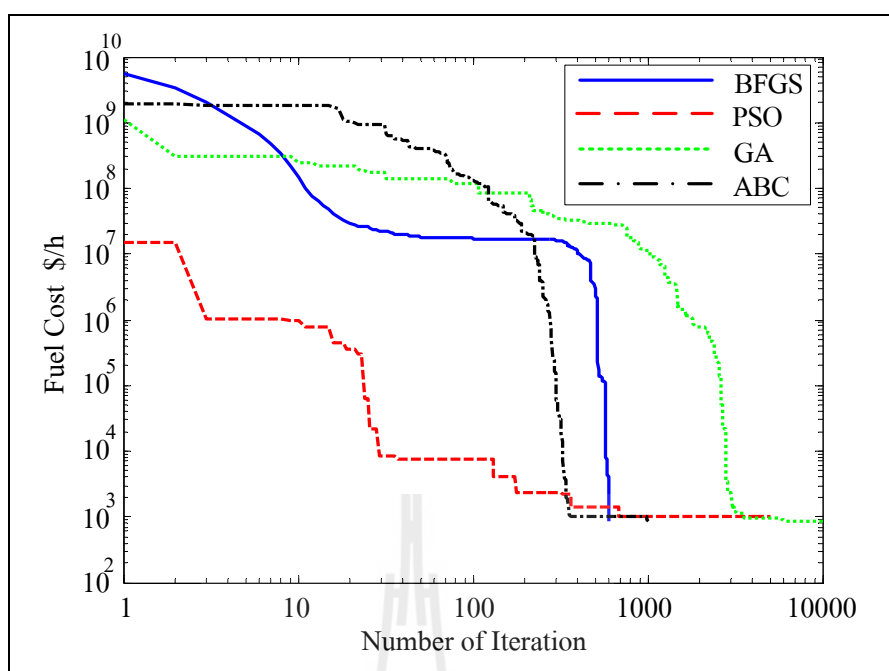
ขอบเขตของค่าเทียบหม้อแปลง กำหนดให้อยู่ในช่วง 0.9-1.1 p.u.

การทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส เมื่อใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.35

ตารางที่ 5.35 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน
IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^6$	Iteration = 10000	Iteration = 5000	Iteration = 1000
Default	Population size = 20	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง ทุกวิธีถูกลู่เข้าหาคำตอบทั้ง 30 ครั้ง ยกเว้นระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีการลู่ออกหาคำตอบเพียง 28 ครั้ง การลู่ออกของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.23 ค่าเชื้อเพลิงดังตารางที่ 5.36 และกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดดังตารางที่ 5.37 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.24



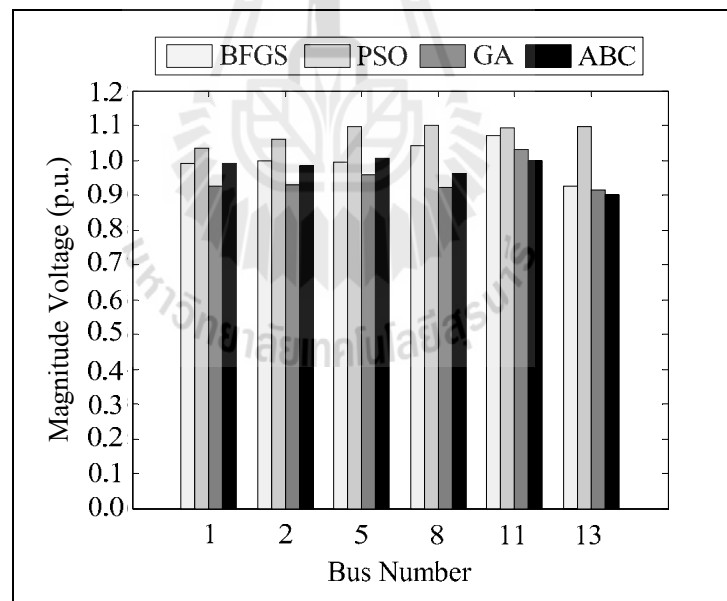
รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบการลู่เข้าของค่าตอบสำหรับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 5.36 ค่าเชื้อเพลิงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

วิธี	ค่าเชื้อเพลิง (\$/h)				เวลาการคำนวณเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	867.481	1916.146	1052.071	197.1305	74.3959
PSO	935.111	1336.4	1113.55	79.0433	111.403
GA	896.439	1197.65	1011.84	65.1912	304.322
ABC	869.924	1040.65	949.955	41.9977	48.7617

ตารางที่ 5.37 กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

บัส	กำลังงานเอาต์พุต		กำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด (MW)			
	$P_{G,min}(MW)$	$P_{G,max}(MW)$	BFGS	PSO	GA	ABC
1	50	200	99.4784	199.6609	191.7585	147.6852
2	20	80	43.1678	28.9722	20.1643	45.86
5	15	50	21.3947	15.9424	20.8005	19.0074
8	10	35	24.2518	15.7899	17.5075	10.8136
11	10	30	15.8294	12.3281	10.7609	11.8245
13	12	40	34.0849	12.5442	16.8242	32.1523
Total Generation (MW)			238.207	285.2377	277.8159	267.343
Total Load (MW)			259			

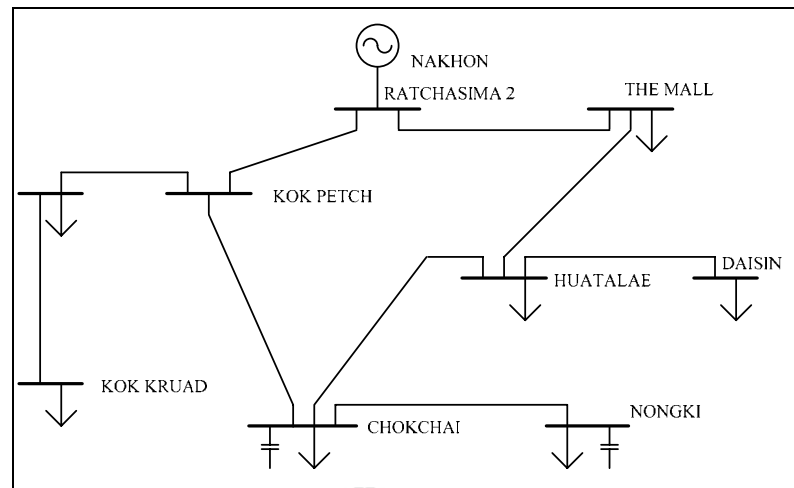


รูปที่ 5.24 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.23 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบที่ใกล้เคียงกัน แต่วิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่เข้าช้าที่สุด เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.36 ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำกว่าวิธีอื่น รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีจินเนติกอัลกอริทึมและวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จากตารางที่ 5.37 แสดงกำลังงานเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นกำลังงานเอาต์พุตอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่ากำลังงานเอาต์พุตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีค่าต่ำที่สุด รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีจินเนติกอัลกอริทึมและวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคมีค่าสูงที่สุด และจากรูปที่ 5.24 แสดงขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ แต่วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคมีขนาดแรงดันที่ค่อนข้างสูงกว่า 1.0 p.u. ในทุกบัส

5.5 การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

การเปรียบเทียบการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งทำการทดสอบกับระบบนครราชสีมา 2 ซึ่งเป็นระบบทดสอบ 9 บัส เป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV ที่กำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.25 ตัวแปร ต่าง ๆ ที่ใช้ในที่นี่จะใช้ตัวแปรตามที่ได้นิยามไว้ในบทที่ 3 ระบบทดสอบนี้มีตัวแปรที่ควบคุมทั้งหมด 2 ชนิด คือ ขนาดแรงดันบัสควบคุมและขนาดของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แบ่งกรณีศึกษาเป็น 6 กรณี ที่แตกต่างกันเพื่อพิจารณาผลการทดสอบที่เกิดขึ้น รายละเอียดของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 5.25 ระบบทดสอบนครราชสีมา 2

1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในที่นี้ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง รูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ ดังแสดงในสมการที่ (5.12)

$$F_{loss} = \sum_{i=1}^{N_L} g_{i,j} \{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad (5.12)$$

2) เงื่อนไขบังคับสมการ

เงื่อนไขบังคับสมการ ใช้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าในรูปพิกัดเชิงขั้ว ซึ่งแสดงไว้ในหัวข้อ 2.4

3) เงื่อนไขบังคับอสมการ

$$V_{G_i}^{\min} \leq V_{G_i} \leq V_{G_i}^{\max}, \quad i=1,2,3,\dots,N_G$$

$$Q_{C_i}^{\min} \leq Q_{C_i} \leq Q_{C_i}^{\max}, \quad i=1,2,3,\dots,N_C$$

5.5.1 กรณีที่ 1

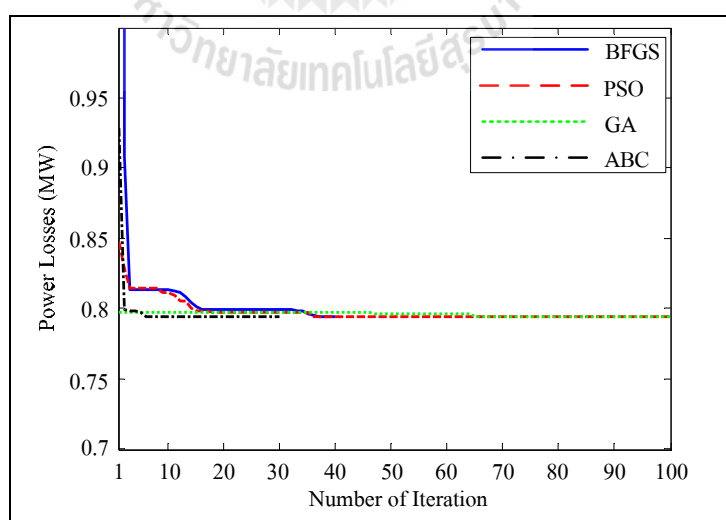
ทำการทดสอบการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเบื้องต้น เพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งที่ต่ำที่สุด ด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชัน

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธีดังตารางที่ 5.38

ตารางที่ 5.38 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 1

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^2$	Iteration =100	Iteration =100	Iteration =30
Default	Population size = 10	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง ทุกวิธีลู่เข้าหาคำตอบทั้ง 30 ครั้ง การลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.26 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งดังตารางที่ 5.39 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.40 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.27



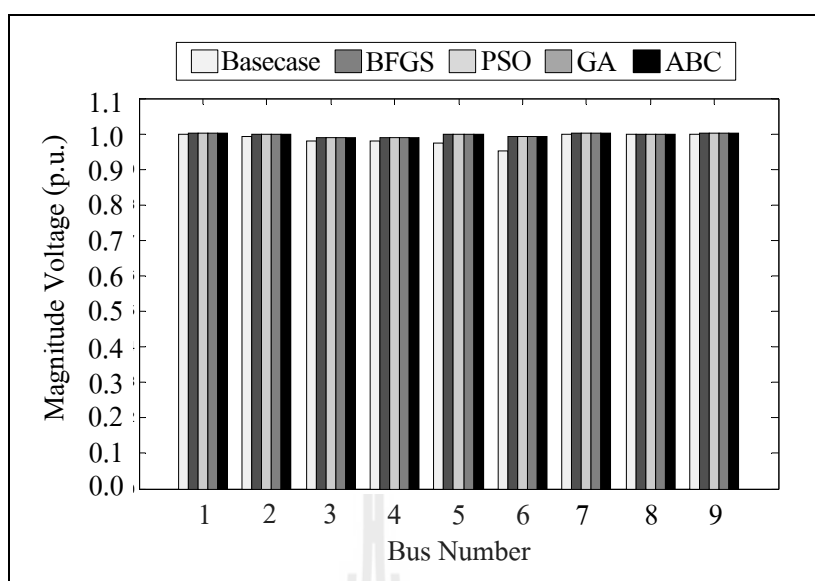
รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 1

ตารางที่ 5.39 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 กรณีที่ 1

ขั้นตอนวิธี	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง (MW)				เวลาการคำนวณ เฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน- มาตรฐาน	
BFGS	0.7942	0.8697	0.7988	0.0146	1.1930
PSO	0.7943	0.8171	0.7965	0.0040	6.0992
GA	0.7943	0.7975	0.7948	0.0008	5.5487
ABC	0.7942	0.7970	0.7944	0.0005	5.4576
Basecase	1.0128 MW				

ตารางที่ 5.40 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชัน
กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 1

ตัวแปรควบคุม	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด			
			BFGS	PSO	GA	ABC
$Q_{C1}(Mvar)$	0	50	23.1721	25.3163	23.5821	24.1473
$Q_{C2}(Mvar)$	0	50	19.3601	19.1312	19.8263	19.3730
$V_{NM2}(p.u.)$	0.9	1.1	1.0028	1.0023	1.0026	1.0025



รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2
โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 1

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.21 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบที่ใกล้เคียงกัน โดยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์และวิธีจินเนติกอัลกอริทึม มีการลู่เข้าเร็วที่สุด ตามด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.39 ทุกวิธีมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์และวิธีจินเนติกอัลกอริทึมใช้เวลาใกล้เคียงกัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคใช้เวลามากสุด จากตารางที่ 5.40 แสดงตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นตัวแปรควบคุมอยู่ในขอบเขตที่กำหนด และแรงดันบัสอ้างอิงมีค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. จากรูปที่ 5.27 แสดงขนาดแรงดันของบัสทุกบัส จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ และสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นหลังจากมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้

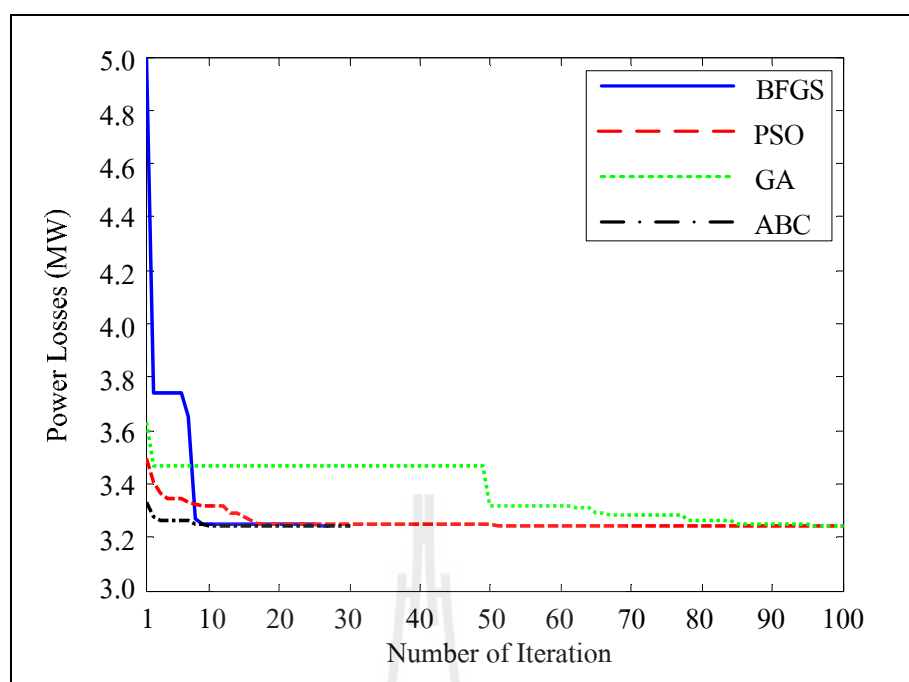
5.5.2 กรณีที่ 2

การทดสอบกรณีที่ 2 ได้ทำการเพิ่มโหลดในระบบทดสอบให้เพิ่มขึ้น 1 เท่า แต่ขนาดตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเท่าเดิม ทำการทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งที่ต่ำที่สุด ด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบ นครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.41

ตารางที่ 5.41 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 2

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^2$	Iteration =100	Iteration =100	Iteration =30
Default	Population size = 10	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง ทุกวิธีลู่เข้าหาคำตอบทั้ง 30 ครั้ง การลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.28 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งดังตารางที่ 5.42 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.43 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.29



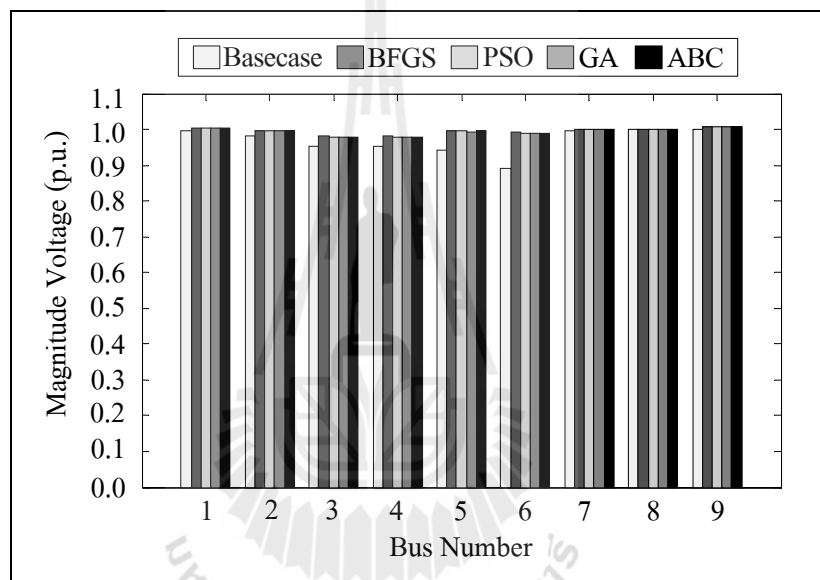
รูปที่ 5.28 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 2

ตารางที่ 5.42 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 กรณีที่ 2

ขั้นตอนวิธี	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง (MW)				เวลาการคำนวณเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	3.2436	4.0971	3.3721	0.1874	1.4935
PSO	3.2432	3.2471	3.2442	0.0010	5.9043
GA	3.2435	3.2521	3.2456	0.0020	6.3072
ABC	3.2432	3.2444	3.2433	0.0002	5.5251
Basecase	4.5015 MW				

ตารางที่ 5.43 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 2

ตัวแปรควบคุม	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด			
			BFGS	PSO	GA	ABC
$Q_{C1}(Mvar)$	0	50	50	49.9971	49.9657	50
$Q_{C2}(Mvar)$	0	50	44.1793	44.2812	43.9459	44.333
$V_{NM2}(p.u.)$	0.9	1.1	1.008	1.007	1.0066	1.0072



รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 2

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.28 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบที่ใกล้เคียงกัน แต่วิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่เข้าช้าที่สุด เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.42 ทุกวิธีมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึมใช้เวลาใกล้เคียงกันใช้

เวลามากสุด จากตารางที่ 5.43 แสดงตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นตัวแปรควบคุมอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแต่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส 1 ของทุกวิธีจะติดขอบบนของช่วงที่กำหนด แรงดันบัสอ้างอิงมีค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. จากรูปที่ 5.29 แสดงขนาดแรงดันของบัสทุกบัส จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ และสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นหลังจากมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้

5.5.3 กรณีที่ 3

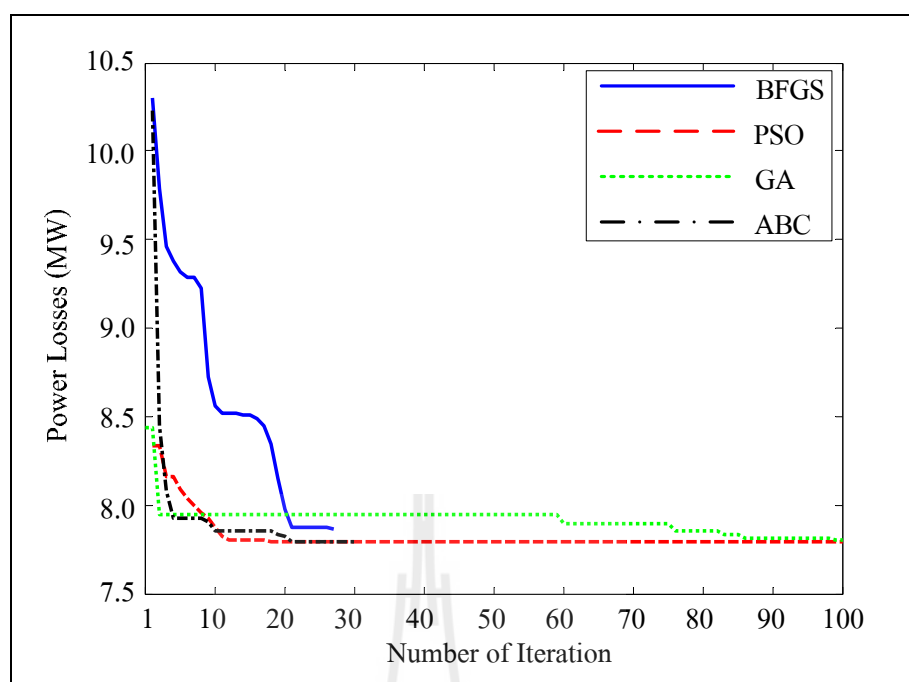
การทดสอบกรณีที่ 3 ได้ทำการเพิ่มโหลดในระบบทดสอบให้เพิ่มขึ้นอีก 2 เท่า แต่ขนาดตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเท่าเดิม ทำการทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งที่ต่ำที่สุด ด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบ นครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.44

ตารางที่ 5.44 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2

โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 3

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration $\leq 10^2$	Iteration =100	Iteration =100	Iteration =30
Default	Population size = 10	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง ทุกวิธีได้หาค่าตอบทั้ง 30 ครั้ง การดูเข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.30 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งดังตารางที่ 5.45 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.46 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.31



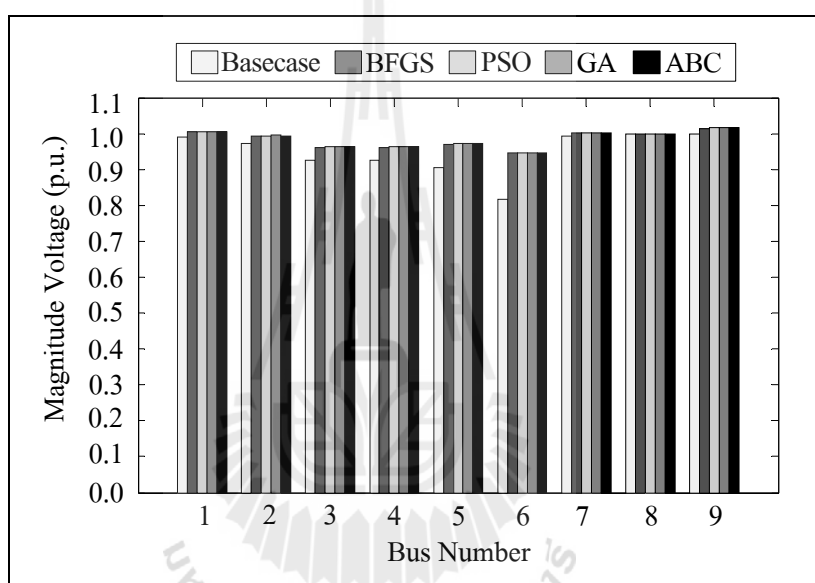
รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบการเข้าสู่ของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 3

ตารางที่ 5.45 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 กรณีที่ 3

ขั้นตอนวิธี	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง (MW)				เวลาการคำนวณเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	7.8231	11.6315	8.6966	0.9915	1.6670
PSO	7.7924	7.7974	7.7936	0.0015	6.2705
GA	7.7955	7.8772	7.8198	0.0232	6.8617
ABC	7.7924	7.7967	7.7927	0.0008	6.3328
Basecase	11.3585 MW				

ตารางที่ 5.46 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนครราชสีมา 2
โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 3

ตัวแปรควบคุม	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด			
			BFGS	PSO	GA	ABC
$Q_{C1}(Mvar)$	0	50	47.2222	49.9998	49.8177	50
$Q_{C2}(Mvar)$	0	50	50	50	49.9356	50
$V_{NM2}(p.u.)$	0.9	1.1	1.0145	1.0152	1.0155	1.0152



รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2
โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 3

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.28 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่าการลู่เข้าหาคำตอบที่ใกล้เคียงกัน แต่วิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่เข้าช้าที่สุด เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.45 ทุกวิธีมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน แต่ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบสูงกว่าวิธีอื่น พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด ส่วนขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและ

วิธีจินเนติกอัลกอริทึมใช้เวลาใกล้เคียงกัน จากตารางที่ 5.46 แสดงตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นตัวแปรควบคุมอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแต่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส 1 และ 2 ของทุกวิธีจะติดขอบบนของช่วงที่กำหนด แรงดันบัสอ้างอิงมีค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. จากรูปที่ 5.31 แสดงขนาดแรงดันของบัสทุกบัส จะเห็นว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ และสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นหลังจากมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้

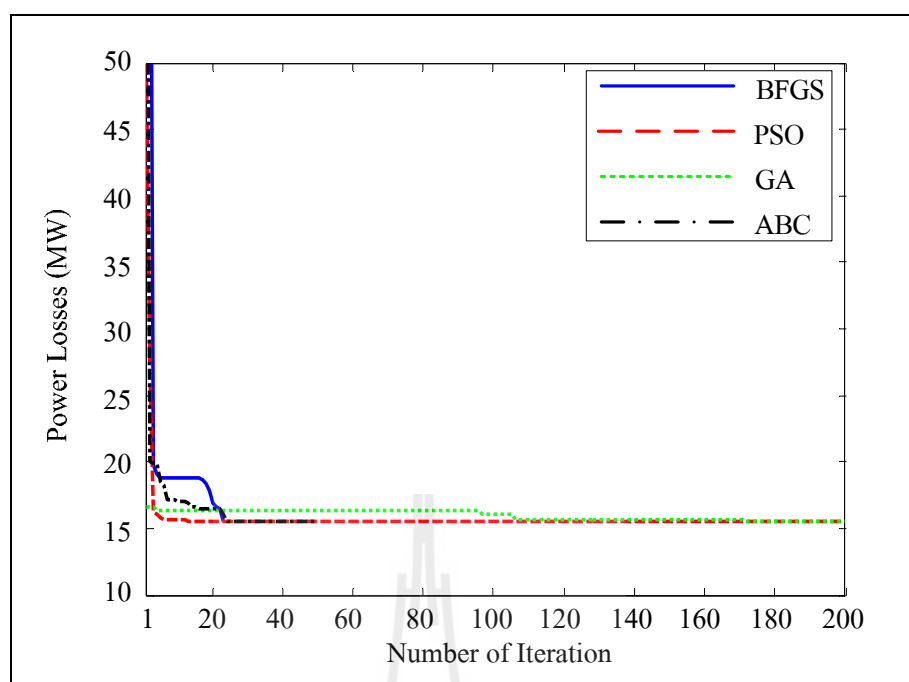
5.5.4 กรณีที่ 4

การทดสอบกรณีที่ 4 ได้ทำการเพิ่มโหลดในระบบทดสอบให้เพิ่มขึ้นอีก 3 เท่า แต่ขนาดตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเท่าเดิม ทำการทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งที่ต่ำที่สุด ด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบ นครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.47

ตารางที่ 5.47 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 4

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration ≤ 200	Iteration = 200	Iteration = 200	Iteration = 50
Default	Population size = 10	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง ทุกวิธีดูเข้าหาคำตอบทั้ง 30 ครั้ง การดูเข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.32 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งดังตารางที่ 5.48 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.49 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.33



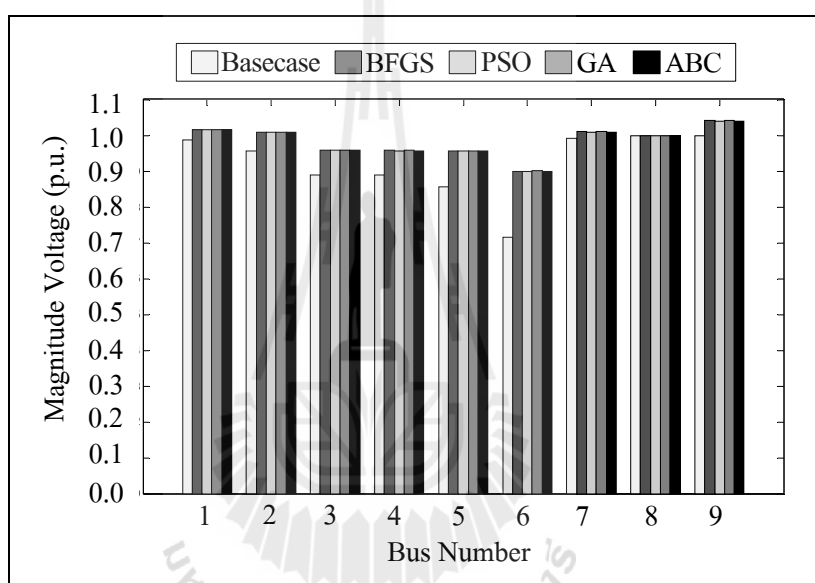
รูปที่ 5.32 เปรียบเทียบการเข้าสู่ของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 4

ตารางที่ 5.48 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 กรณีที่ 4

ขั้นตอนวิธี	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง (MW)				เวลาการคำนวณเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	15.5700	20.5104	17.5483	1.1436	1.7803
PSO	15.4995	15.5156	15.5066	0.0048	12.2312
GA	15.5198	15.6256	15.5790	0.0295	14.4979
ABC	15.4991	15.5075	15.5004	0.0022	10.6667
Basecase	23.751 MW				

ตารางที่ 5.49 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนครราชสีมา 2
โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 4

ตัวแปรควบคุม	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด			
			BFGS	PSO	GA	ABC
$Q_{C1}(Mvar)$	0	50	48.0106	49.9957	49.9276	50
$Q_{C2}(Mvar)$	0	50	50	49.9965	49.884	50
$V_{NM2}(p.u.)$	0.9	1.1	1.0412	1.04	1.0408	1.04



รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2
โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 4

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.32 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบที่ใกล้เคียงกัน แต่วิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่เข้าช้าที่สุด เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.48 ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน แต่ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบสูงกว่าวิธีอื่น พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค วิธีจินเนติกอัลกอริทึมและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันใช้เวลาการคำนวณน้อย

ที่สุด รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จากตารางที่ 5.49 แสดงตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นตัวแปรควบคุมอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแต่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส 1 และ 2 ของทุกวิธีจะติดขอบบนของช่วงที่กำหนดเช่นเดียวกับกรณีที่ 3 ขนาดแรงดันบัสอ้างอิงมีค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. จากรูปที่ 5.33 แสดงขนาดแรงดันของบัสทุกบัส จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ และสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นหลังจากมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้

5.5.5 กรณีที่ 5

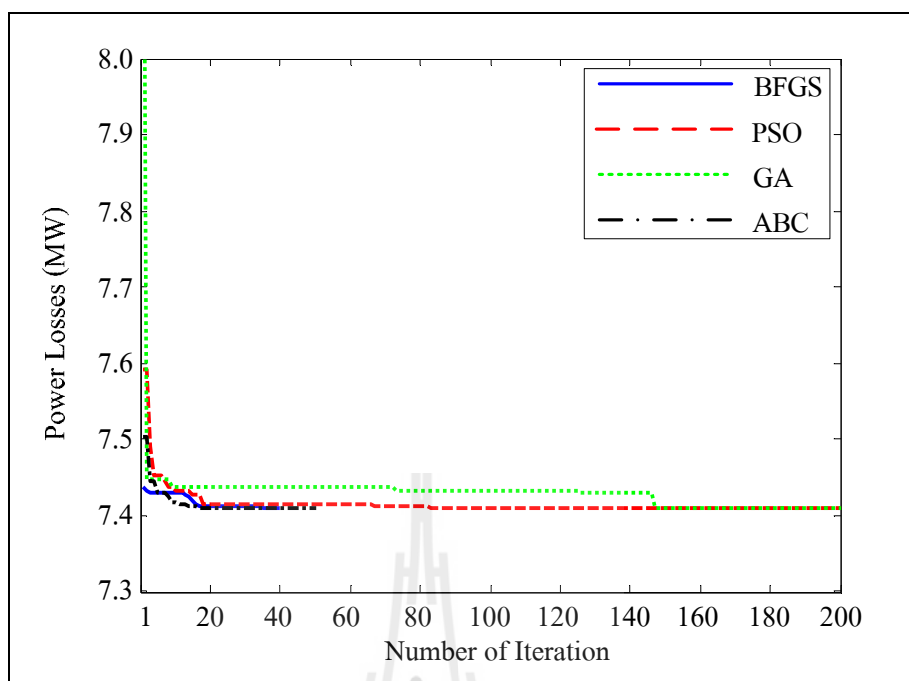
การทดสอบกรณีที่ 5 ได้ทำการทดสอบเช่นเดียวกับกรณีที่ 3 คือ เพิ่มโหลดในระบบทดสอบให้เพิ่มขึ้นอีก 2 เท่า แต่ขยายขอบเขตของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้มากขึ้น ทำการทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดเพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งที่ต่ำที่สุด ด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบบนกรณี 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.50

ตารางที่ 5.50 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบบนกรณี 2

โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 5

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration ≤ 200	Iteration =200	Iteration =200	Iteration =50
Default	Population size = 10	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง ทุกวิธีลู่เข้าหาคำตอบทั้ง 30 ครั้ง การลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.34 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งดังตารางที่ 5.51 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.52 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 5

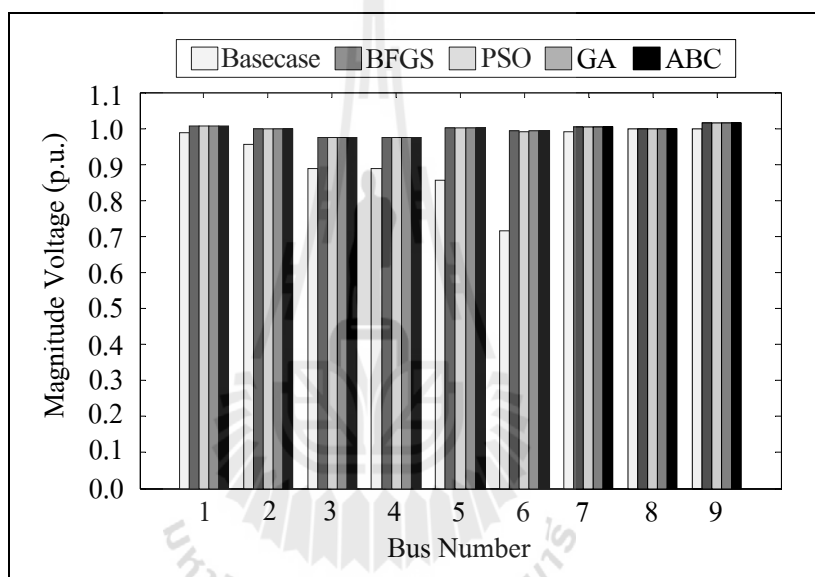
ตารางที่ 5.51 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 กรณีที่ 5

ขั้นตอนวิธี	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง (MW)				เวลาการคำนวณเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	7.4090	8.6244	7.8059	0.4216	1.2533
PSO	7.4092	7.4144	7.4109	0.0015	11.8467
GA	7.4091	7.4120	7.4096	0.0006	13.6086
ABC	7.4090	7.4094	7.4091	0.0000	9.5271
Basecase	11.3585 MW				

ตารางที่ 5.52 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนครราชสีมา 2

โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 5

ตัวแปรควบคุม	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด			
			BFGS	PSO	GA	ABC
$Q_{C1}(Mvar)$	0	130	100.6338	100.4452	99.9501	100.6337
$Q_{C2}(Mvar)$	0	80	65.1632	64.7982	65.4624	65.1634
$V_{NM2}(p.u.)$	0.9	1.1	1.0141	1.0144	1.0141	1.0141



รูปที่ 5.35 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2

โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 5

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.34 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบที่ใกล้เคียงกัน แต่วิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่เข้าช้าที่สุด เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.51 ทุกวิธีมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน แต่วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบสูงกว่าวิธีอื่น พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ระเบียบวิธี

คล้ายนิวตันใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฟุ้งฟุ้งประชิดวิธี วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จากตารางที่ 5.52 แสดงตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นตัวแปรควบคุมอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ขนาดแรงดันบัสอ้างอิงมีค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. จากรูปที่ 5.35 แสดงขนาดแรงดันของบัสทุกบัส จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ และสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นหลังจากมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้

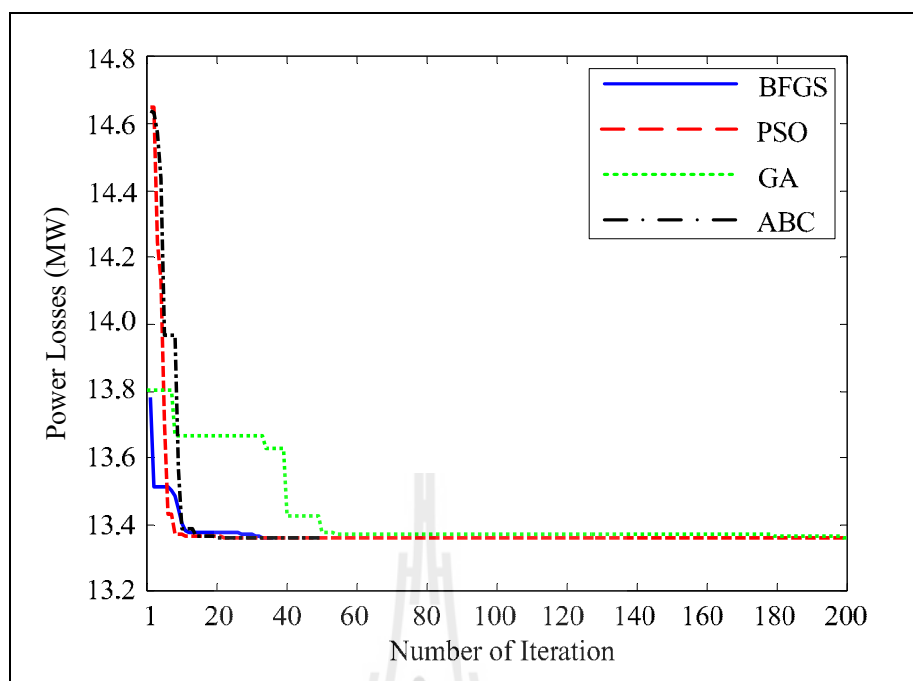
5.5.6 กรณีที่ 6

การทดสอบกรณีที่ 6 ได้ทำการทดสอบเช่นเดียวกับกรณีที่ 4 คือ เพิ่มโหลดในระบบทดสอบให้เพิ่มขึ้นอีก 2 เท่า แต่ขยายขอบเขตของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้มากขึ้น ทำการทดสอบการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งที่ต่ำที่สุด ด้วยขั้นตอนวิธีฟุ้งฟุ้งประชิดวิธี เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบบนคราซีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งซึ่งมีการกำหนดให้พจน์การปรับโทษเท่ากับ 1000000 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.0000001 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวิธี ดังตารางที่ 5.53

ตารางที่ 5.53 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธี สำหรับระบบทดสอบบนคราซีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 6

BFGS	GA	PSO	ABC
Iteration ≤ 200	Iteration =200	Iteration =200	Iteration =50
Default	Population size = 10	Population size = 10	Population size = 10
	Crossover rate = 80%	Acceleration constants = 5	Abandonment = 100
	Mutation rate = 20%		

สำหรับการทดสอบแต่ละวิธีทำการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง ทุกวิธีลู่เข้าหาคำตอบทั้ง 30 ครั้ง การลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีฟุ้งฟุ้งประชิดวิธี เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.36 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งดังตารางที่ 5.54 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.55 และขนาดแรงดันแต่ละบัส ดังรูปที่ 5.37



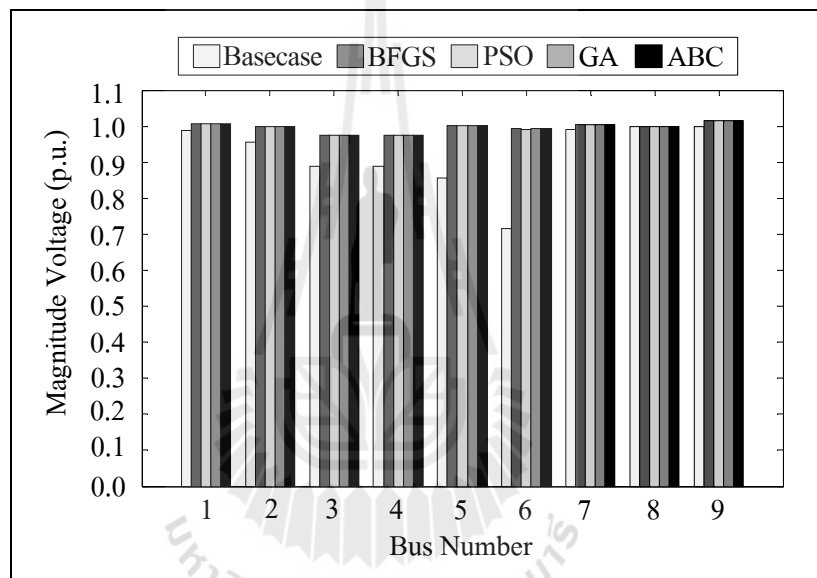
รูปที่ 5.36 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบสำหรับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 6

ตารางที่ 5.54 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 กรณีที่ 6

ขั้นตอนวิธี	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง (MW)				เวลาการคำนวณเฉลี่ย (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
BFGS	13.3635	19.9487	14.4987	1.6520	1.5732
PSO	13.3635	13.3694	13.3648	0.0011	12.0495
GA	13.3635	13.3749	13.3642	0.0020	15.1396
ABC	13.3635	13.3637	13.3635	0.0000	10.9039
Basecase	23.7510 MW				

ตารางที่ 5.55 ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบนครราชสีมา 2
โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 6

ตัวแปรควบคุม	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด			
			BFGS	PSO	GA	ABC
$Q_{C1}(Mvar)$	0	160	149.5593	148.9557	149.6811	149.5666
$Q_{C2}(Mvar)$	0	100	90.1287	90.7285	89.9778	90.1224
$V_{NM2}(p.u.)$	0.9	1.1	1.0234	1.0234	1.0234	1.0234



รูปที่ 5.37 เปรียบเทียบขนาดแรงดันของระบบทดสอบนครราชสีมา 2
โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 6

ผลการทดสอบทำการสุ่มค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 30 ครั้ง จากรูปที่ 5.36 เปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี พบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบที่ใกล้เคียงกัน แต่วิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่เข้าช้าที่สุด เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.54 ทุกวิธีมีแนวโน้มที่จะให้คำตอบที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด รองลงมา คือ วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันใช้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมา คือ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้ง

ประดิษฐ์ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จากตารางที่ 5.55 แสดงตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ทุกวิธีนั้นตัวแปรควบคุมอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ขนาดแรงดันบัสอ้างอิงมีค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. จากรูปที่ 5.37 แสดงขนาดแรงดันของบัสทุกบัส จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการทดสอบสามารถควบคุมขนาดแรงดันของบัสให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ และสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นหลังจากมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้

5.6 สรุป

จากการวิเคราะห์การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อคำนวณหาค่าเชื้อเพลิงรวมของระบบที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ซึ่งทำการทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส 118 บัส และระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส ส่วนฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส 14 บัส และ 30 บัส จะเห็นได้ว่าค่าเชื้อเพลิงรวมของระบบนั้นมีค่าลดลงเมื่อมีการปรับตั้งค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบโดยใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสองกับฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส 14 บัส และ 30 บัสนั้น พบว่าค่าเชื้อเพลิงของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น มีค่าสูงกว่าฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงแบบฟังก์ชันพหุนามอันดับสองตามที่ได้อ้างไว้ในบทที่ 2 ส่วนกรณีพิจารณาฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งโดยทดสอบกับระบบทดสอบนครราชสีมา นั้น พบว่า เมื่อค่าโหลดเพิ่มมากขึ้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งเพิ่มมากขึ้นด้วย และการขยายขอบเขตของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพิ่มมากขึ้นจะช่วยให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งลดลงยิ่งขึ้น

สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์กับขั้นตอนระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาค ผลการทดสอบเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีให้เหมาะสมกับระบบทดสอบต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์จะมีสมรรถนะการเข้าสู่ที่ดีใกล้เคียงกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม และเมื่อพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของต้นทุนเชื้อเพลิงและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อย และใช้เวลาในการคำนวณแตกต่างกันไปในแต่ละระบบ

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการแก้ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ด้วยการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน จำลองผลระบบทดสอบต่าง ๆ ภายใต้สถานะโหลดสมดุล โดยทำการศึกษาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 รูปแบบ คือ ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น และฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ดำเนินการทดสอบกับระบบทดสอบขนาดเล็กจนถึงระบบขนาดใหญ่ และระบบทดสอบของประเทศไทย ได้แก่ ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส และ 118 บัส ระบบทดสอบนครราชสีมา 2 (9 บัส) และระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส ในการแก้ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดนั้นใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์จำลองผลการทดสอบ เพื่อคำนวณหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหาในแต่ละระบบ ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทดสอบให้เหมาะสมกับระบบต่าง ๆ แล้วเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งแต่ละวิธีที่นำมาเปรียบเทียบผลการทดสอบนั้นได้ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับระบบทดสอบเช่นเดียวกัน เครื่องมือที่ใช้การวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม MATLAB จากการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ศึกษาการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์โดยทำการสอบด้วยฟังก์ชันคณิตศาสตร์พื้นฐาน 4 รูปแบบ เปรียบเทียบกับการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค เพื่อศึกษาผลการทำงานของกระบวนการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์เบื้องต้น ซึ่งพบว่าปัญหาแต่ละรูปแบบนั้นวิธีแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีสมรรถนะที่ดีพอ เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการคำนวณ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและคำตอบที่ได้จากการคำนวณ เมื่อเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม

2) ศึกษาการแก้ปัญหการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงพหุนามอันดับสอง ทำการทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส 14 บัส

30 บัส 57 บัส 118 บัส และระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 จากผลการทดสอบพบว่าการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงพหุนามอันดับสองนั้นค่าเชื้อเพลิงที่ได้จากขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์นั้นมีค่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม เมื่อพิจารณาถึงสมรรถนะการค้นหาคำตอบ ในด้านของเวลาการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองสุ่มค่าเริ่มต้นที่ต่างกัน 30 จุดนั้น จะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีสมรรถนะการลู่เข้าของคำตอบที่ค่อนข้างดีและใช้เวลาในการคำนวณไม่มาก สำหรับการทดสอบด้วยระบบทดสอบที่มีขนาดเล็ก ระเบียบวิธีคล้ายนิวตันจะใช้เวลาในการคำนวณเร็วที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกวิธี แต่ถ้ระบบการทดสอบมีขนาดใหญ่มากขึ้นระเบียบวิธีคล้ายนิวตันจะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มมากขึ้นและสมรรถนะในการค้นหาคำตอบลดลง วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคมีสมรรถนะการลู่เข้าของคำตอบที่ค่อนข้างดีเช่นเดียวกับขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์สำหรับบางระบบทดสอบ ส่วนวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีสมรรถนะการลู่เข้าของคำตอบที่ค่อนข้างดีเช่นเดียวกันแต่ใช้เวลาในการคำนวณมากเกินไป

3) ศึกษาการแก้ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงไม่เป็นเชิงเส้น ทำการทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส 14 บัส และ 30 บัสจากผลการทดสอบพบว่าการใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้ค่าเชื้อเพลิงรวมของระบบมีค่าสูงขึ้นกว่าการใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงพหุนามอันดับสอง เนื่องจากการผลิตเป็นแบบกังหันไอน้ำหลายวาล์ว (multi-valve steam turbines) ณ จุดที่ทำการเปิดวาล์วจะทำให้การใช้พลังงานความร้อนมีค่าสูงขึ้น ผลการทดสอบด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์นั้นค่าเชื้อเพลิงรวมของทุกระบบค่อนข้างต่ำเช่นเดียวกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม เมื่อพิจารณาถึงสมรรถนะการค้นหาคำตอบ ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบที่ดีเช่นเดียวกันกับวิธีหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม แต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธีจินเนติกอัลกอริทึม สำหรับระเบียบวิธีคล้ายนิวตันใช้เวลาในการคำนวณเร็วที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกวิธี

4) ศึกษาการแก้ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ทำการทดสอบกับระบบทดสอบนครราชสีมา 2 (9 บัส) โดยการศึกษาแบ่งกรณีศึกษาเป็น 4 กรณี ได้ทำการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบทดสอบและขยายขอบเขตของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อค่าโหลดเพิ่มมากขึ้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งเพิ่มมากขึ้นด้วย และในการขยายขอบเขตของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพิ่มมากขึ้นจะช่วยให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งลดลงยิ่งขึ้น ผลการทดสอบ

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งที่ได้จากการแก้ปัญหาค่าการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์นั้นมีค่าใกล้เคียงกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค และวิธีจินเนติกอัลกอริทึม เมื่อพิจารณาถึงสมรรถนะการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ พบว่าสมรรถนะการค้นหาคำตอบนั้นมีสมรรถนะที่ดี เมื่อพิจารณาในด้านของเวลาการคำนวณและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สามารถสรุปผลของวิธีการแก้ปัญหาค่าการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดเพื่อให้เหมาะสมกับระบบทดสอบต่าง ๆ ของการทดสอบด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค และวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ได้เป็นดังนี้

กำหนดให้ E คือ ยอดเยี่ยม (Excellent) G คือ ดี (Good) F คือ ล้มเหลว (Fail)

ตารางที่ 6.1 สรุปจำนวนครั้งในการเข้าสู่เมื่อสุ่มค่าเริ่มต้นที่ต่างกัน 30 ครั้ง

การทดสอบ	ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน			การหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค			จินเนติกอัลกอริทึม			ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์		
	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
1. ฟังก์ชันพหุนาม อันดับสอง												
-ระบบทดสอบ 6 บัต์	✓			✓			✓			✓		
-ระบบทดสอบ 14 บัต์	✓			✓			✓			✓		
-ระบบทดสอบ 30 บัต์	✓			✓			✓			✓		
-ระบบทดสอบ 57 บัต์		✓		✓			✓			✓		
-ระบบทดสอบ 118 บัต์			✓	✓			✓			✓		
-ระบบทดสอบการ ไฟฟ้าภาคกลาง ตะวันออกขนาด 147 บัต์			✓	✓			✓			✓		
2. ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
-ระบบทดสอบ 6 บัต์	✓			✓			✓			✓		
-ระบบทดสอบ 14 บัต์	✓			✓			✓			✓		
-ระบบทดสอบ 30 บัต์	✓			✓			✓			✓		

ตารางที่ 6.1 สรุปจำนวนครั้งในการลู่อเข้าเมื่อสุมค่าเริ่มต้นที่ต่างกัน 30 ครั้ง (ต่อ)

การทดสอบ	ระเบียบวิธี คล้ายนิวตัน			การหาค่า เหมาะที่สุด ของฝูงอนุภาค			จินเนติก อัลกอริทึม			ขั้นตอนวิธีฝูง ผึ้งประดิษฐ์		
	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
3. ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้า สูญเสียในสายส่ง												
-กรณีที่ 1	✓			✓			✓			✓		
-กรณีที่ 2	✓			✓			✓			✓		
-กรณีที่ 3	✓			✓			✓			✓		
-กรณีที่ 4	✓			✓			✓			✓		
-กรณีที่ 5	✓			✓			✓			✓		
-กรณีที่ 6	✓			✓			✓			✓		

กำหนดให้ เกณฑ์การแบ่งช่วงของจำนวนครั้งในการลู่อเข้าเมื่อสุมค่าเริ่มต้นที่ต่างกัน 30 ครั้งเป็นดังนี้

E อยู่ในช่วง 26-30 ครั้ง

G อยู่ในช่วง 21-25 ครั้ง

F น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 ครั้ง

ตารางที่ 6.2 สรุปการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด

การทดสอบ	ระเบียบวิธี คล้ายนิวตัน			การหาค่า เหมาะที่สุด ของฝูงอนุภาค			จินเนติก อัลกอริทึม			ขั้นตอนวิธีฝูง ผึ้งประดิษฐ์		
	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
1. ฟังก์ชันพหุนาม อันดับสอง												
-ระบบทดสอบ 6 บัต์	✓					✓		✓		✓		
-ระบบทดสอบ 14 บัต์	✓					✓		✓			✓	
-ระบบทดสอบ 30 บัต์	✓					✓		✓		✓		
-ระบบทดสอบ 57 บัต์	✓				✓				✓		✓	
-ระบบทดสอบ 118 บัต์		✓		✓					✓	✓		

ตารางที่ 6.2 สรุปการค้นหาคำตอบที่ต่ำที่สุด (ต่อ)

การทดสอบ	ระเบียบวิธี คล้ายนิวตัน			การหาค่า เหมาะที่สุด ของฝูงอนุภาค			จินเนติก อัลกอริทึม			ขั้นตอนวิธีฝูง ผึ้งประดิษฐ์		
-ระบบทดสอบการ ไฟฟ้าภาคกลาง ตะวันออกขนาด 147 บัส			✓		✓			✓		✓		
2. ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
-ระบบทดสอบ 6 บัส	✓					✓			✓	✓		
-ระบบทดสอบ 14 บัส		✓		✓					✓		✓	
-ระบบทดสอบ 30 บัส	✓					✓		✓		✓		
3. ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้า สูญเสียในสายส่ง	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
-กรณีที่ 1	✓			✓			✓			✓		
-กรณีที่ 2			✓	✓				✓		✓		
-กรณีที่ 3			✓	✓				✓		✓		
-กรณีที่ 4			✓	✓				✓		✓		
-กรณีที่ 5	✓					✓		✓		✓		
-กรณีที่ 6	✓			✓			✓			✓		

กำหนดให้ เกณฑ์การแบ่งช่วงของการค้นหาคำตอบที่ต่ำที่สุดแต่ละระบบทดสอบเป็นดังนี้

1) ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

-ระบบทดสอบ 6 บัส $E < 365, 365 \leq G \leq 373, F > 373$

-ระบบทดสอบ 14 บัส $E < 1502, 1502 \leq G \leq 1581, F > 1581$

-ระบบทดสอบ 30 บัส $E < 657, 657 \leq G \leq 724, F > 724$

-ระบบทดสอบ 57 บัส $E < 9062, 9062 \leq G \leq 9275, F > 9275$

-ระบบทดสอบ 118 บัส $E < 44729, 44729 \leq G \leq 47672, F > 47672$

-ระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส $E < 87624, 87624 \leq G \leq 88324, F > 88324$

2) ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

-ระบบทดสอบ 6 บัต์ $E < 529, 529 \leq G \leq 543, F > 543$ -ระบบทดสอบ 14 บัต์ $E < 1091, 1091 \leq G \leq 1148, F > 1148$ -ระบบทดสอบ 30 บัต์ $E < 876, 876 \leq G \leq 907, F > 907$

3) ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

-กรณีที่ 1 $E < 0.7942, 0.7942 \leq G \leq 0.7943, F > 0.7943$ -กรณีที่ 2 $E < 3.2433, 3.2433 \leq G \leq 3.2435, F > 3.2435$ -กรณีที่ 3 $E < 7.7934, 7.7934 \leq G \leq 7.8083, F > 7.8083$ -กรณีที่ 4 $E < 15.5054, 15.5054 \leq G \leq 15.5388, F > 15.5388$ -กรณีที่ 5 $E < 7.4090, 7.4090 \leq G \leq 7.4091, F > 7.4091$

-กรณีที่ 6 ไม่มีช่วงในการแบ่งเกณฑ์

ตารางที่ 6.3 สมรรถนะการเข้าสู่ของคำตอบเมื่อสุ่มค่าเริ่มต้นที่ต่างกัน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

การทดสอบ	ระเบียบวิธี คล้ายนิวตัน			การหาค่า เหมาะที่สุด ของฟังก์ชัน			จินเนติก อัลกอริทึม			ขั้นตอนวิธีฝูง ผึ้งประดิษฐ์		
	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
1. ฟังก์ชันพหุนาม อันดับสอง												
-ระบบทดสอบ 6 บัต์		✓				✓		✓		✓		
-ระบบทดสอบ 14 บัต์			✓	✓				✓			✓	
-ระบบทดสอบ 30 บัต์			✓			✓	✓			✓		
-ระบบทดสอบ 57 บัต์			✓	✓				✓			✓	
-ระบบทดสอบ 118 บัต์			✓			✓		✓		✓		
-ระบบทดสอบการ ไฟฟ้าภาคกลาง ตะวันออกขนาด 147 บัต์			✓		✓			✓		✓		
2. ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
-ระบบทดสอบ 6 บัต์		✓				✓			✓	✓		
-ระบบทดสอบ 14 บัต์		✓				✓		✓		✓		

ตารางที่ 6.3 สมรรถนะการลู่เข้าของคำตอบเมื่อสุ่มค่าเริ่มต้นที่ต่างกัน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) (ต่อ)

การทดสอบ	ระเบียบวิธี คล้ายนิวตัน			การหาค่า เหมาะที่สุด ของฝูงอนุภาค			จินเนติก อัลกอริทึม			ขั้นตอนวิธีฝูง ผึ้งประดิษฐ์		
-ระบบทดสอบ 30 บั๊ต			✓		✓			✓		✓		
3. ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้า สูญเสียในสายส่ง	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
-กรณีที่ 1			✓		✓		✓			✓		
-กรณีที่ 2			✓	✓				✓		✓		
-กรณีที่ 3			✓	✓				✓		✓		
-กรณีที่ 4			✓	✓				✓		✓		
-กรณีที่ 5			✓		✓		✓			✓		
-กรณีที่ 6			✓		✓			✓		✓		

กำหนดให้ เกณฑ์การแบ่งช่วงของสมรรถนะการลู่เข้าของคำตอบเมื่อสุ่มค่าเริ่มต้นที่ต่างกันจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละระบบทดสอบเป็นดังนี้

1) ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

- ระบบทดสอบ 6 บั๊ต $E < 42.3629, 42.3629 \leq G \leq 63.0456, F > 63.0456$
- ระบบทดสอบ 14 บั๊ต $E < 95.5588, 95.5588 \leq G \leq 124.1616, F > 124.1616$
- ระบบทดสอบ 30 บั๊ต $E < 66.1798, 66.1798 \leq G \leq 86.4522, F > 86.4522$
- ระบบทดสอบ 57 บั๊ต $E < 335.4109, 335.4109 \leq G \leq 929.1500, F > 929.1500$
- ระบบทดสอบ 118 บั๊ต $E < 10249.400, 10249.400 \leq G \leq 12832.550, F > 12832.550$
- ระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บั๊ต $E < 3849.7080, 3849.7080 \leq G \leq 18147.1800, F > 18147.1800$

2) ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

- ระบบทดสอบ 6 บั๊ต $E < 29.1290, 29.1290 \leq G \leq 41.7133, F > 41.7133$
- ระบบทดสอบ 14 บั๊ต $E < 49.3771, 49.3771 \leq G \leq 71.6913, F > 71.6913$
- ระบบทดสอบ 30 บั๊ต $E < 61.2234, 61.2234 \leq G \leq 130.4579, F > 130.4579$

3) ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

- กรณีที่ 1 $E < 0.0017, 0.0017 \leq G \leq 0.0083, F > 0.0083$

-กรณีที 2 $E < 0.0011$, $0.0011 \leq G \leq 0.0942$, $F > 0.0942$

-กรณีที 3 $E < 0.0084$, $0.0084 \leq G \leq 0.5001$, $F > 0.5001$

-กรณีที 4 $E < 0.0121$, $0.0121 \leq G \leq 0.5780$, $F > 0.5780$

-กรณีที 5 $E < 0.0007$, $0.0007 \leq G \leq 0.2112$, $F > 0.2112$

-กรณีที 6 $E < 0.0010$, $0.0010 \leq G \leq 0.8265$, $F > 0.8265$

ตารางที 6.4 สรุปเวลาการคำนวณ

การทดสอบ	ระเบียบวิธี คล้ายนิวตัน			การหาค่า เหมาะที่สุด ของฝูงอนุภาค			จินเนติก อัลกอริทึม			ขั้นตอนวิธีฝูง ผึ้งประดิษฐ์		
	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
1. ฟังก์ชันพหุนาม อันดับสอง												
-ระบบทดสอบ 6 บัต์	✓				✓				✓	✓		
-ระบบทดสอบ 14 บัต์	✓				✓				✓		✓	
-ระบบทดสอบ 30 บัต์	✓				✓				✓	✓		
-ระบบทดสอบ 57 บัต์			✓	✓					✓	✓		
-ระบบทดสอบ 118 บัต์			✓	✓					✓	✓		
-ระบบทดสอบการ ไฟฟ้าภาคกลาง ตะวันออกขนาด 147 บัต์			✓	✓					✓	✓		
2. ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
-ระบบทดสอบ 6 บัต์	✓				✓				✓	✓		
-ระบบทดสอบ 14 บัต์	✓				✓				✓		✓	
-ระบบทดสอบ 30 บัต์	✓				✓				✓	✓		
3. ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้า สูญเสียในสายส่ง	E	G	F	E	G	F	E	G	F	E	G	F
-กรณีที 1	✓					✓		✓			✓	
-กรณีที 2	✓				✓				✓		✓	
-กรณีที 3	✓				✓				✓		✓	

ตารางที่ 6.4 สรุปเวลาการคำนวณ (ต่อ)

การทดสอบ	ระเบียบวิธี คล้ายนิวตัน			การหาค่า เหมาะที่สุด ของฟังก์ชันอนุภาค			จินเนติก อัลกอริทึม			ขั้นตอนวิธีฝูง ผึ้งประดิษฐ์		
-กรณีที่ 4	✓				✓				✓		✓	
-กรณีที่ 5	✓					✓			✓		✓	
-กรณีที่ 6	✓				✓				✓		✓	

กำหนดให้ เกณฑ์การแบ่งช่วงของเวลาการคำนวณแต่ละระบบทดสอบเป็นดังนี้

1) ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

- ระบบทดสอบ 6 บั้ต $E < 14.2775, 14.2775 \leq G \leq 44.0027, F > 44.0027$
- ระบบทดสอบ 14 บั้ต $E < 17.4440, 17.4440 \leq G \leq 83.1007, F > 83.1007$
- ระบบทดสอบ 30 บั้ต $E < 68.6324, 68.6324 \leq G \leq 260.1095, F > 260.1095$
- ระบบทดสอบ 57 บั้ต $E < 449.0456, 449.0456 \leq G \leq 1033.6680, F > 1033.6880$
- ระบบทดสอบ 118 บั้ต $E < 4911.0440, 4911.0440 \leq G \leq 14490.6300, F > 14490.6300$
- ระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บั้ต $E < 8171.9240, 8171.9240 \leq G \leq 18055.7300, F > 18055.7300$

2) ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

- ระบบทดสอบ 6 บั้ต $E < 13.6450, 13.6550 \leq G \leq 43.7620, F > 43.7620$
- ระบบทดสอบ 14 บั้ต $E < 17.5077, 17.5077 \leq G \leq 83.7236, F > 83.7236$
- ระบบทดสอบ 30 บั้ต $E < 76.7434, 76.7434 \leq G \leq 192.6979, F > 192.6979$

3) ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

- กรณีที่ 1 $E < 3.4385, 3.4385 \leq G \leq 5.7107, F > 5.7107$
- กรณีที่ 2 $E < 3.6914, 3.6914 \leq G \leq 5.9237, F > 5.9237$
- กรณีที่ 3 $E < 4.0704, 4.0704 \leq G \leq 6.4956, F > 6.4956$
- กรณีที่ 4 $E < 7.0094, 7.0094 \leq G \leq 12.5786, F > 12.5786$
- กรณีที่ 5 $E < 6.3261, 6.3261 \leq G \leq 11.7917, F > 11.7917$
- กรณีที่ 6 $E < 6.9951, 6.9951 \leq G \leq 12.8380, F > 12.8380$

6.2 ข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงขั้นตอนวิธีฝังฝังประดิษฐ์เพื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ผลของคำตอบมีค่าต้นทุนการผลิตหรือค่าเชื้อเพลิงและสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้ต่ำกว่านี้และใช้เวลาการคำนวณน้อยลง สามารถทำได้ดังนี้

1) การหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรควบคุมโดยใช้วิธีการคำนวณค่าที่เหมาะสมที่สุดแต่ละวิธี จะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นและขอบเขตที่เหมาะสมในการค้นหาคำตอบ ค่าเริ่มต้นที่กำหนดได้จากการสุ่มค่าระหว่างขอบเขตที่กำหนด ถ้าค่าเริ่มต้นไม่อยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสม จะทำให้การจำลองผลหรือหาผลเฉลยของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดนั้นใช้เวลานาน หรือค่าพารามิเตอร์ที่ได้อาจจะไม่สามารถทำให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ ดังนั้น ควรกำหนดขอบเขตของคำตอบให้มีขนาดเล็กมากพอและครอบคลุมคำตอบ เพื่อให้การหาผลเฉลยของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดนั้นใช้เวลาไม่มากนัก

2) สร้างโปรแกรมย่อยเพื่อกำหนดเงื่อนไขของการออกจากโปรแกรมเพิ่มขึ้นมา เช่น เงื่อนไขความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณไม่จำเป็นต้องเท่ากับที่กำหนดไว้ สำหรับโปรแกรมของขั้นตอนวิธีฝังฝังประดิษฐ์นั้นใช้เพียงการกำหนดรอบสูงสุดในการคำนวณเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

3) จำนวนชุดข้อมูลในฐานะข้อมูลต้องมีจำนวนมากพอ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้จำนวนข้อมูล 30 ชุด ต่อการทดสอบผลระบบทดสอบหนึ่งระบบ เพื่อให้การอนุมานผลของคำตอบมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ชุดของข้อมูลควรครอบคลุมในทุกกรณีที่เป็นไปได้ของอินพุต

4) การใช้ขั้นตอนวิธีฝังฝังประดิษฐ์ในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่จะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นในการนำวิธีการดังกล่าวมาใช้จึงต้องมีการพัฒนาในด้านความเร็วในการคำนวณและพัฒนาแบบจำลองให้รองรับข้อจำกัดอื่นของระบบได้

5) การเปรียบเทียบผลการทดสอบแต่ละวิธี ควรกำหนดให้พารามิเตอร์ของการทดสอบแต่ละวิธีเป็นไปในแนวทางเดียวกัน เพื่อให้ผลการทดสอบมีเกณฑ์อ้างอิงที่เท่าเทียมกัน

ทั้งนี้การนำวิธีการที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานสามารถทำได้โดยการทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังจริง ที่จะนำไปใช้และสามารถใช้เป็นระบบผู้เชี่ยวชาญที่แนะนำผู้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังได้

รายการอ้างอิง

- เผด็จ เผ่าละออ (2550). การใช้โปรแกรมเมทแลบสำหรับวิศวกรไฟฟ้า. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธนัดชัย กุลวรรณิขพงษ์ (2542). การทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการตัดสินใจแบบฟัซซี่. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.
- ธนัดชัย กุลวรรณิขพงษ์ (2550). การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธนัดชัย กุลวรรณิขพงษ์. (2550). เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธวัช ชูจิต (2552). อัลกอริทึมการควบคุมแรงบิดโดยตรงไร้เซนเซอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบแยกเฟส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ (2549). **Matlab การประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า**. กรุงเทพฯ ฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Abido, M.A. (2002). Optimal Power Flow using Particle Swarm Optimization. **Electrical Power and Energy Systems.**: 563 – 571.
- Abido, M.A. (2002). Optimal Power Flow using Tabu Search Algorithm. **Electrical Power Components and Systems.**:460 – 489.
- Abido, M.A. (2008). Multiobjective Particle Swarm Optimization for Optimal power flow Problem. **Power System Conference. MEPCON. 12th International Middle-East.**, 392 – 396.
- Chidambaram, C., and Lopes, H.S. (2009). A New Approach for Template Matching in Digital Images Using An Artificial Bee Colony Algorithm. **Nature & Biologically Inspired Computing. 2009. NaBIC 2009. World Congress.**: 146-151.
- Chong, C. S., Hean Low, M. Y., Sivakumar, A. I. and Gay, K. L. (2006). A Bee Colony Optimization Algorithm to Job Shop Scheduling.: 1954-1961.

- Hazra, J., and Sinha, A. (2007). A study on Reactive Power Optimization using Particle Swarm Optimization using Particle Swarm Optimization. **Industrial and Information Systems, 2007. ICIIS 2007. International Conference.:** pp.323 – 328.
- Haiyan, Q., and Xinling, S. (2008). On the Analysis of Performance of the Improved Artificial-Bee-Colony Algorithm. **Natural Computation. 2008. ICNC 08. Fourth International Conference.:** 654-658.
- He, S., Wen, J.Y., Prempan, E., Wu, Q.H., Fitch, J., and Mann, S. (2004). An improved particle swarm optimization for optimal power flow. **Power System Technology. 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference.:** 1633-1637.
- Jan, R. M., and Chen, N. (1995). Application Of The Fast Newton-Raphson Economic Dispatch And Reactive Power voltage Dispatch By Sensitivity Factors To Optimal Power Flow. **IEEE Transactions on Energy Conversion.:** 293–301.
- Karaboga, D., and Basrurk, B. (2007). A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony algorithm (ABC) Algorithm. **Journal of Global Optimization.:** 459–471.
- Karaboga, N. (2009). A New Design Method based on Artificial Bee Colony Algorithm for Digital IIR Filters. **Journal of The Franklin Institute.:** 328-348.
- Leung, H.C., and Chung, T.S. (2000). Optimal Power Flow with A Versatile FACTS Controller by Genetic Algorithm Approach. **Power Engineering Society Winter Meeting. 2000. IEEE.:** 2806-2811.
- Li-Pei W., Chi Y.P., Low, M., and Chin S. C. (2008). Bee Colony Optimization algorithm with Big Valley landscape exploitation for Job Shop Scheduling problems. **Simulation Conference. 2008. WSC 2008. Winter.:** 2050-2058.
- Murlithi, M.G. (1996). Optimal Power Flow for The High Voltage Network of The Kenya Power System. **Africon. 1996. IEEE Africon 4th.:** 162-168.
- Oumarou, I., Daozhuo, J., and Cao, Y. (2009). Particle Swarm Optimization Applied to Optimal Power Flow Solution. **Natural Computation. 2009. ICNC. 09. Fifth International Conference.:** 284-288.
- Pandya, K. S., and Joshi, S. K. (2008). A Survey of Optimal Power Flow Methods. **Journal of Theoretical and Applied Information Technology.:** 450-458.

- Paugnim, A., and Sirisumranukul, S. (2006). Optimal Power Flow by a Primal-Dual Interior Point Method. **Energy for Sustainable Development**.
- PhanTu, V., DinhLuong, L., NgocDieu, V., and Thlusty, J. (2010). A Novel Weight-Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Optimal Power Flow and Economic Load Dispatch Problems. Transmission and Distribution Conference and Exposition. 2010 IEEE PES.: 1-7.
- Santos, A., Jr, G.R.M., and da Costa. (1995). Optimal-Power-Flow Solution by Newton's Method Applied to An Augmented Lagrangian Function. **IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.**
- Santos, A., Jr, da. and Costa, G.R.M. (1995). Optimal-Power-Flow Solution by Newton's Method Applied to An Augmented Lagrangian Function. **Generation. Transmission and Distribution. IEEE Proceedings.**: 33-36.
- Sharif, S.S., Taylor, J.H., and Hill, E.F.(1996). On-Line Optimal Reactive Power Flow by Energy Loss Minimization. **Decision and Control. 1996. Proceedings of the 35th IEEE.**: 3851-3856.
- Sheng, L. (2008). Cultural Algorithm Based on Adaptive Cauchy Mutated Particle Swarm Optimizer for High-Dimensional Function Optimization. **Intelligent Control and Automation. 2008. WCICA 2008. 7th World Congress.**: 4006-4011.
- Tangpatiphan, K., and Yokoyama. (2008). A. Evolutionary Programming Incorporating Neural Network for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow. **Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference.**: 1-8.
- Tangpatiphan, K., and Yokoyama, A. (2009). Optimal Power Flow with steady-state voltage stability consideration using Improved Evolutionary **Programming. PowerTech. 2009 IEEE Bucharest.**: 1-7.
- Teodorovic, D., and Dell Orco, M. Bee Colony Optimization A Cooperative Learning Approach To Complex Transportation Problems", **Advanced OR and AI Methods in Transportation.**: 51-60.
- Thitithamrongchai, C., and Eua-asporn, B. (2007). Self-adaptive Differential Evolution Based Optimal Power Flow for Units with Non-smooth Fuel Cost Functions. **Journal of Electrical Systems.**: 88-99.

- Todorovski, M., and Rajcic, D. (2006). An Initialization Procedure in Solving Optimal Power Flow by Genetic Algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems.**: 480 – 487.
- Tung Linh, N., and Quynh Anh, N. (2010). Application Artificial Bee Colony algorithm (ABC) for Reconfiguring Distribution Network., **2010 Second International Conference on Computer Modeling and Simulation.**: 102-106.
- Vaisakb, K., and Srinivas, L.R. (2008). Differential Evolution Approach for Optimal Power Flow Solution. **Journal of Theoretical and Applied Information Technology.**: 261–268.
- Wenjuan, Z., Fangxing, L., and Tolbert, L.M. (2008). Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow (VSCOPF) with Two Sets of Variables (TSV) for Reactive Power Planning. **Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES.**: 1-6.
- Younes, M., Rahli, M., and Abdelhakem-Koridak, L. (2007). Optimal Power Flow Based on Hybrid Genetic Algorithm. **Journal of Information Science and Engineering.**: 1801-1816.
- Zwe-lee, G. (2005). Constrained Optimal Power Flow by Mixed-Integer Particle Swarm Optimization. **Power Engineering Society General Meeting. 2005. IEEE.**: 243-250.



ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบที่นำมาทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยระบบทดสอบ 7 ระบบ แบ่งเป็นระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 5 ระบบ และระบบไฟฟ้ากำลังจริงของประเทศไทย 2 ระบบ ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE คือ ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส 14 บัส 30 บัส 57 บัส และ 118 บัส และระบบไฟฟ้ากำลังจริงของประเทศไทย คือ ระบบทดสอบ นครราชสีมา 2 (9 บัส) ระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส รายละเอียดของระบบทดสอบแสดงได้ดังนี้

ก.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส

ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 230 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA มีข้อมูลบัสและข้อมูลสายส่ง ดังตารางที่ ก.1 และตารางที่ ก.2 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	Slack bus
2	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
3	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	55.0000	11.0000	PQ bus
4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
5	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.0000	18.0000	PQ bus
6	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	50.0000	10.0000	PQ bus

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	1	6	0.1230	0.5180	0.0000	1.0000
2	1	4	0.0800	0.3700	0.0000	1.0000
3	4	6	0.0970	0.4070	0.0000	1.0000
4	6	5	0.0000	0.3000	0.0000	1.0250
5	5	2	0.2820	0.6400	0.0000	1.0000

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
6	2	3	0.7230	1.0500	0.0000	1.0000
7	4	3	0.000	0.1330	0.0000	1.1000

ก.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 230 kV ที่กำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA มีข้อมูลบัสและข้อมูลสายส่ง ดังตารางที่ ก.3 และตารางที่ ก.4 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	Slack bus
2	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.7000	12.7000	PQ bus
3	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	94.2000	19.0000	PQ bus
4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	47.8000	0.0000	PQ bus
5	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.6000	1.6000	PQ bus
6	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.2000	7.5000	PQ bus
7	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
8	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
9	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.5000	16.6000	PQ bus
10	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.0000	0.05.8	PQ bus
11	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.5000	1.8000	PQ bus
12	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.1000	1.6000	PQ bus
13	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.5000	5.8000	PQ bus
14	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.9000	5.0000	PQ bus

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	1	2	0.0194	0.0592	0.0500	1.0000
2	1	5	0.0540	0.2230	0.0500	1.0000
3	2	3	0.0470	0.1980	0.0400	1.0000
4	2	4	0.0581	0.1763	0.0400	1.0000
5	2	5	0.0570	0.1739	0.0300	1.0000
6	3	4	0.0670	0.1710	0.0300	1.0000
7	4	5	0.0134	0.0421	0.0100	1.0000
8	4	7	0.0000	0.2091	0.0000	0.9500
9	4	9	0.0000	0.5562	0.0000	0.9500
10	5	6	0.0000	0.2520	0.0000	0.9500
11	6	11	0.0950	0.1989	0.0000	1.0000
12	6	12	0.1229	0.2558	0.0000	1.0000
13	6	13	0.0662	0.1303	0.0000	1.0000
14	7	8	0.0000	0.1762	0.0000	0.9500
15	7	9	0.0000	0.1100	0.0000	0.9500
16	9	10	0.0318	0.0845	0.0000	1.0000
17	9	14	0.1271	0.2704	0.0000	1.0000
18	10	11	0.0820	0.1921	0.0000	1.0000
19	12	13	0.2209	0.1999	0.0000	1.0000
20	13	14	0.1709	0.3480	0.0000	1.0000

ก.3 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 135 kV ที่กำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA มีข้อมูลบัสและข้อมูลสายส่ง ดังตารางที่ ก.5 และตารางที่ ก.6 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	Slack bus
2	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.7000	12.7000	PQ bus
3	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.4000	1.2000	PQ bus
4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.6000	1.6000	PQ bus
5	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
6	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
7	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.8000	10.9000	PQ bus
8	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.0000	30.0000	PQ bus
9	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
10	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.8000	2.0000	PQ bus
11	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
12	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.2000	7.5000	PQ bus
13	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
14	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.2000	1.6000	PQ bus
15	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.2000	2.5000	PQ bus
16	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.5000	1.8000	PQ bus
17	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.0000	5.8000	PQ bus
18	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.2000	0.9000	PQ bus
19	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.5000	3.4000	PQ bus
20	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.2000	0.7000	PQ bus
21	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	17.5000	11.2000	PQ bus
22	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
23	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.2000	1.6000	PQ bus
24	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.7000	6.7000	PQ bus
25	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
26	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.5000	2.3000	PQ bus
27	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
28	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
29	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.4000	0.9000	PQ bus
30	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.6000	1.9000	PQ bus

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	1	2	0.0200	0.0600	0.0300	1.0000
2	1	3	0.0500	0.1900	0.0200	1.0000
3	2	4	0.0600	0.1700	0.0200	1.0000
4	3	4	0.0100	0.0400	0.0000	1.0000
5	2	5	0.0500	0.2000	0.0200	1.0000
6	2	6	0.0600	0.1800	0.0200	1.0000
7	4	6	0.0100	0.0400	0.0000	1.0000
8	4	12	0.0000	0.2600	0.0000	1.0000
9	5	7	0.0500	0.1200	0.0100	1.0000
10	6	7	0.0300	0.0800	0.0100	1.0000
11	6	8	0.0100	0.0400	0.0000	1.0000
12	6	9	0.0000	0.2100	0.0000	1.0000
13	6	28	0.0200	0.0600	0.0100	1.0000
14	6	10	0.0000	0.5600	0.0000	1.0000
15	8	28	0.0600	0.2000	0.0200	1.0000
16	9	11	0.0000	0.2100	0.0000	1.0000
17	9	10	0.0000	0.1100	0.0000	1.0000
18	10	20	0.0900	0.2100	0.0000	1.0000
19	10	17	0.0300	0.0800	0.0000	1.0000

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
20	10	21	0.0300	0.0700	0.0000	1.0000
21	10	22	0.0700	0.1500	0.0000	1.0000
22	12	13	0.0000	0.1400	0.0000	1.0000
23	12	14	0.1200	0.2600	0.0000	1.0000
24	12	15	0.0700	0.1300	0.0000	1.0000
25	12	16	0.0900	0.2000	0.0000	1.0000
26	14	15	0.2200	0.2000	0.0000	1.0000
27	15	18	0.1100	0.2200	0.0000	1.0000
28	15	23	0.1000	0.2000	0.0300	1.0000
29	16	17	0.0800	0.1900	0.0200	1.0000
30	18	19	0.0600	0.1300	0.0200	1.0000
31	19	20	0.0300	0.0700	0.0000	1.0000
32	21	22	0.0100	0.0200	0.0200	1.0000
33	22	24	0.1200	0.1800	0.0200	1.0000
34	23	24	0.1300	0.2700	0.0000	1.0000
35	24	25	0.1900	0.3300	0.0000	1.0000
36	25	26	0.2500	0.3800	0.0100	1.0000
37	25	27	0.1100	0.2100	0.0100	1.0000
38	28	27	0.0000	0.4000	0.0000	1.0000
39	27	29	0.2200	0.4200	0.0000	1.0000
40	27	30	0.3200	0.6000	0.0100	1.0000
41	29	30	0.2400	0.4500	0.0000	1.0000

ก.4 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 135 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA มีข้อมูลบัสและข้อมูลสายส่ง ดังตารางที่ ก.7 และตารางที่ ก.8 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	55.0000	17.0000	Slack bus
2	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.0000	88.0000	PQ bus
3	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	41.0000	21.0000	PQ bus
4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
5	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.0000	4.0000	PQ bus
6	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	75.0000	2.0000	PQ bus
7	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
8	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	150.0000	22.0000	PQ bus
9	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	121.0000	26.0000	PQ bus
10	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.0000	2.0000	PQ bus
11	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
12	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	377.0000	24.0000	PQ bus
13	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	18.0000	2.3000	PQ bus
14	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.5000	5.3000	PQ bus
15	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.0000	5.0000	PQ bus
16	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	43.0000	3.0000	PQ bus
17	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	42.0000	8.0000	PQ bus
18	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.2000	9.8000	PQ bus
19	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.3000	0.6000	PQ bus
20	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3000	1.0000	PQ bus
21	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
22	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
23	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.3000	2.1000	PQ bus
24	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
25	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.3000	3.2000	PQ bus
26	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
27	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.3000	0.5000	PQ bus

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
28	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.6000	2.3000	PQ bus
29	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	17.0000	2.6000	PQ bus
30	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.6000	1.8000	PQ bus
31	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.8000	2.9000	PQ bus
32	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.6000	0.8000	PQ bus
33	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.8000	1.9000	PQ bus
34	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
35	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.0000	3.0000	PQ bus
36	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
37	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
38	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.0000	7.0000	PQ bus
39	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
40	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
41	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.3000	3.0000	PQ bus
42	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.1000	4.4000	PQ bus
43	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0000	PQ bus
44	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.0000	1.8000	PQ bus
45	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
46	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
47	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.7000	11.6000	PQ bus
48	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
49	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	18.0000	8.5000	PQ bus
50	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.0000	10.5000	PQ bus
51	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	18.0000	5.3000	PQ bus
52	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.9000	2.2000	PQ bus
53	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.0000	10.0000	PQ bus
54	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.1000	1.4000	PQ bus

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
55	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.8000	3.4000	PQ bus
56	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.6000	2.2000	PQ bus
57	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.7000	2.0000	PQ bus

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	1	2	0.0083	0.0280	0.1290	1.0000
2	2	3	0.0298	0.0850	0.0818	1.0000
3	3	4	0.0112	0.0366	0.0380	1.0000
4	4	5	0.0625	0.1320	0.0258	1.0000
5	4	6	0.0430	0.1480	0.0348	1.0000
6	6	7	0.0200	0.1020	0.0276	1.0000
7	6	8	0.0339	0.1730	0.0470	1.0000
8	8	9	0.0099	0.0505	0.0548	1.0000
9	9	10	0.0369	0.1679	0.0440	1.0000
10	9	11	0.0258	0.0848	0.0218	1.0000
11	9	12	0.0648	0.2950	0.0772	1.0000
12	9	13	0.0481	0.1580	0.0406	1.0000
13	13	14	0.0132	0.0434	0.0110	1.0000
14	13	15	0.0269	0.0869	0.0230	1.0000
15	1	15	0.0178	0.0910	0.0988	1.0000
16	1	16	0.0454	0.2060	0.0546	1.0000
17	1	17	0.0238	0.1080	0.0286	1.0000
18	3	15	0.0162	0.0530	0.0544	1.0000
19	4	18	0.0000	0.5550	0.0000	0.9700

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
20	4	18	0.0000	0.4300	0.0000	0.9780
21	5	6	0.0302	0.0641	0.0124	1.0000
22	7	8	0.0139	0.0712	0.0194	1.0000
23	10	12	0.0277	0.1262	0.0328	1.0000
24	11	13	0.0223	0.0732	0.0188	1.0000
25	12	13	0.0178	0.0580	0.0604	1.0000
26	12	16	0.0180	0.0813	0.0216	1.0000
27	12	17	0.0397	0.1790	0.0476	1.0000
28	14	15	0.0171	0.0547	0.0148	1.0000
29	18	19	0.4610	0.6850	0.0000	1.0000
30	19	20	0.2830	0.4340	0.0000	1.0000
31	21	20	0.0000	0.7767	0.0000	1.0430
32	21	22	0.0736	0.1170	0.0000	1.0000
33	22	23	0.0099	0.0152	0.0000	1.0000
34	23	24	0.1660	0.2560	0.0084	1.0000
35	24	25	0.0000	1.1820	0.0000	1.0000
36	24	25	0.0000	1.2300	0.0000	1.0000
37	24	26	0.0000	0.0473	0.0000	1.0430
38	26	27	0.1650	0.2540	0.0000	1.0000
39	27	28	0.0618	0.0954	0.0000	1.0000
40	28	29	0.0418	0.0587	0.0000	1.0000
41	7	29	0.0000	0.0648	0.0000	0.9670
42	25	30	0.1350	0.2020	0.0000	1.0000
43	30	31	0.3260	0.4970	0.0000	1.0000
44	31	32	0.5070	0.7550	0.0000	1.0000
45	32	33	0.0392	0.0360	0.0000	1.0000
46	34	32	0.0000	0.9530	0.0000	0.9750

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
47	34	35	0.0520	0.0780	0.0032	1.0000
48	35	36	0.0430	0.0537	0.0016	1.0000
49	36	37	0.0290	0.0366	0.0000	1.0000
50	37	38	0.0651	0.1009	0.0020	1.0000
51	37	39	0.0239	0.0379	0.0000	1.0000
52	36	40	0.0300	0.0466	0.0000	1.0000
53	22	38	0.0192	0.0295	0.0000	1.0000
54	11	41	0.0000	0.7490	0.0000	0.9550
55	41	42	0.2070	0.3520	0.0000	1.0000
56	41	43	0.0000	0.4120	0.0000	1.0000
57	38	44	0.0289	0.0585	0.0020	1.0000
58	15	45	0.0000	0.1042	0.0000	0.9550
59	14	46	0.0000	0.0735	0.0000	0.9000
60	46	47	0.0230	0.0680	0.0032	1.0000
61	47	48	0.0182	0.0233	0.0000	1.0000
62	48	49	0.0834	0.1290	0.0048	1.0000
63	49	50	0.0801	0.1280	0.0000	1.0000
64	50	51	0.1386	0.2200	0.0000	1.0000
65	10	51	0.0000	0.0712	0.0000	0.9300
66	13	49	0.0000	0.1910	0.0000	0.8950
67	29	52	0.1442	0.1870	0.0000	1.0000
68	52	53	0.0762	0.0984	0.0000	1.0000
69	53	54	0.1878	0.2320	0.0000	1.0000
70	54	55	0.1732	0.2265	0.0000	1.0000
71	11	43	0.0000	0.1530	0.0000	0.9580
72	44	45	0.0624	0.1242	0.0040	1.0000
73	40	56	0.0000	1.1950	0.0000	0.9580

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
74	56	41	0.5530	0.5490	0.0000	1.0000
75	56	42	0.2125	0.3540	0.0000	1.0000
76	39	57	0.0000	1.3550	0.0000	0.9800
77	57	56	0.1740	0.2600	0.0000	1.0000
78	38	49	0.1150	0.1770	0.0060	1.0000
79	38	48	0.0312	0.0482	0.0000	1.0000
80	9	55	0.0000	0.1205	0.0000	0.9400

ก.5 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส

ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 135 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA ข้อมูลบัสและข้อมูลสายส่ง ดังตารางที่ ก.9 และตารางที่ ก.10 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
1	1.0000	0.0000	10.6700	0.0000	0.0000	51.0000	Slack bus
2	1.0000	0.0000	11.2200	0.0000	0.0000	20.0000	PQ bus
3	1.0000	0.0000	11.5600	0.0000	0.0000	39.0000	PQ bus
4	1.0000	0.0000	15.2800	0.0000	0.0000	39.0000	PQ bus
5	1.0000	0.0000	15.7300	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
6	1.0000	0.0000	13.0000	0.0000	0.0000	52.0000	PQ bus
7	1.0000	0.0000	12.5600	0.0000	0.0000	19.0000	PQ bus
8	1.0000	0.0000	20.7700	0.0000	0.0000	28.0000	PQ bus
9	1.0000	0.0000	28.0200	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
10	1.0000	0.0000	35.6100	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
11	1.0000	0.0000	12.7200	0.0000	0.0000	70.0000	PQ bus
12	1.0000	0.0000	12.2000	0.0000	0.0000	47.0000	PQ bus

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
13	1.0000	0.0000	11.3500	0.0000	0.0000	34.0000	PQ bus
14	1.0000	0.0000	11.5000	0.0000	0.0000	14.0000	PQ bus
15	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	90.0000	30.0000	PQ bus
16	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	25.0000	10.0000	PQ bus
17	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.0000	3.0000	PQ bus
18	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	60.0000	34.0000	PQ bus
19	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	45.0000	25.0000	PQ bus
20	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	18.0000	3.0000	PQ bus
21	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.0000	8.0000	PQ bus
22	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.0000	5.0000	PQ bus
23	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.0000	3.0000	PQ bus
24	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.0000	0.0000	PQ bus
25	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
26	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
27	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	71.0000	13.0000	PQ bus
43	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	17.0000	7.0000	PQ bus
44	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.0000	4.0000	PQ bus
45	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
46	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	43.0000	27.0000	PQ bus
47	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	59.0000	23.0000	PQ bus
48	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	23.0000	9.0000	PQ bus
49	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	59.0000	26.0000	PQ bus
50	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.0000	9.0000	PQ bus
51	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	31.0000	17.0000	PQ bus
52	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
53	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
54	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0000	11.0000	PQ bus

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
55	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	66.0000	23.0000	PQ bus
56	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	37.0000	10.0000	PQ bus
57	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.0000	3.0000	PQ bus
58	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.0000	3.0000	PQ bus
59	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	277.0000	113.0000	PQ bus
60	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	78.0000	3.0000	PQ bus
61	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
62	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	77.0000	14.0000	PQ bus
63	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
64	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
65	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
66	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	39.0000	18.0000	PQ bus
67	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.0000	7.0000	PQ bus
68	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
69	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
70	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	66.0000	20.0000	PQ bus
71	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
72	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.0000	0.0000	PQ bus
73	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.0000	0.0000	PQ bus
74	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	68.0000	27.0000	PQ bus
75	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	47.0000	11.0000	PQ bus
76	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	68.0000	36.0000	PQ bus
77	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	61.0000	28.0000	PQ bus
78	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	71.0000	26.0000	PQ bus
79	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	39.0000	32.0000	PQ bus
80	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	130.0000	26.0000	PQ bus
81	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
82	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	54.0000	27.0000	PQ bus
83	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.0000	10.0000	PQ bus
84	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.0000	7.0000	PQ bus
85	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.0000	15.0000	PQ bus
86	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.0000	10.0000	PQ bus
87	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
88	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	48.0000	10.0000	PQ bus
89	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
90	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	163.0000	42.0000	PQ bus
91	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.0000	0.0000	PQ bus
92	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	65.0000	10.0000	PQ bus
93	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.0000	7.0000	PQ bus
94	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.0000	16.0000	PQ bus
95	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	42.0000	31.0000	PQ bus
96	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	38.0000	15.0000	PQ bus
97	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000	9.0000	PQ bus
98	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	34.0000	8.0000	PQ bus
99	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	42.0000	0.0000	PQ bus
100	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	37.0000	18.0000	PQ bus
101	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.0000	15.0000	PQ bus
102	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.0000	3.0000	PQ bus
103	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	23.0000	16.0000	PQ bus
104	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	38.0000	25.0000	PQ bus
105	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	31.0000	26.0000	PQ bus
106	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	43.0000	16.0000	PQ bus
107	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	50.0000	12.0000	PQ bus
108	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0000	PQ bus

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
109	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.0000	3.0000	PQ bus
110	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	39.0000	30.0000	PQ bus
111	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
112	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	68.0000	13.0000	PQ bus
113	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.0000	0.0000	PQ bus
114	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.0000	3.0000	PQ bus
115	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.0000	7.0000	PQ bus
116	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	184.0000	0.0000	PQ bus
117	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.0000	8.0000	PQ bus
118	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.0000	15.0000	PQ bus

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	1	2	0.0303	0.0999	0.0254	1.0000
2	1	3	0.0129	0.0424	0.0108	1.0000
3	4	5	0.0018	0.0080	0.0021	1.0000
4	3	5	0.0241	0.1080	0.0284	1.0000
5	5	6	0.0119	0.0540	0.0143	1.0000
6	6	7	0.0046	0.0208	0.0055	1.0000
7	8	9	0.0024	0.0305	1.1620	1.0000
8	8	5	0.0000	0.0267	0.0000	0.9850
9	9	10	0.0026	0.0322	1.2300	1.0000
10	4	11	0.0209	0.0688	0.0175	1.0000
11	5	11	0.0203	0.0682	0.0174	1.0000
12	11	12	0.0060	0.0196	0.0050	1.0000

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
13	2	12	0.0187	0.0616	0.0157	1.0000
14	3	12	0.0484	0.1600	0.0406	1.0000
15	7	12	0.0086	0.0340	0.0087	1.0000
16	11	13	0.0222	0.0731	0.0188	1.0000
17	12	14	0.0215	0.0707	0.0182	1.0000
18	13	15	0.0744	0.2444	0.0627	1.0000
19	14	15	0.0595	0.1950	0.0502	1.0000
20	12	16	0.0212	0.0834	0.0214	1.0000
21	15	17	0.0132	0.0437	0.0444	1.0000
22	16	17	0.0454	0.1801	0.0466	1.0000
23	17	18	0.0123	0.0505	0.0130	1.0000
24	18	19	0.0112	0.0493	0.0114	1.0000
25	19	20	0.0252	0.1170	0.0298	1.0000
26	15	19	0.0120	0.0394	0.0101	1.0000
27	20	21	0.0183	0.0849	0.0216	1.0000
28	21	22	0.0209	0.0970	0.0246	1.0000
29	22	23	0.0342	0.1590	0.0404	1.0000
30	23	24	0.0135	0.0492	0.0498	1.0000
31	23	25	0.0156	0.0800	0.0864	1.0000
32	26	25	0.0000	0.0382	0.0000	0.9600
33	12	14	0.0215	0.0707	0.0182	1.0000
34	13	15	0.0744	0.2444	0.0627	1.0000
35	14	15	0.0595	0.1950	0.0502	1.0000
36	12	16	0.0212	0.0834	0.0214	0.9600
37	15	17	0.0132	0.0437	0.0444	1.0000
38	16	17	0.0454	0.1801	0.0466	1.0000
39	17	18	0.0123	0.0505	0.0130	1.0000

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
40	18	19	0.0112	0.0493	0.0114	1.0000
41	19	20	0.0252	0.1170	0.0298	1.0000
42	15	19	0.0120	0.0394	0.0101	1.0000
43	20	21	0.0183	0.0849	0.0216	1.0000
44	15	33	0.0380	0.1244	0.0319	1.0000
45	19	34	0.0752	0.2470	0.0632	1.0000
46	35	36	0.0022	0.0102	0.0027	1.0000
47	35	37	0.0110	0.0497	0.0132	1.0000
48	33	37	0.0415	0.1420	0.0366	1.0000
49	34	36	0.0087	0.0268	0.0057	1.0000
50	34	37	0.0026	0.0094	0.0098	1.0000
51	38	37	0.0000	0.0375	0.0000	0.9350
52	37	39	0.0321	0.1060	0.0270	1.0000
53	37	40	0.0593	0.1680	0.0420	1.0000
54	30	38	0.0046	0.0540	0.4220	1.0000
55	39	40	0.0184	0.0605	0.0155	1.0000
56	40	41	0.0145	0.0487	0.0122	1.0000
57	40	42	0.0555	0.1830	0.0466	1.0000
58	41	42	0.0410	0.1350	0.0344	1.0000
59	43	44	0.0608	0.2454	0.0607	1.0000
60	15	33	0.0380	0.1244	0.0319	1.0000
61	19	34	0.0752	0.2470	0.0632	1.0000
62	35	36	0.0022	0.0102	0.0027	1.0000
63	35	37	0.0110	0.0497	0.0132	1.0000
64	33	37	0.0415	0.1420	0.0366	1.0000
65	34	36	0.0087	0.0268	0.0057	1.0000
66	34	37	0.0026	0.0094	0.0098	1.0000

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
67	38	37	0.0000	0.0375	0.0000	0.935
68	37	39	0.0321	0.1060	0.0270	1.0000
69	37	40	0.0593	0.1680	0.0420	1.0000
70	30	38	0.0046	0.0540	0.4220	1.0000
71	49	51	0.0486	0.1370	0.0342	1.0000
72	51	52	0.0203	0.0588	0.0140	1.0000
73	52	53	0.0405	0.1635	0.0406	1.0000
74	53	54	0.0263	0.1220	0.0310	1.0000
75	49	54	0.0730	0.2890	0.0738	1.0000
76	49	54	0.0869	0.2910	0.0730	1.0000
77	54	55	0.0169	0.0707	0.0202	1.0000
78	54	56	0.0027	0.0095	0.0073	1.0000
79	55	56	0.0049	0.0151	0.0037	1.0000
80	56	57	0.0343	0.0966	0.0242	1.0000
81	50	57	0.0474	0.1340	0.0332	1.0000
82	56	58	0.0343	0.0966	0.0242	1.0000
83	51	58	0.0255	0.0719	0.0179	1.0000
84	54	59	0.0503	0.2293	0.0598	1.0000
85	56	59	0.0825	0.2510	0.0569	1.0000
86	56	59	0.0803	0.2390	0.0536	1.0000
87	49	51	0.0486	0.1370	0.0342	1.0000
88	51	52	0.0203	0.0588	0.0140	1.0000
89	52	53	0.0405	0.1635	0.0406	1.0000
90	53	54	0.0263	0.1220	0.0310	1.0000
91	49	54	0.0730	0.2890	0.0738	1.0000
92	49	54	0.0869	0.2910	0.0730	1.0000
93	54	55	0.0169	0.0707	0.0202	0.9600

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
94	54	56	0.0027	0.0095	0.0073	1.0000
95	55	56	0.0049	0.0151	0.0037	0.9850
96	56	57	0.0343	0.0966	0.0242	1.0000
97	50	57	0.0474	0.1340	0.0332	1.0000
98	49	66	0.0180	0.0919	0.0248	1.0000
99	49	66	0.0180	0.0919	0.0248	1.0000
100	62	66	0.0482	0.2180	0.0578	1.0000
101	62	67	0.0258	0.1170	0.0310	1.0000
102	65	66	0.0000	0.0370	0.0000	0.9350
103	66	67	0.0224	0.1015	0.0268	1.0000
104	65	68	0.0014	0.0160	0.6380	1.0000
105	47	69	0.0844	0.2778	0.0709	1.0000
106	49	69	0.0985	0.3240	0.0828	1.0000
107	68	69	0.0000	0.0370	0.0000	0.9350
108	69	70	0.0300	0.1270	0.1220	1.0000
109	24	70	0.0022	0.4115	0.1020	1.0000
110	70	71	0.0088	0.0355	0.0088	1.0000
111	24	72	0.0488	0.1960	0.0488	1.0000
112	71	72	0.0446	0.1800	0.0444	1.0000
113	71	73	0.0087	0.0454	0.0118	1.0000
114	49	66	0.0180	0.0919	0.0248	1.0000
115	49	66	0.0180	0.0919	0.0248	1.0000
116	62	66	0.0482	0.2180	0.0578	1.0000
117	62	67	0.0258	0.1170	0.0310	1.0000
118	65	66	0.0000	0.0370	0.0000	1.0000
119	66	67	0.0224	0.1015	0.0268	1.0000
120	65	68	0.0014	0.0160	0.6380	1.0000

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
121	47	69	0.0844	0.2778	0.0709	1.0000
122	49	69	0.0985	0.3240	0.0828	1.0000
123	68	69	0.0000	0.0370	0.0000	0.935
124	69	70	0.0300	0.1270	0.1220	1.0000
125	79	80	0.0156	0.0704	0.0187	1.0000
126	68	81	0.0018	0.0202	0.8080	1.0000
127	81	80	0.0000	0.0370	0.0000	0.9350
128	77	82	0.0298	0.0853	0.0817	1.0000
129	82	83	0.0112	0.0367	0.0380	1.0000
130	83	84	0.0625	0.1320	0.0258	1.0000
131	83	85	0.0430	0.1480	0.0348	1.0000
132	84	85	0.0302	0.0641	0.0123	1.0000
133	85	86	0.0350	0.1230	0.0276	1.0000
134	86	87	0.0283	0.2074	0.0445	1.0000
135	85	88	0.0200	0.1020	0.0276	1.0000
136	85	89	0.0239	0.1730	0.0470	1.0000
137	88	89	0.0139	0.0712	0.0193	1.0000
138	89	90	0.0518	0.1880	0.0528	1.0000
139	89	90	0.0238	0.0997	0.1060	1.0000
140	90	91	0.0254	0.0836	0.0214	1.0000
141	79	80	0.0156	0.0704	0.0187	1.0000
142	68	81	0.0018	0.0202	0.8080	1.0000
143	81	80	0.0000	0.0370	0.0000	1.0000
144	77	82	0.0298	0.0853	0.0817	1.0000
145	82	83	0.0112	0.0367	0.0380	1.0000
146	83	84	0.0625	0.1320	0.0258	1.0000
147	83	85	0.0430	0.1480	0.0348	1.0000

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
148	84	85	0.0302	0.0641	0.0123	1.0000
149	85	86	0.0350	0.1230	0.0276	1.0000
150	86	87	0.0283	0.2074	0.0445	1.0000
151	85	88	0.0200	0.1020	0.0276	1.0000
152	80	98	0.0238	0.1080	0.0286	1.0000
153	80	99	0.0454	0.2060	0.0546	1.0000
154	92	100	0.0648	0.2950	0.0472	1.0000
155	94	100	0.0178	0.0580	0.0604	1.0000
156	95	96	0.0171	0.0547	0.0147	1.0000
157	96	97	0.0173	0.0885	0.0240	1.0000
158	98	100	0.0397	0.1790	0.0476	1.0000
159	99	100	0.0180	0.0813	0.0216	1.0000
160	100	101	0.0277	0.1262	0.0328	1.0000
161	92	102	0.0123	0.0559	0.0146	1.0000
162	101	102	0.0246	0.1120	0.0294	1.0000
163	100	103	0.0160	0.0525	0.0536	1.0000
164	100	104	0.0451	0.2040	0.0541	1.0000
165	103	104	0.0466	0.1584	0.0407	1.0000
166	103	105	0.0535	0.1625	0.0408	1.0000
167	100	106	0.0605	0.2290	0.0620	1.0000
168	80	98	0.0238	0.1080	0.0286	1.0000
169	80	99	0.0454	0.2060	0.0546	1.0000
170	92	100	0.0648	0.2950	0.0472	1.0000
171	94	100	0.0178	0.0580	0.0604	1.0000
172	95	96	0.0171	0.0547	0.0147	1.0000
173	96	97	0.0173	0.0885	0.0240	1.0000
174	98	100	0.0397	0.1790	0.0476	1.0000

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
175	99	100	0.0180	0.0813	0.0216	1.0000
176	100	101	0.0277	0.1262	0.0328	1.0000
177	92	102	0.0123	0.0559	0.0146	1.0000
178	101	102	0.0246	0.1120	0.0294	1.0000
179	32	113	0.0615	0.2030	0.0518	1.0000
180	32	114	0.0135	0.0612	0.0163	1.0000
181	27	115	0.0164	0.0741	0.0197	1.0000
182	114	115	0.0023	0.0104	0.0028	1.0000
183	68	116	0.0003	0.0040	0.1640	1.0000
184	12	117	0.0329	0.1400	0.0358	1.0000
185	75	118	0.0145	0.0481	0.0120	1.0000
186	76	118	0.0164	0.0544	0.0136	1.0000

ก.6 ระบบทดสอบนครราชสีมา 2 (9 บัส)

ระบบทดสอบนครราชสีมา 2 (9 บัส) ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA มีข้อมูลบัสและข้อมูลสายส่ง ดังตารางที่ ก.11 และตารางที่ ก.12 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบนครราชสีมา 2 (9 บัส)

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ bus
2	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.0000	4.0000	PQ bus
3	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	56.0000	24.0000	PQ bus
4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.0000	3.0000	PQ bus
5	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.0000	13.0000	PQ bus
6	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0000	20.0000	PQ bus
7	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.0000	3.0000	PQ bus

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบบนกรรราชสีมา 2 (9 บัส) (ต่อ)

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load		Bus type
			kW	kVar	kW	kVar	
8	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.0000	9.0000	PQ bus
9	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	Slack bus

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบบนกรรราชสีมา 2 (9 บัส)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	9	2	0.0026	0.0162	0.0023	1.0000
2	9	1	0.0019	0.0115	0.0017	1.0000
3	2	3	0.0049	0.0304	0.0043	1.0000
4	3	4	0.0005	0.0024	0.0003	1.0000
5	3	5	0.0104	0.0648	0.0092	1.0000
6	1	7	0.0008	0.0047	0.0006	1.0000
7	7	8	0.0014	0.0089	0.0013	1.0000
8	1	5	0.0111	0.0688	0.0096	1.0000
9	5	6	0.0156	0.0972	0.0137	1.0000

ก.7 ระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส

ระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า 500 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 300 kVA มีข้อมูลบัสและข้อมูลสายส่ง ดังตารางที่ ก.13 และตารางที่ ก.14 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส

Bus	Magnitude Voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load	
			kW	kVar	kW	kVar
1	1.0113	-8.9300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	1.0185	-7.0800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	1.0175	-13.0200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	1.0111	-13.8900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	1.0121	-13.1700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	1.0100	-16.8100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	1.0050	-11.9600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	1.0100	-11.4300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	1.0096	-11.5200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	1.0047	-11.5300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	1.0096	-11.5200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	1.0058	-17.7600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	1.0095	-11.5200	0.0000	0.0000	-10.7918	60.5662
14	0.9808	-17.3200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	1.0191	-10.6900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16	0.9805	-18.7800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	1.0150	-12.8700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18	1.0121	-13.1500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	1.0132	-16.1400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	1.0050	-11.3400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	1.0052	-15.8900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	1.0051	-11.6100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude Voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load	
			kW	kVar	kW	kVar
23	1.0060	-16.4600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	50.0000	4.7500
25	1.0261	-21.9800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	0.9748	-27.9700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27	1.0066	-18.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	1.0178	-17.8900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29	1.0067	-18.3000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30	1.0055	-19.0600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
31	1.0386	-12.4800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
32	1.0131	-16.3200	0.0000	0.0000	206.1451	77.7449
33	1.0251	-21.7100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34	1.0093	-15.9700	0.0000	0.0000	161.0452	95.8872
35	1.0150	-21.3300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
36	1.0212	-16.0700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
37	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
38	1.0250	-21.6200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
39	1.0263	-21.6400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	1.0250	-21.7200	0.0000	0.0000	110.4485	29.7691
41	1.0256	-21.6700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
42	1.0270	-16.0100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
43	1.0145	-9.5300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
44	1.0172	-8.2300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
45	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
46	1.0074	-12.7400	0.0000	0.0000	152.7368	59.1346
47	1.0195	-16.1800	0.0000	0.0000	200.6391	91.3998
48	1.0078	-12.7300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
49	1.0147	-12.4200	0.0000	0.0000	133.0253	101.7511

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude Voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load	
			kW	kVar	kW	kVar
50	1.0194	-10.9900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
51	1.0078	-12.7300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
52	1.0152	-17.7900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
53	1.0150	-17.8300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
54	1.0210	-17.3700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
55	1.0093	-12.3400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
56	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	50.0000	15.0000
57	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	80.0000	30.0000
58	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	70.0000	20.0000
59	1.0131	-16.3200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
60	1.0131	-16.3200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
61	1.0206	-10.6400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
62	1.0215	-10.3800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
63	1.0218	-10.3300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
64	1.0078	-12.7300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
65	1.0206	-10.6400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
66	0.9823	-20.3300	0.0000	0.0000	72.5927	14.7147
67	1.0229	-15.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
68	0.9823	-20.3300	0.0000	0.0000	127.2990	77.5246
69	1.0250	-14.0200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
70	0.9999	-18.8600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
71	0.9959	-25.6100	0.0000	0.0000	12.7739	1.8720
72	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.8670	4.9330
73	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.8670	4.9330
74	1.0143	-20.7100	0.0000	0.0000	8.2590	5.5060
75	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	43.0050	17.3140
76	1.0122	-22.6300	0.0000	0.0000	14.2055	9.1400

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude Voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load	
			kW	kVar	kW	kVar
77	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.8470	1.5250
78	0.9942	-20.7900	0.0000	0.0000	19.0508	6.7173
79	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.6730	3.7380
80	1.0233	-22.9600	0.0000	0.0000	30.9438	16.4079
81	1.0196	-21.4000	0.0000	0.0000	14.8662	3.7441
82	1.0146	-23.9100	0.0000	0.0000	29.7325	9.4703
83	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	16.3470	8.7180
84	1.0141	-17.2800	0.0000	0.0000	5.7263	2.6429
85	1.0232	-18.4800	0.0000	0.0000	13.7650	4.5149
86	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.9880	7.0840
87	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.9150	7.7540
88	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.3550	3.4300
89	1.0263	-23.1100	0.0000	0.0000	24.6669	9.6906
90	1.0231	-24.6800	0.0000	0.0000	33.4766	17.8395
91	1.0248	-24.2200	0.0000	0.0000	29.8426	17.2889
92	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.1870	5.9940
93	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.2540	12.0440
94	1.0221	-21.4700	0.0000	0.0000	16.9585	10.7918
95	1.0225	-20.6100	0.0000	0.0000	15.7472	7.1578
96	1.0169	-17.9600	0.0000	0.0000	0.0000	3.7441
97	1.0197	-21.3700	0.0000	0.0000	5.1120	2.4760
98	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.8573	0.0000
99	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
100	1.0203	-20.9800	0.0000	0.0000	20.2621	8.0388
101	1.0251	-27.1800	0.0000	0.0000	17.9496	11.5626
102	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
103	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.1120	2.4760

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude Voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load	
			kW	kVar	kW	kVar
104	1.0121	-13.1700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
105	1.0030	-25.2200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
106	1.0123	-22.1800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
107	1.0040	-23.6300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
108	1.0167	-18.8500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
109	1.0122	-18.0700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110	1.0167	-16.8600	0.0000	0.0000	91.2897	38.7623
111	1.0143	-17.9600	0.0000	0.0000	415.0433	272.9882
112	1.0083	-19.1500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
113	1.0208	-16.4300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
114	1.0163	-12.4400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
115	0.9924	-19.6300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
116	0.9952	-20.0700	0.0000	0.0000	11.7829	3.3036
117	1.0089	-21.7700	0.0000	0.0000	167.9334	39.9736
118	1.0243	-14.9300	0.0000	0.0000	335.6465	180.9276
119	1.0165	-23.0000	0.0000	0.0000	597.4283	300.5401
120	1.0237	-22.3800	0.0000	0.0000	256.2499	143.4867
121	1.0212	-16.0700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
122	1.0262	-21.5900	0.0000	0.0000	19.1609	13.3246
123	1.0142	-24.8900	0.0000	0.0000	38.5421	13.3246
124	1.0108	-20.8000	0.0000	0.0000	12.9942	7.4882
125	1.0237	-23.1000	0.0000	0.0000	27.4199	14.8662
126	1.0200	-22.8000	0.0000	0.0000	28.6313	11.7829
127	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	44.4910	16.1430
128	1.0159	-19.3800	0.0000	0.0000	16.8484	3.9643
129	1.0163	-23.8500	0.0000	0.0000	12.2234	2.3125
130	1.0231	-23.6500	0.0000	0.0000	12.2234	4.2947

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Bus	Magnitude Voltage (p.u.)	Angle (degree)	Generation		Load	
			kW	kVar	kW	kVar
131	1.0249	-31.9700	0.0000	0.0000	13.4347	6.4971
132	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.8560	2.0140
133	1.0111	-24.0400	0.0000	0.0000	29.4021	10.5715
134	1.0207	-24.6300	0.0000	0.0000	20.1520	8.8096
135	1.0108	-27.1100	0.0000	0.0000	36.6700	15.1966
136	1.0148	-27.2800	0.0000	0.0000	10.9019	7.7084
137	1.0257	-27.2800	0.0000	0.0000	11.0120	3.8542
138	1.0171	-16.8600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
139	1.0000	-0.8900	659.8000	149.7055	0.0000	0.0000
140	0.9850	-13.0600	326.6000	22.9596	22.9910	11.1360
141	0.9850	-13.0600	326.6000	22.9596	23.7460	11.5000
142	1.0000	0.0000	280.0000	55.1866	17.4410	8.1210
143	1.0018	-13.4900	330.0000	97.5575	17.3950	8.0990
144	1.0200	-10.1400	332.5000	78.8610	0.0000	0.0000
145	1.0300	-5.4000	339.2000	43.3504	0.0000	0.0000
146	1.0300	-5.4000	339.2000	43.3504	0.0000	0.0000
147	1.0000	-0.8900	659.8000	149.7056	0.0000	0.0000

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบระบบไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
1	1	2	0.0000	0.2643	0.0000	0.9709
2	1	2	0.0000	0.2625	0.0000	0.9422
3	59	60	0.0000	0.0736	0.0000	0.9875
4	147	2	0.0000	0.0688	0.0000	0.9750
5	139	2	0.0006	0.0685	0.0000	0.9750
6	15	1	0.0000	0.2700	0.0000	0.9996

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบระบบไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
7	15	1	0.0000	0.2759	0.0000	0.9852
8	34	15	0.0000	0.2400	0.0000	1.0000
9	34	15	0.0000	0.1300	0.0000	1.0000
10	34	15	0.0000	0.4920	0.0000	1.0000
11	5	104	0.0000	0.0685	0.0000	0.9875
12	5	8	0.0000	0.0714	0.0000	0.9875
13	5	8	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
14	5	10	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
15	5	10	0.0026	0.0279	0.0542	1.0000
16	6	104	0.0025	0.0279	0.0542	1.0000
17	6	12	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
18	6	12	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
19	6	23	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
20	104	17	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
21	104	17	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
22	104	18	0.0036	0.0399	0.0763	1.0000
23	104	18	0.0036	0.0398	0.0763	1.0000
24	104	21	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
25	104	21	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
26	104	23	0.0005	0.0061	0.3025	1.0000
27	104	23	0.0009	0.0157	0.7962	1.0000
28	104	23	0.0010	0.0169	0.9605	1.0000
29	104	23	0.0011	0.0182	0.9196	1.0000
30	7	11	0.0011	0.0192	1.0877	1.0000
31	7	8	0.0000	0.0321	0.0000	1.0125
32	7	10	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
33	7	10	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบระบบไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
34	7	22	0.0000	0.2643	0.0000	0.9709
35	7	22	0.0000	0.2625	0.0000	0.9422
36	8	11	0.0000	0.0736	0.0000	0.9875
37	8	11	0.0000	0.0688	0.0000	0.9750
38	8	11	0.0006	0.0685	0.0000	0.9750
39	9	13	0.0000	0.2700	0.0000	0.9996
40	9	24	0.0000	0.2759	0.0000	0.9852
41	9	11	0.0000	0.2400	0.0000	1.0000
42	10	20	0.0000	0.1300	0.0000	1.0000
43	10	20	0.0000	0.4920	0.0000	1.0000
44	11	15	0.0000	0.0685	0.0000	0.9875
45	11	15	0.0000	0.0714	0.0000	0.9875
46	11	13	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
47	11	13	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
48	11	14	0.0026	0.0279	0.0542	1.0000
49	11	14	0.0025	0.0279	0.0542	1.0000
50	12	19	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
51	12	19	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
52	12	23	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
53	16	23	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
54	16	23	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
55	21	23	0.0036	0.0399	0.0763	1.0000
56	21	23	0.0036	0.0398	0.0763	1.0000
57	108	25	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
58	108	28	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
59	108	28	0.0005	0.0061	0.3025	1.0000
60	108	37	0.0009	0.0157	0.7962	1.0000

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบระบบไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
61	25	120	0.0010	0.0169	0.9605	1.0000
62	25	33	0.0011	0.0182	0.9196	1.0000
63	25	37	0.0011	0.0192	1.0877	1.0000
64	26	120	0.0000	0.0321	0.0000	1.0125
65	26	120	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
66	26	33	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
67	28	27	0.0000	0.2643	0.0000	0.9709
68	28	27	0.0000	0.2625	0.0000	0.9422
69	27	109	0.0000	0.0736	0.0000	0.9875
70	109	110	0.0000	0.0688	0.0000	0.9750
71	109	111	0.0006	0.0685	0.0000	0.9750
72	109	111	0.0000	0.2700	0.0000	0.9996
73	110	118	0.0000	0.2759	0.0000	0.9852
74	110	118	0.0000	0.2400	0.0000	1.0000
75	111	112	0.0000	0.1300	0.0000	1.0000
76	111	112	0.0000	0.4920	0.0000	1.0000
77	111	31	0.0000	0.0685	0.0000	0.9875
78	111	31	0.0000	0.0714	0.0000	0.9875
79	111	52	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
80	111	53	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
81	111	54	0.0026	0.0279	0.0542	1.0000
82	112	30	0.0025	0.0279	0.0542	1.0000
83	112	30	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
84	29	70	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
85	29	113	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
86	29	113	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
87	29	30	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบระบบไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
88	29	30	0.0036	0.0399	0.0763	1.0000
89	113	115	0.0036	0.0398	0.0763	1.0000
90	113	115	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
91	113	121	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
92	113	121	0.0005	0.0061	0.3025	1.0000
93	113	42	0.0009	0.0157	0.7962	1.0000
94	113	42	0.0010	0.0169	0.9605	1.0000
95	114	121	0.0011	0.0182	0.9196	1.0000
96	114	36	0.0011	0.0192	1.0877	1.0000
97	114	45	0.0000	0.0321	0.0000	1.0125
98	114	45	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
99	114	46	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
100	114	49	0.0000	0.2643	0.0000	0.9709
101	114	58	0.0000	0.2625	0.0000	0.9422
102	115	116	0.0000	0.0736	0.0000	0.9875
103	115	68	0.0000	0.0688	0.0000	0.9750
104	116	117	0.0006	0.0685	0.0000	0.9750
105	116	121	0.0000	0.2700	0.0000	0.9996
106	116	121	0.0000	0.2759	0.0000	0.9852
107	117	71	0.0000	0.2400	0.0000	1.0000
108	117	35	0.0000	0.1300	0.0000	1.0000
109	117	121	0.0000	0.4920	0.0000	1.0000
110	117	121	0.0000	0.0685	0.0000	0.9875
111	118	69	0.0000	0.0714	0.0000	0.9875
112	119	56	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
113	119	59	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
114	32	59	0.0026	0.0279	0.0542	1.0000

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบระบบไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
115	120	33	0.0025	0.0279	0.0542	1.0000
116	120	33	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
117	102	132	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
118	33	38	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
119	33	39	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
120	33	40	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
121	33	41	0.0036	0.0399	0.0763	1.0000
122	121	36	0.0036	0.0398	0.0763	1.0000
123	121	47	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
124	38	40	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
125	43	45	0.0005	0.0061	0.3025	1.0000
126	43	45	0.0009	0.0157	0.7962	1.0000
127	49	50	0.0010	0.0169	0.9605	1.0000
128	50	61	0.0011	0.0182	0.9196	1.0000
129	52	53	0.0011	0.0192	1.0877	1.0000
130	61	62	0.0000	0.0321	0.0000	1.0125
131	61	65	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
132	62	62	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
133	72	73	0.0000	0.2643	0.0000	0.9709
134	51	64	0.0000	0.2625	0.0000	0.9422
135	48	51	0.0000	0.0736	0.0000	0.9875
136	46	48	0.0000	0.0688	0.0000	0.9750
137	46	55	0.0006	0.0685	0.0000	0.9750
138	46	57	0.0000	0.2700	0.0000	0.9996
139	66	68	0.0000	0.2759	0.0000	0.9852
140	47	67	0.0000	0.2400	0.0000	1.0000
141	44	22	0.0000	0.1300	0.0000	1.0000

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบระบบไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
142	44	22	0.0000	0.4920	0.0000	1.0000
143	43	22	0.0000	0.0685	0.0000	0.9875
144	43	22	0.0000	0.0714	0.0000	0.9875
145	118	10	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
146	118	10	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
147	118	10	0.0026	0.0279	0.0542	1.0000
148	118	10	0.0025	0.0279	0.0542	1.0000
149	111	104	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
150	111	104	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
151	111	104	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
152	120	16	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
153	120	16	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
154	28	23	0.0036	0.0399	0.0763	1.0000
155	28	23	0.0036	0.0398	0.0763	1.0000
156	32	21	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
157	32	21	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
158	32	21	0.0005	0.0061	0.3025	1.0000
159	119	12	0.0009	0.0157	0.7962	1.0000
160	119	12	0.0010	0.0169	0.9605	1.0000
161	119	12	0.0011	0.0182	0.9196	1.0000
162	119	12	0.0011	0.0192	1.0877	1.0000
163	31	18	0.0000	0.0321	0.0000	1.0125
164	31	18	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
165	117	14	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
166	117	14	0.0000	0.2643	0.0000	0.9709
167	26	131	0.0000	0.2625	0.0000	0.9422
168	26	132	0.0000	0.0736	0.0000	0.9875

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบระบบไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
169	112	75	0.0000	0.0688	0.0000	0.9750
170	112	123	0.0006	0.0685	0.0000	0.9750
171	112	125	0.0000	0.2700	0.0000	0.9996
172	110	127	0.0000	0.2759	0.0000	0.9852
173	110	128	0.0000	0.2400	0.0000	1.0000
174	110	138	0.0000	0.1300	0.0000	1.0000
175	31	103	0.0000	0.4920	0.0000	1.0000
176	142	6	0.0000	0.0685	0.0000	0.9875
177	143	6	0.0000	0.0714	0.0000	0.9875
178	140	23	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
179	141	23	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
180	111	77	0.0026	0.0279	0.0542	1.0000
181	111	95	0.0025	0.0279	0.0542	1.0000
182	111	96	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
183	30	94	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
184	30	97	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
185	30	98	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
186	70	122	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
187	70	124	0.0036	0.0399	0.0763	1.0000
188	29	74	0.0036	0.0398	0.0763	1.0000
189	29	76	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
190	120	101	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
191	116	90	0.0005	0.0061	0.3025	1.0000
192	116	91	0.0009	0.0157	0.7962	1.0000
193	117	134	0.0010	0.0169	0.9605	1.0000
194	117	135	0.0011	0.0182	0.9196	1.0000
195	117	93	0.0011	0.0192	1.0877	1.0000

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบระบบไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
196	115	133	0.0000	0.0321	0.0000	1.0125
197	115	89	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
198	121	86	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
199	121	87	0.0000	0.2643	0.0000	0.9709
200	121	88	0.0000	0.2625	0.0000	0.9422
201	71	136	0.0000	0.0736	0.0000	0.9875
202	71	137	0.0000	0.0688	0.0000	0.9750
203	71	92	0.0006	0.0685	0.0000	0.9750
204	25	129	0.0000	0.2700	0.0000	0.9996
205	25	130	0.0000	0.2759	0.0000	0.9852
206	25	83	0.0000	0.2400	0.0000	1.0000
207	109	78	0.0000	0.1300	0.0000	1.0000
208	109	79	0.0000	0.4920	0.0000	1.0000
209	109	100	0.0000	0.0685	0.0000	0.9875
210	108	81	0.0000	0.0714	0.0000	0.9875
211	108	82	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
212	108	99	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
213	27	126	0.0026	0.0279	0.0542	1.0000
214	27	80	0.0025	0.0279	0.0542	1.0000
215	36	7	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
216	114	7	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
217	114	7	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
218	113	84	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
219	113	85	0.0022	0.0240	0.0457	1.0000
220	63	72	0.0036	0.0399	0.0763	1.0000
221	63	73	0.0036	0.0398	0.0763	1.0000
222	110	100	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบระบบไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Half-line charging	Tab setting value
223	121	7	0.0004	0.0055	0.2752	1.0000
224	121	7	0.0005	0.0061	0.3025	1.0000
225	105	23	0.0009	0.0157	0.7962	1.0000
226	105	23	0.0010	0.0169	0.9605	1.0000
227	105	23	0.0011	0.0182	0.9196	1.0000
228	105	23	0.0011	0.0192	1.0877	1.0000
229	106	6	0.0000	0.0321	0.0000	1.0125
230	106	6	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
231	106	6	0.0000	0.0321	0.0000	0.9834
232	106	6	0.0000	0.2643	0.0000	0.9709
233	106	23	0.0000	0.2625	0.0000	0.9422
234	107	12	0.0000	0.0736	0.0000	0.9875
235	107	12	0.0000	0.0688	0.0000	0.9750
236	3	4	0.0006	0.0685	0.0000	0.9750
237	3	4	0.0000	0.2700	0.0000	0.9996
238	3	4	0.0000	0.2759	0.0000	0.9852
239	4	1	0.0000	0.2400	0.0000	1.0000
240	4	1	0.0000	0.1300	0.0000	1.0000
241	3	1	0.0000	0.4920	0.0000	1.0000
242	3	1	0.0000	0.0685	0.0000	0.9875
243	144	19	0.0000	0.0714	0.0000	0.9875
244	145	20	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000
245	146	20	0.0021	0.0234	0.0449	1.0000



ภาคผนวก ข

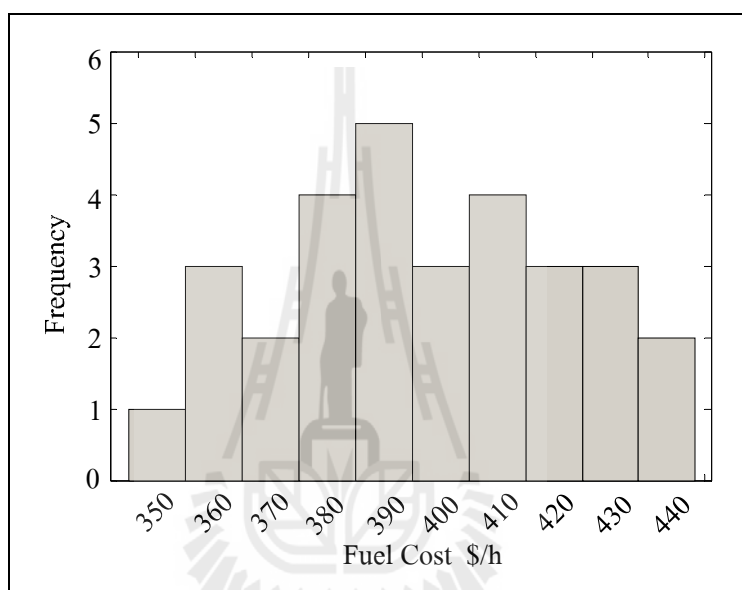
ผลการทดสอบ

ภาคผนวก ข. เป็นผลการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง และตัวอย่างแสดงการกระจายของข้อมูล โดยได้ทำการรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบทั้งหมดไว้ในแผ่นซีดีรอมในรูปแบบไฟล์ pdf. ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลผลการทดสอบ ดังนี้

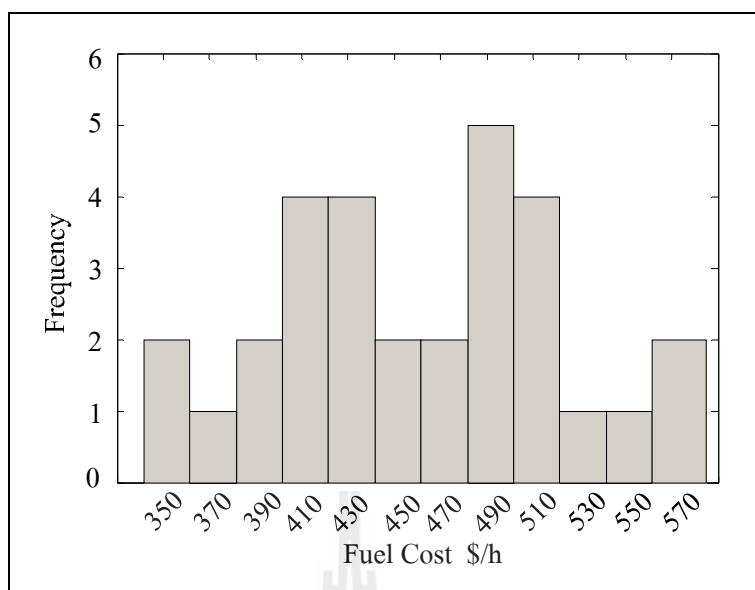
- ผลการทดสอบระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง
- ผลการทดสอบระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง
- ผลการทดสอบระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง
- ผลการทดสอบระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง
- ผลการทดสอบระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง
- ผลการทดสอบระบบทดสอบการไฟฟ้าภาคกลางตะวันออกขนาด 147 บัส โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง
- ผลการทดสอบระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น
- ผลการทดสอบระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น
- ผลการทดสอบระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น
- ผลการทดสอบระบบทดสอบบนโครงข่าย 2 (9 บัส) โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 1
- ผลการทดสอบระบบทดสอบบนโครงข่าย 2 (9 บัส) โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 2
- ผลการทดสอบระบบทดสอบบนโครงข่าย 2 (9 บัส) โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 3
- ผลการทดสอบระบบทดสอบบนโครงข่าย 2 (9 บัส) โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 4
- ผลการทดสอบระบบทดสอบบนโครงข่าย 2 (9 บัส) โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 5
- ผลการทดสอบระบบทดสอบบนโครงข่าย 2 (9 บัส) โดยใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง กรณีที่ 6
- การกระจายของข้อมูลของค่าเชื้อเพลิงจากการทดลองคู่ค่าเริ่มต้น 30 ครั้ง

จากการทดสอบโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยทำการทดลองคู่ค่าเริ่มต้นจำนวนที่แตกต่างกัน 30 ครั้ง แล้วทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลทั้ง 30 ครั้งที่มีการคู่ค่าเริ่มต้น เพื่อนำมาพิจารณาค่าต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งในการเลือกทดสอบได้ทำการคู่ค่า

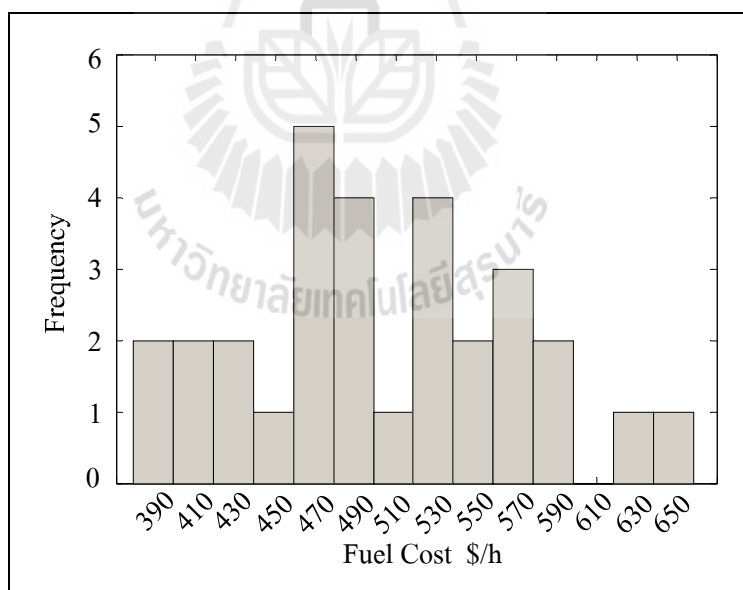
เริ่มต้นจำนวน 30 จุด นั้น เนื่องจากการสุ่มด้วยจำนวนที่มากพอ (จำนวนการสุ่มมากกว่าหรือเท่ากับ 30) ทำให้การการสุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) รูปที่ ข.1 – ข.4 เป็นตัวอย่างการกระจายของข้อมูลของค่าเชื้อเพลิงจากการทดลองสุ่มจุดเริ่มต้น 30 ครั้ง สำหรับระบบทดสอบ 6 บัส โดยใช้ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงแบบฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของขั้นตอนวิธีฟูงฟังก์ชัน ประดิษฐ์ เปรียบวิธีคล้ายนิวตัน วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีจินเนติก อัลกอริทึม ตามลำดับ



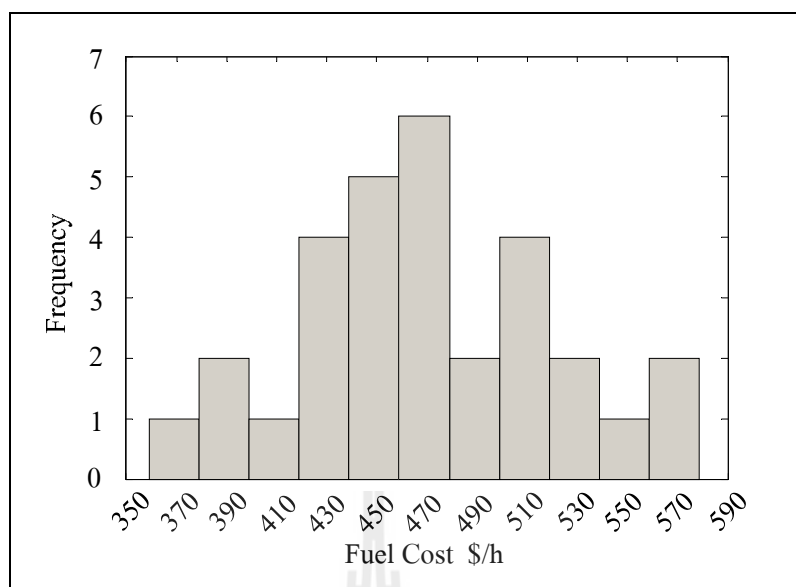
รูปที่ ข.1 การกระจายของข้อมูลของค่าเชื้อเพลิงสำหรับระบบทดสอบ 6 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของขั้นตอนวิธีฟูงฟังก์ชัน ประดิษฐ์



รูปที่ ข.2 การกระจายของข้อมูลของค่าเชื้อเพลิงสำหรับระบบทดสอบ 6 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของระเบียบวิธีคลัสเตอร์



รูปที่ ข.3 การกระจายของข้อมูลของค่าเชื้อเพลิงสำหรับระบบทดสอบ 6 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด
ของฝูงอนุภาค



รูปที่ ข.4 การกระจายของข้อมูลของค่าเชื้อเพลิงสำหรับระบบทดสอบ 6 บัส
โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของวิธีจินเนติกอัลกอริทึม





ภาคผนวก ก

ฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ชื่อฟังก์ชัน	หน้าที่
build_ybus(...)	ฟังก์ชันสำหรับคำนวณเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์
fopen(x)	ฟังก์ชันสำหรับการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ
systemdata()	ฟังก์ชันข้อมูลของระบบทดสอบต่าง ๆ
fminunc(fun,x0,options)	หาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันหลายตัวแปรกรณีไม่มีเงื่อนไขบังคับ (unconstrained) เมื่อ fun คือฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าต่ำสุด x0 คือค่าเริ่มต้นของตัวแปรในฟังก์ชัน และ options คือการกำหนดตัวเลือกของโครงสร้างการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
particleswarm(fname,Nvar,xlimit,opt)	ฟังก์ชันหาค่าต่ำสุดของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค เมื่อ fname คือฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าต่ำสุด Nvar คือ จำนวนของตัวแปรในฟังก์ชัน fname, xlimit คือ ขอบเขตต่ำสุดสูงสุดของตัวแปร และ options คือการกำหนดตัวเลือกของโครงสร้างการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
calculateFitness(fObjV)	ฟังก์ชันประเมินค่าความเหมาะสมของฟังก์ชัน fObjV ของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์
GreedySelection(x)	ฟังก์ชันคัดเลือกค่าความเหมาะสมของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์
ga(fitnessfcn,nvars,...,options)	ฟังก์ชัน หาค่าต่ำสุด ของ วิธี จิน เนติก อัลกอริทึม เมื่อ fitnessfcn คือฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าต่ำสุด nvars คือ จำนวนของตัวแปรในฟังก์ชัน fitnessfcn และ options คือการกำหนดตัวเลือกของโครงสร้างการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
feval(F, x1, ..., xn)	ประเมินค่าฟังก์ชัน F ด้วยค่า x1 ถึง xn
zeros(m,n)	สร้างเมตริกซ์ขนาด $m \times n$ ที่มีสมาชิกเป็นศูนย์ทั้งหมด
min(x)	ใช้หาค่าสูงสุดในเวกเตอร์ x แต่ถ้า x เป็นเมตริกซ์จะได้ผลเป็นเวกเตอร์แถว โดยสมาชิกแต่ละตัวเป็นค่าสูงสุดของตัวเลขในหลักของเมตริกซ์ x

<code>max(x)</code>	ใช้งานเหมือนกับคำสั่ง <code>min(x)</code> แต่ให้ผลเป็นค่าต่ำสุด
<code>range(x)</code>	ใช้หาค่าพิสัยของอาร์เรย์ <code>x</code> โดยถ้ากรณี <code>x</code> เป็นเมตริกซ์ จะแสดงค่าพิสัยโดยแสดงค่าที่ได้จากการลบกันระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของในแต่ละหลัก
<code>rand(m,n)</code>	การสร้างเมตริกซ์ขนาด $m \times n$ ที่มีสมาชิกเป็นจำนวนสุ่มที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1
<code>find(x)</code>	ใช้แสดงดัชนีตำแหน่งของสมาชิกในเวกเตอร์ <code>x</code> โดยใช้ตัวดำเนินการเปรียบเทียบทางตรรกะประกอบ เช่น <code>find(x==n)</code>
<code>size(x)</code>	การหาขนาดของเมตริกซ์ <code>x</code>
<code>abs(x)</code>	คำนวณขนาดค่าสัมบูรณ์และขนาดของจำนวนเชิงซ้อน
<code>mean(x)</code>	ใช้คำนวณหาค่าเฉลี่ยของตัวเลขทั้งหมดในเวกเตอร์ <code>x</code> แต่ถ้า <code>x</code> เป็นเมตริกซ์จะให้ผลเป็นเวกเตอร์แถว โดยสมาชิกแต่ละตัวเป็นค่าเฉลี่ยของตัวเลขในหลักแต่ละหลักของเมตริกซ์ <code>x</code>
<code>std(x)</code>	ใช้คำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของตัวเลขทั้งหมดในเวกเตอร์ <code>x</code> แต่ถ้า <code>x</code> เป็นเมตริกซ์จะให้ผลเป็นเวกเตอร์แถว โดยสมาชิกแต่ละตัวเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวเลขในหลักแต่ละหลักของเมตริกซ์ <code>x</code>
<code>sum(x)</code>	ใช้คำนวณหาค่าผลรวมของตัวเลขทั้งหมดในเวกเตอร์ <code>x</code> แต่ถ้า <code>x</code> เป็นเมตริกซ์จะให้ผลเป็นเวกเตอร์แถว โดยสมาชิกแต่ละตัวเป็นผลรวมของตัวเลขในหลักแต่ละหลักของเมตริกซ์ <code>x</code>



ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

อุมารณ์ ขวัญเนตร และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2553). ผลกระทบของการสะสมพลังงานในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 (ENETT2010) ณ โรงแรมฮอติเคย์อินน์ รีสอร์ท รีเจนท์ บีช 5 – 7 พฤษภาคม 2553.

Kwannetr, U., Leeton, U., and Kulworawanichpong, T., (2010). **Optimal Power Flow Using Artificial Bees Algorithm**. International Conference on Advances in Energy Engineering. Beijing China 17-23 June 2010.

Kwannetr, U., Leeton, U., and Kulworawanichpong, T., (2011). **Optimal Power Flow Solution Using Artificial Bees Colony**. Algorithms. International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E), Vol. 6, N. 6 August 2011.

อุมารณ์ ขวัญเนตร อุเทน ลีตน และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2011)...การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34 (EECON-34) ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา ชลบุรี 26 – 28 ตุลาคม 2554.

การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6
5 - 7 พฤษภาคม 2553 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ผลกระทบของการสะสมพลังงานในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ที่มีผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก

Impact of Energy Storage in Electric Power Distribution Systems Consisting of a Very Small Power Producers (VSPP)

อุมารณ ขวัญเนตร และ ธนชัย กุลวรวานิชพงษ์
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ. นครราชสีมา 30000 E-mail: muayja1@hotmail.com, Thanatchai@gmail.com

Aumaporn Khwanetr and Thanatchai Kulworawanishpong
Department of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000 Tel: 0-4422-3000 E-mail: muayja1@hotmail.com, Thanatchai@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของการสะสมพลังงานในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีพลังงานหมุนเวียนประเภทชีวมวล ซึ่งมีกำลังการผลิตไฟฟ้าภายในระบบ 6 เมกะวัตต์ ระบบทดสอบขนาด 12 บัส โดยทำการจำลองระบบสะสมพลังงานเพื่อกักเก็บพลังงานภายในระบบเมื่อมีการตอบสนองต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของผู้ใช้ ซึ่งจะพิจารณา 4 กรณีด้วยกัน คือ 1) ไม่มีการติดตั้งระบบสะสมพลังงาน 2) มีการติดตั้งระบบสะสมพลังงาน 3) ไม่มีการติดตั้งระบบสะสมพลังงาน และพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง 4) มีการติดตั้งระบบสะสมพลังงานและพิจารณาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งจะใช้การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี การนิวตัน – ราฟสัน จำลองผลระบบการทดสอบใน 1 วัน ให้มีการสะสมพลังงานและจ่ายพลังงานที่สะสมไว้เข้าสู่ระบบด้วยอัลกอริทึมที่เหมาะสม และทำการวิเคราะห์ผลของการติดตั้งระบบสะสมพลังงานจะเห็นได้ว่าเมื่อระบบมีการติดตั้งระบบสะสมพลังงานจะลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้มากกว่าไม่มีการติดตั้งระบบสะสมพลังงาน ดังนั้นการสะสมพลังงานในระบบจะช่วยให้มีการใช้พลังงานจากแหล่งเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการติดตั้งระบบสะสมพลังงานยังสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้อีกด้วย

คำสำคัญ : ระบบจ่ายพลังงานขนาดเล็ก, กำลังงานสูญเสีย, ระบบสะสมพลังงาน, การไหลของกำลังไฟฟ้า

Abstract

This paper presents impact of energy storage on an electric power distribution system consisting of a very small power

producer of a biomass type. A simple 6-bus test system with a total power generation of 6 MW and an adequate energy storage equipment are situated for test. Considering of four test cases, case 1: without energy storage installation and power losses, case 2: without energy storage installation but including power losses, case 3: with energy storage installation but power losses neglected, case 4: with energy storage installation and including power losses. Power transmission losses used in this paper can be determined by using Newton-Raphson power flow solution method. The simulation of the test system was carried out by performing one day simulation with energy storage and energizing stored energy by using an appropriate algorithm. The results showed that the system with energy storage can lead to efficient energy usage and power loss reduction.

Key words : microgrid distribution energy system, power losses, Energy storage system, power flow

1. บทนำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่างระบบส่งจ่ายไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นระบบที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วมีค่าสูงเพราะว่าเป็นระบบแรงดันต่ำ ดังนั้นกระแสที่ไหลในสายบ่อนจึงมีค่าสูง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบสูงตามไปด้วย ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาด้านระดับแรงดันไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟ

โครงสร้างระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นการผลิตไฟฟ้าแบบรวมศูนย์ โดยใช้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหินและก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก ซึ่งมีข้อดี คือ การผลิตไฟฟ้าปริมาณมากจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ทำให้มีความเพียงพอกับกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่ การผลิตและจ่ายไฟฟ้าเช่นนี้เป็นการจ่ายไฟฟ้าแบบทางเดียวจากผู้ผลิตไปสู่ผู้บริโภค ทำให้ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตจะต้องสัมพันธ์กับความต้องการไฟฟ้าของผู้ใช้ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาของความต้องการไฟฟ้าและตำแหน่งที่อยู่ของผู้ใช้ซึ่งกระจายอยู่ทั่วไป ข้อเสียของการจ่ายไฟฟ้าผ่านเครือข่ายจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ คือการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าในสายส่งในกรณีที่ผู้บริโภคอยู่ไกลจากโรงไฟฟ้าและเนื่องจากเป็นระบบผลิตขนาดใหญ่ จึงมีปัญหาด้านอัตราการตอบสนองต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของผู้ใช้ ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีลักษณะหลากหลายและบ่อยครั้งมักมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในบางช่วงเวลา อีกทั้งระบบผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ไม่สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงไม่มีการบริหารจัดการด้านพลังงานสะสมเพื่อรองรับหรือชดเชยอัตราการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าของผู้ใช้

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานหมุนเวียนที่ได้จากการเกษตรและอุตสาหกรรม ได้พัฒนาจนมีขนาดของระบบเล็กมาก และราคาต้นทุนการผลิตก็ต่ำลง อีกทั้งสามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายในการผลิตไฟฟ้า จึงทำให้ผู้ใช้มีอิสระที่จะเลือกตำแหน่งการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าที่ใกล้กับแหล่งการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น โรงงานน้ำตาล โรงสีไฟฟ้า และสามารถนำกากหรือเศษวัสดุและความร้อนที่เหลือทิ้งจากระบบการผลิตมาใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ทำให้สามารถใช้พลังงานจากแหล่งเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ ใช้ทั้งผลิตไฟฟ้าและนำความร้อนทิ้งกลับไปใช้ประโยชน์ด้วย ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSP) [1] จะช่วยการสร้างความสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้าภายในระบบให้สอดคล้องกับภาระทางไฟฟ้า โดยขนาดของระบบผลิตไฟฟ้ามีขนาดใกล้เคียงกับภาระทางไฟฟ้าของระบบนั้น ๆ

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองระบบจ่ายพลังงานขนาดเล็กโดยใช้พลังงานหมุนเวียนประเภทชีวมวล ซึ่งมีกำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งหมดภายในระบบ 6 เมกะวัตต์ ทำการศึกษาผลของการติดตั้งระบบสะสมพลังงานเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับกรณีการไม่ติดตั้งระบบสะสมพลังงาน และวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งระหว่างการติดตั้งระบบสะสมพลังงานและไม่ติดตั้งระบบสะสมพลังงาน เพื่อศึกษาการติดตั้งระบบสะสมพลังงานสามารถลดปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้ อีกทั้งเป็นแนวทางในการนำไปวิเคราะห์ออกแบบระบบสะสมพลังงานให้มีความเหมาะสมกับระบบต่อไป

2. องค์ประกอบระบบไฟฟ้าขนาดเล็กมาก

องค์ประกอบของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย ระบบแหล่งจ่ายพลังงานต้นกำลัง, แหล่งจ่ายพลังงานขนาดเล็กมาก, ระบบส่งกำลังไฟฟ้า, ระบบสะสมพลังงาน, และโหลดกำลังไฟฟ้า [2]

2.1 แหล่งจ่ายพลังงานต้นกำลัง

ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าต้นกำลัง คือโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อน พลังน้ำ นิวเคลียร์ พลังงานเครื่องยนต์

ดีเซล และรูปแบบอื่น ๆ ซึ่งเป็นเสมือนแหล่งจ่ายพลังงานหนึ่งในระบบ ซึ่งจะทำหน้าที่ผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อแจกจ่ายไปยังกลุ่มผู้ใช้ เมื่อระบบผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้

2.2 แหล่งจ่ายพลังงานขนาดเล็กมาก

ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กมากจะเป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักของระบบ ซึ่งจะทำหน้าที่ผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อแจกจ่ายไปยังกลุ่มผู้ใช้ในแต่ละวัน ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแหล่งพลังงานที่นำมาใช้ [3] ได้แก่

- พลังงานลม
- พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์
- พลังงานน้ำ
- ชีวมวล

ในงานวิจัยนี้จะจำลองระบบผลิตกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กมากโดยใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนประเภทพลังงานชีวมวล ซึ่งมีกำลังการผลิตไฟฟ้าที่คงที่รวม 6 เมกะวัตต์

2.3 ระบบส่งกำลังไฟฟ้า

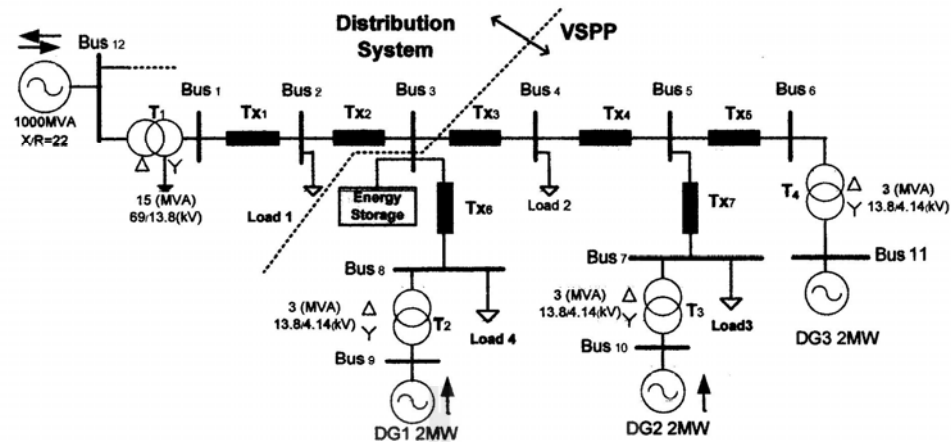
ระบบส่งกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ต่อเชื่อมกันเป็นโครงข่ายที่ซับซ้อน มีการเชื่อมต่อผ่านหม้อแปลงเพื่อแปลงแรงดันขึ้นหรือลงได้หลายระดับ เมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณสูงผ่านสายส่งจึงทำให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น แรงดันตก กำลังงานไฟฟ้าสูญเสีย ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณากำลังงานไฟฟ้าสูญเสียเป็นสำคัญ

2.4 ระบบสะสมพลังงาน

ระบบเก็บสะสมพลังงาน คือ การเก็บสะสมพลังงานส่วนเกินจากที่ผลิตได้ แล้วนำมาใช้ในช่วงเวลาจำเป็น เพื่อรักษาสมดุลของการผลิตกับการบริโภคพลังงานที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ระบบสะสมพลังงานจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กมาก เนื่องจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปไม่สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ ดังนั้นระบบสะสมพลังงานจะทำหน้าที่บริหารจัดการด้านพลังงาน เพื่อรองรับหรือชดเชยอัตราการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าของผู้ใช้ภายในระบบ ซึ่งระบบสะสมพลังงานมีหลายแบบ เช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitor), แบตเตอรี่ (Battery), ล้อช่วยแรง (Flywheel) อื่น ๆ ส่วนการเลือกใช้นั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งานของระบบ [4]

2.5 โหลดกำลังไฟฟ้า

โหลดกำลังไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเลือกใช้แหล่งจ่ายพลังงานขนาดเล็กมากและการเลือกระบบสะสมพลังงาน ในงานวิจัยเป็นการศึกษาจำลองโหลดกำลังไฟฟ้าให้มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาใน 1 วัน เพื่อให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนสำหรับระบบสะสมพลังงาน เพราะจะต้องทำการวิเคราะห์ผลกระทบของการสะสมพลังงานในระบบ



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก

3. แบบจำลองระบบสำหรับศึกษาผลกระทบของการสะสมพลังงาน

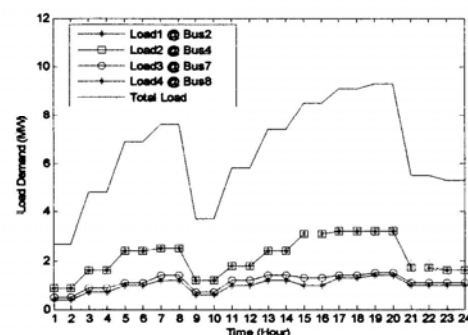
จากรูปที่ 1 ทำการจำลองระบบทดสอบขนาด 12 บัส ระบบผลิตไฟฟ้ามีขนาดแรงดันไฟฟ้า 13.8 กิโลโวลต์ มีการเชื่อมต่อผ่านหม้อแปลงแรงดันต่ำเพื่อจ่ายไฟเข้าระบบ มีระบบจ่ายพลังงานขนาดเล็กโดยใช้พลังงานหมุนเวียนประเภทพลังงานชีวมวล ติดตั้ง 3 ตำแหน่ง ที่บัส 9, 10 และ 11 โดยกำลังการผลิตแต่ละตัวมีขนาด 2 MW ส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบส่งกำลังไฟฟ้าไปยังโหลด ติดตั้งระบบสะสมพลังงานที่บัส 6 และติดตั้งโหลดที่บัส 2, 4, 8 และ 7 กำหนดข้อมูลบัสและข้อมูลสายส่งต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 และ 2 ปริมาณความต้องการของโหลดกำลังไฟฟ้าใน 1 วัน ดังรูปที่ 2 [3], [5]

ตารางที่ 1 ข้อมูลบัสของระบบ 12 บัส

Bus Number	Voltage		Bus type
	V (per unit)	δ (deg)	
1	1	0	Load bus
2	1	0	Load bus
3	1	0	Load bus
4	1	0	Load bus
5	1	0	Load bus
6	1	0	Load bus
7	1	0	Load bus
8	1	0	Load bus
9	1	0	PV bus
10	1	0	PV bus
11	1	0	PV bus
12	1.05	0	Slack bus

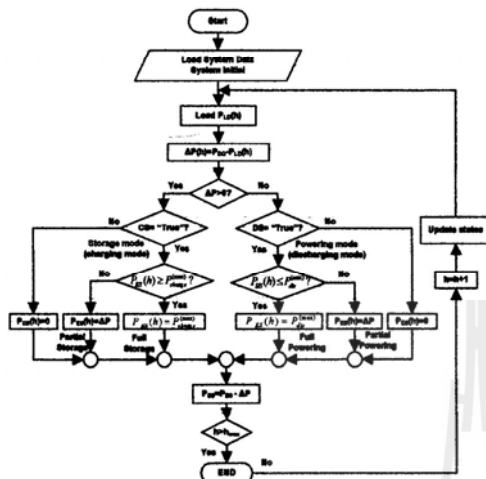
ตารางที่ 2 ข้อมูลสายส่งของระบบ 12 บัส โดยใช้ 10 เมกะวาร์, 13.8 กิโลโวลต์ เป็นค่าฐาน

Line Number	Bus Number		Impedance (per unit)		Tap Ratio
	From	To	R	X	
1	12	1	0	0.0533	1
2	1	2	0.03	0.0007	-
3	2	3	0.03	0.0007	-
4	3	4	0.03564	0.02661	-
5	4	5	0.03564	0.02661	-
7	3	8	0.0146	0.01091	-
8	5	7	0.0146	0.01091	-
9	6	11	0	0.03	1
10	8	9	0	0.03	1
11	7	10	0	0.03	1
1	12	1	0	0.0533	1



รูปที่ 2 ความต้องการโหลดกำลังไฟฟ้าใน 1 วัน

กระบวนการทำงานของระบบสะสมพลังงานในงานวิจัยนี้มี
หลักการทำงานดังแผนภาพในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพการทำงานของระบบสะสมพลังงาน

กำหนดให้

h คือ เวลา (ชั่วโมง)

P_{DO} คือ กำลังไฟฟ้ารวมที่ผลิตจากผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ซึ่ง
คงที่ตลอดเวลา (6 เมกะวัตต์)

P_{LD} คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้ารวมในแต่ละชั่วโมง

P_{SS} คือ กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าย่อยผลิต

CS คือ สถานะการสะสมพลังงาน

DS คือ สถานะการจ่ายพลังงาน

$P_{charge}^{(max)}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่สะสมสูงสุดในระบบสะสมพลังงาน

$P_{dis}^{(max)}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายสูงสุดในระบบสะสมพลังงาน

4. ผลการทดสอบ

กำหนดให้ระบบมีการผลิตกำลังไฟฟ้ารวมในแต่ละชั่วโมงได้
ทั้งหมด 6 เมกะวัตต์ และความต้องการโหลดกำลังไฟฟ้าในแต่ละ
ชั่วโมงมีการเปลี่ยนแปลง สำหรับกรณีที่มีการพิจารณากำลังไฟฟ้า
สูญเสียในสายส่งจะใช้หลักการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี
การ นิวตัน – ราฟสัน (Newton – Raphson Method) สมการกำลัง
สูญเสียจากการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงบนสายส่ง นั้นคือผลต่างของ
กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส i ไปบัส j กับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส
 j ไปบัส i ก็จะเป็นค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งนั้นๆ และกำลัง
สูญเสียทั้งหมดมีค่าเท่ากับการรวมของกำลังสูญเสียในแต่ละสายส่งดัง
แสดงตามสมการที่ (1) [6]

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

กำหนดให้

P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจริงในสายส่งทั้งหมด

N_L คือ จำนวนสายส่งทั้งหมด

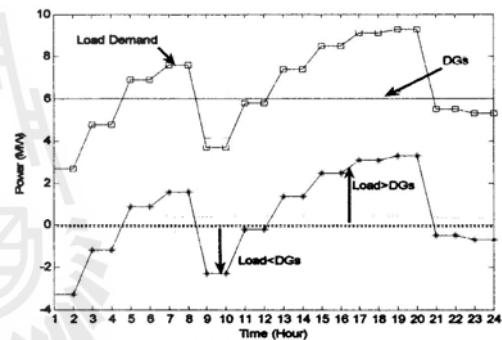
V_i, δ_i คือ ขนาดและมุมแรงดันบัสที่ i

V_j, δ_j คือ ขนาดและมุมแรงดันบัสที่ j

$g_{i,j}$ คือ ความนำไฟฟ้าจากบัส i ไปยังบัส j

4.1 กรณีไม่มีการติดตั้งระบบสะสมพลังงาน

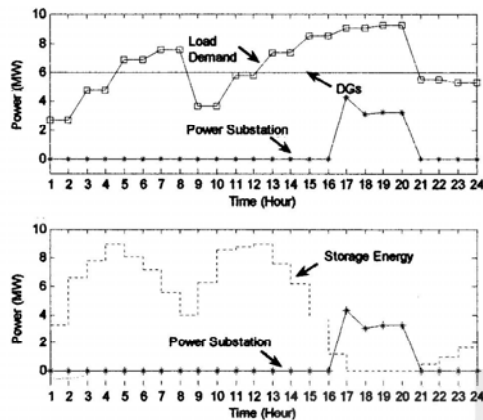
ผลการทดสอบระบบผลิตกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กมากในกรณีไม่
มีการติดตั้งระบบสะสมพลังงานแสดงดังรูปที่ 4 เมื่อความต้องการโหลด
กำลังไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงมีค่าน้อยกว่าปริมาณกำลังไฟฟ้ารวมที่ผลิต
ได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กมากภายในระบบ ($Load < DGs$)
จึงทำให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจากการจ่ายโหลด ไหลย้อนกลับ
สู่สถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) ซึ่งปริมาณกำลังไฟฟ้านี้จะถูกนำไปใช้
ยังส่วนอื่น ๆ ถ้าความต้องการโหลดกำลังไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงมีค่า
มากกว่าปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็ก
มากภายในระบบ ($Load > DGs$) สถานีไฟฟ้าย่อยก็จะทำหน้าที่
ผลิตกำลังไฟฟ้าส่วนที่ต้องรับเพิ่มเพื่อมาชดเชยระบบ



รูปที่ 4 ไม่มีการติดตั้งระบบสะสมพลังงาน

4.2 กรณีมีการติดตั้งระบบสะสมพลังงาน

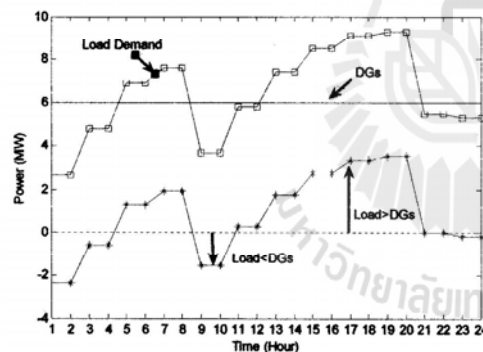
ผลการทดสอบระบบในกรณีที่มีการติดตั้งระบบสะสม
พลังงานแสดงดังรูปที่ 5 เมื่อปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งจ่าย
กำลังไฟฟ้าขนาดเล็กมากภายในระบบมีมากกว่าความต้องการโหลด
กำลังไฟฟ้า ระบบสะสมพลังงานจะนำกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจากการ
จ่ายโหลดมาเก็บสะสมไว้ในรูปแบบการสะสมพลังงาน (Storage
Energy) และถ้าปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ภายในระบบน้อยกว่า
ความต้องการโหลดกำลังไฟฟ้า ระบบสะสมพลังงานจะนำพลังงานที่
เก็บสะสมไว้ในระบบมาชดเชยจ่ายโหลดแทนส่วนที่ต้องรับเพิ่มจาก
สถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อให้ระบบสมดุล



รูปที่ 5 มีการติดตั้งระบบสมพลังงาน

4.3 กรณีไม่มีการติดตั้งระบบสมพลังงานและพิจารณา กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

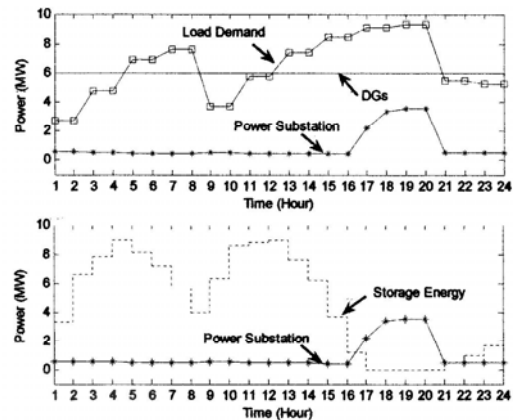
ผลการทดสอบระบบในกรณีไม่มีการติดตั้งระบบสมพลังงานและพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งผลที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณี 1 แต่จะมีกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งที่สูญเสียไปในสายส่งเกิดขึ้น เนื่องจากการจำลองผลโดยใช้การคำนวณ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งด้วยวิธี นิวตัน – ราฟสัน



รูปที่ 6 ไม่มีการติดตั้งระบบสมพลังงานและ พิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

4.4 กรณีมีการติดตั้งระบบสมพลังงานและพิจารณา กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

ผลการทดสอบระบบในกรณีไม่มีการติดตั้งระบบสมพลังงานและพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งผลที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณี 2 แต่จะมีกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งที่สูญเสียไปในสายส่งเกิดขึ้นจากการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งไปยังโหลด

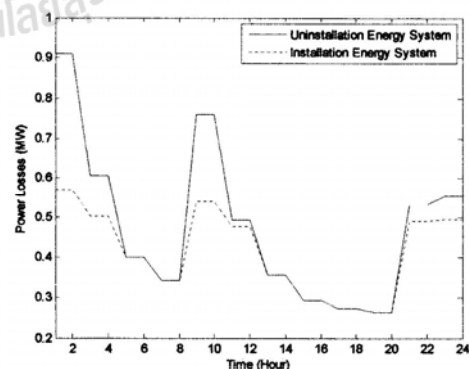


รูปที่ 7 มีการติดตั้งระบบสมพลังงานและ พิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

สำหรับกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมภายในระบบตลอด 1 วัน ที่เกิดขึ้นในระบบแสดงดังตารางที่ 3 กรณีที่ไม่มีการติดตั้งระบบสมพลังงาน กำลังไฟฟ้าสูญเสียจะมีมากกว่ากรณีที่มีการติดตั้งระบบสมพลังงาน เมื่อโหลดมีความต้องการปริมาณกำลังไฟฟ้ามากกว่าที่ผลิตได้ในระบบ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงกรณีที่ไม่มีติดตั้งระบบสมพลังงานจะมากกว่ากรณีที่ติดตั้งระบบสมพลังงาน และถ้าระบบมีปริมาณ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตมากกว่าความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลด กำลังไฟฟ้าสูญเสียกรณีไม่ติดตั้งระบบสมพลังงานจะมากกว่ากรณี ติดตั้งระบบสมพลังงานเช่นเดียวกัน โดยแสดงดังรูปที่ 8

ตารางที่ 3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมภายในระบบ ตลอด 1 วัน

กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมภายในระบบ ตลอด 1 วัน (MW)	
ไม่มีการติดตั้งระบบสมพลังงาน	มีการติดตั้งระบบสมพลังงาน
11.5625	10.0056



รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งกรณีติดตั้ง และไม่ติดตั้งระบบสมพลังงาน

5. สรุป

การสะสมพลังงานในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากนั้น เป็นการจัดการบริหารพลังงานอย่างหนึ่งเพื่อให้ระบบมีกำลังไฟฟ้าสำรองไว้รองรับความต้องการกำลังไฟฟ้าของผู้ใช้ตลอดเวลา การติดตั้งระบบสะสมพลังงานสามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้ เพราะในช่วงเวลาที่ความต้องการของโหลดมีปริมาณน้อย กำลังไฟฟ้าที่เหลือในระบบจะไหลกลับคืนหรือขายคืนสู่สถานีไฟฟ้าย่อยทำให้ช่วงเวลาที่กำลังไฟฟ้าไหลคืนระบบเกิดการสูญเสียในสายส่ง ถ้ามีการติดตั้งระบบสะสมพลังงานก็จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่เหลือถูกเก็บสะสมไว้ใช้ในอนาคตและการสูญเสียในสายส่งจะลดลง

6. เอกสารอ้างอิง

1. C. Chompoo-inwai, M. Leelajindakrairerk, S. Banjongjit, P. Fuangfoo and Wei-Jen Lee, "Biomass power generation development in Thailand", Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE, July 2009, pp. 1 - 4
2. Pi-Yop Chung WenxinLiu Cartes and K. D.A. Schoder, "Control parameter optimization for a microgrid system using particle swarm optimization", Sustainable Energy Technologies, Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference , Nov. 2008, pp. 837-842
3. F. Katiraei and M.R. Iravani, "Micro-Grid autonomous operation during and subsequent to islanding process", IEEE Trans. Power De-livery, Vol. 20 , Jan. 2005, pp. 248-257
4. สรญา ยงประยูร, "เอกสารระบบสะสมพลังงาน (Energy Storage)", คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมฯ, มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี, ลำปาง
5. F. Katiraei and M.R. Iravani "Power management strategies for a Micro-grid with multiple distributed generation units", IEEE Trans. Power System, Vol. 21 , Nov. 2006, pp. 1821-1831
6. C. Gonggui and Y. Junjie, "A new particle Swarm Optimization Solution to Optimal reactive power Flow

Optimal Power Flow Using Artificial Bees Algorithm

Umaporn Kwannetr, Uthen Leeton and Thanatchai Kulworawanichpong

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

Abstract

This paper presents a demonstration of solving optimal power flow problems by using one of swarm intelligences, called artificial bees algorithm. The objective of the problem can be expressed by taking the total production cost into account with required constraints. Among potential intelligent search methods, artificial bees algorithm is new and just developed since 2005. In this paper, the artificial bees algorithm is exploited to demonstrate its use of solving the optimal power flow problem. A 6-bus power system was situated for test. Sets of optimal parameters with respect to economic objectives can be efficiently found. This revealed that the artificial bees algorithm is one of efficient methods for solving the optimal power flow problem.

1. Introduction

There exist several approaches to model the specific intelligent behaviors from nature. Artificial bees algorithm is one among those for solving non-linear optimization problems. 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 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 artificial bees algorithm to solve optimal power flow problems is proposed [2,3]. 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 artificial bees algorithm 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 [4]. 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 total production cost function is set as the objective function. The total production cost can be expressed as follows.

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

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

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

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

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

θ_{ij} is the angle of bus admittance element i, j

Y_{ij} 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.

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

Where

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

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

$$\begin{aligned}
\Omega_C &= \rho \sum_{i=1}^{N_C} \left\{ \max(0, Q_{comp,i} - Q_{comp,i}^{\max}) \right\}^2 \\
&\quad + \rho \sum_{i=1}^{N_C} \left\{ \max(0, Q_{comp,i}^{\min} - Q_{comp,i}) \right\}^2 \\
\Omega_T &= \rho \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \max(0, T_i - T_i^{\max}) \right\}^2 \\
&\quad + \rho \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \max(0, T_i^{\min} - T_i) \right\}^2 \\
\Omega_V &= \rho \sum_{i=1}^{N_V} \left\{ \max(0, V_i - V_i^{\max}) \right\}^2 \\
&\quad + \rho \sum_{i=1}^{N_V} \left\{ \max(0, V_i^{\min} - V_i) \right\}^2 \\
\Omega_G &= \rho \sum_{i=1}^{N_G} \left\{ \max(0, P_{G,i} - P_{G,i}^{\max}) \right\}^2 \\
&\quad + \rho \sum_{i=1}^{N_G} \left\{ \max(0, P_{G,i}^{\min} - P_{G,i}) \right\}^2
\end{aligned}$$

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. Artificial bees algorithm

Artificial Bees algorithm [2,3,6] 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.

$$x_{ij} = x_{\min,j} + \text{rand}(0,1) \times (x_{\max,j} - x_{\min,j}) \quad (11)$$

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.

$$p_i = \frac{f_{\text{fit}}}{\sum_{j=1}^{SN} f_{\text{fit}}} \quad (12)$$

$$f_{\text{fit}} = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i} & , f_i \geq 0 \\ 1 + |f_i| & , f_i < 0 \end{cases} \quad (13)$$

The fitness values might be calculated using the above definition as expressed in (13).

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 swarm's 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.

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 artificial bees algorithm 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.

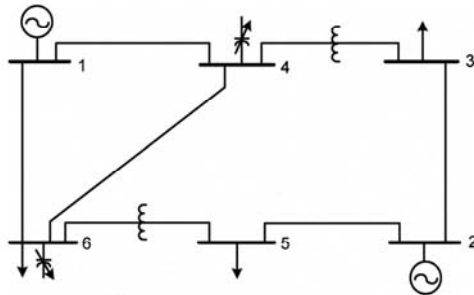


Figure 1. 6-bus test power system

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

$$f_{Gj} = a_j + b_j P_{Gj} + c_j P_{Gj}^2 \quad (14)$$

Table 3. Simulation results of all test cases

	Production cost (9t/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
Bees	389472	389472	389472	0.001	5.01

To find a set of optimal power flow solution, the proposed method, artificial bees algorithm, was employed. For benchmarking, the quasi-Newton method, particle swarm optimization and genetic algorithms were also employed. The artificial bees algorithm 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 artificial bees algorithm was the smallest. This indicates that the artificial bees algorithm can be used to find the optimal power flow solution.

5. Conclusion

This paper described the use of artificial bees algorithm to find optimal reactive 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 artificial bees algorithm 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] J. Carpentier, "Optimal power flows", *Int. J. Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 1, April 1979, pp. 3–15.
- [2] N.T. Linh and N.Q. Anh, "Application of artificial bee colony algorithm (ABC) for reconfiguring distribution network", *International Conference on Computer Modelling and Simulation*, pp. 102–106.
- [3] N. Karaboga, "A new design method based on artificial bees colony algorithm for digital IIR filters", *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 346, 2009, pp.328–348.
- [4] R.M. Idris, A. Kharuddin and M.W. Mustafa, "Optimal choice of FACTS devices for ATC enhancement using bees algorithm", *Australian Universities Conference (AUPEC 2009)*, pp. 1–6.
- [5] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, *Power generation, operation and control*, Wiley-Interscience, New York, 1996
- [6] 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.

การแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

OPTIMAL POWER FLOW USING ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHMS

อุมาภรณ์ ขวัญเนตร์ อุเทน ลีตัน และ ธนัชชัย กุลธรรวาทินพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นครราชสีมา 30000 E-mail: muayjal@hotmail.com, uthen.leeton@gmail.com and Thanatchai@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ (Artificial Bee Colony Algorithms: ABC) โดยใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน จำลองผลกระทบของสภาพโหลดสมมูล โดยทดสอบกับระบบไฟฟ้า 6 บัส และ 30 บัส จำลองผลด้วยการเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบ ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบและเปรียบเทียบกับวิธีควาซีนิวตัน (Quasi-Newton methods: BFGS), วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm: GA) พบว่าขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดอย่างเหมาะสม, ต้นทุนเชื้อเพลิง, นิวตัน-ราฟสัน, ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

Abstract

This paper presents the use of artificial bee colony algorithm for solving optimal power flow problems. It is one of swarm intelligent search methods and has been successfully applied in various non-linear optimization problems. In this paper, nonlinear optimal power flow problems were challenged. Standard IEEE 6-bus and 30-bus test systems were used for test. Satisfactory results obtained from the proposed method were compared with those obtained by using genetic algorithms and quasi-Newton method. The results confirm the effectiveness of the artificial bee colony algorithm for solving optimal power flow problems.

Keywords: Optimal Power Flow, Fuel Cost, Newton-Raphson,

Artificial Bee Colony Algorithm

1. บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องเพิ่มกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อสนองตอบต่อความต้องการของผู้ใช้ จึง

จำเป็นต้องมีกระบวนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ดี ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันมีขนาดใหญ่มากประกอบไปด้วยโรงไฟฟ้าจำนวนมาก ซึ่งโรงไฟฟ้าแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพและต้นทุนการผลิตที่แตกต่างกัน ดังนั้น การวางแผนการผลิตให้กับโรงไฟฟ้าจึงเป็นปัญหาสำคัญเพราะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตโดยรวมของทั้งระบบ

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Power Flow: OPF) เป็นปัญหาทางไฟฟ้ากำลังที่ใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน ที่คิดค้นโดย คาร์เพนติเยอร์ (Capentier) ในปี ค.ศ. 1962 การศึกษาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงหรือปัญหาการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริง (Problem of real-power : P- problem) [1] ที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบให้มีต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุดภายใต้ขอบเขตที่จำกัด [1]

บทความนี้นำเสนอการแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยวิเคราะห์ในด้านต้นทุนการผลิต มีการควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบทดสอบ 6 บัส และ 30 บัส ทำการแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ได้ต้นทุนค่าที่ต่ำ โดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ และเปรียบเทียบกับวิธีเจเนติกอัลกอริทึม วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคและวิธีควาซีนิวตัน

2. ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Power Flow: OPF)

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดคือการนำวิธีการจ่ายโหลดอย่างประหยัดและการจัดสรรกำลังไฟฟ้าที่รวมกันเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตและกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบมีค่าต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขบังคับที่ต้องการควบคุมค่าให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด

2.1 ปัญหาที่เหมาะสมไม่เป็นเชิงเส้น

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม คือปัญหาค่าที่เหมาะสมไม่เป็นเชิงเส้น พิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไม่เป็นเชิงเส้นกับเงื่อนไขไม่เป็นเชิงเส้น การแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมมีรูปแบบของปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f(x) \\ \text{Subject to} \quad & g(x) = 0, \quad \text{เงื่อนไขบังคับสมการ} \\ & h(x) \leq 0, \quad \text{เงื่อนไขบังคับอสมการ} \end{aligned}$$

โดยกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้มีค่าต่ำสุดอยู่ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขบังคับของตัวแปรที่ต้องการปรับปรุงค่าหรือขอบเขตของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเป็นฟังก์ชันของต้นทุนในการผลิต ผู้วิเคราะห์ต้องกำหนดขึ้นมา การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ นั้นมีหลากหลายรูปแบบ [2] ในที่นี้พิจารณาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ซึ่งเป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง โดยฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงดังกล่าวมีดังนี้

$$f_i(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (1)$$

โดยที่

P_{Gi} คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า i จ่ายเข้าระบบไฟฟ้ากำลัง
 a_i, b_i, c_i คือ สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิง

2.3 เงื่อนไขบังคับสมการ (Equality Constraint)

เงื่อนไขบังคับสมการของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด คือผลรวมของกำลังไฟฟ้าแต่ละบัสเท่ากับความต้องการของโหลด ดังนั้น $g(x)$ คือ

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} - P_D = 0 \quad (2)$$

$$(P_{Gi} - P_{Di}) - \sum_{j=1}^{N_L} |Y_{ij} V_i V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = 0 \quad (3)$$

$$(Q_{Gi} - Q_{Di}) + \sum_{j=1}^{N_L} |Y_{ij} V_i V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = 0 \quad (4)$$

โดยที่

P_{Gi} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตที่บัส i
 Q_{Gi} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิตที่บัส i
 P_{Di} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลดต้องการที่บัส i
 Q_{Di} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดต้องการที่บัส i
 N_B คือ จำนวนบัสทั้งหมด
 V_i คือ ขนาดแรงดันที่บัส i
 V_j คือ ขนาดแรงดันที่บัส j
 δ_i คือ มุมของแรงดันที่บัส i
 δ_j คือ มุมของแรงดันที่บัส j

θ_{ij} คือ มุมของ Y บัส ระหว่างบัส i ไปบัส j

Y_{ij} คือ ขนาดของ Y บัส ระหว่างบัส i ไปบัส j

2.4 เงื่อนไขบังคับอสมการ (Inequality Constraint)

เงื่อนไขบังคับอสมการของปัญหาการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมได้แก่ ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ ขนาดของแรงดันขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนั้น $h(x)$ คือ

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

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

$$Q_{comp,j}^{\min} \leq Q_{comp,j} \leq Q_{comp,j}^{\max} \quad (7)$$

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad (8)$$

โดยที่

$P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$ คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุดและสูงสุด บัสที่ i

$V_i^{\min}, V_i^{\max}$ คือ ขอบเขตของขนาดแรงดันต่ำสุดและสูงสุด บัสที่ i

$Q_{comp,j}^{\min}, Q_{comp,j}^{\max}$ คือ ขอบเขตของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุด บัสที่ j

$T_i^{\min}, T_i^{\max}$ คือ ขอบเขตของแท็ปหม้อแปลงต่ำสุดและสูงสุด บัสที่ i

2.5 วิธีการปรับโทษ (Penalty Method)

วิธีการปรับโทษ คือ การแปลงปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ (Constraint Optimization) ให้เป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ (Unconstraint Optimization) โดยการแปลงเงื่อนไขบังคับที่เป็นสมการและอสมการให้เป็นฟังก์ชันการปรับโทษ โดยอาศัยเทอมของการปรับโทษเป็นตัวปรับแต่งการหาค่าของเทอมการปรับโทษ [2] ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P(x) = f(x) + \Omega(x) \quad (9)$$

$$\Omega(x) = \rho \{g^2(x) + [\max(0, h(x))]^2\} \quad (10)$$

โดยที่

$P(x)$ คือ ฟังก์ชันการปรับโทษ

$\Omega(x)$ คือ เทอมของการปรับโทษ

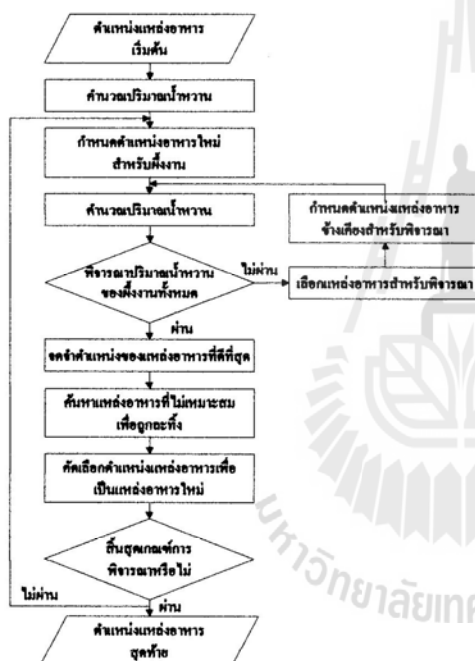
ρ คือ ตัวประกอบการปรับโทษ

3. ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ (Artificial Bee Colony Algorithm)

ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์เป็นกระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดวิธีการหนึ่ง ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 2005 โดย เคอร์วิส คาราโบกา (Dervis Karaboga) ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมความฉลาดใน

การหาอาหารของผึ้ง จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจริง ทำให้ประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาและประสิทธิภาพของคำตอบมีมากขึ้น พฤติกรรมความฉลาดในการหาอาหารของผึ้งนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมเพื่อใช้แก้ปัญหาต่าง ๆ ซึ่งเรียกว่า ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ [3]

จากการพิจารณาพฤติกรรมหาอาหารของกลุ่มประชากรผึ้งนั้น ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบที่สำคัญ คือ ผึ้งสำรวจ ผึ้งงาน และแหล่งอาหาร 2 องค์ประกอบแรกอยู่ในส่วนของการหาอาหารเพื่อค้นหาแหล่งอาหารที่อุดมสมบูรณ์ องค์ประกอบสุดท้ายจะถูกพิจารณาเมื่อกลับมาถึงรัง ซึ่งพิจารณาจากปริมาณคุณภาพของน้ำหวานนั้น จากกระบวนการหาอาหารของผึ้ง สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าเหมาะที่สุดได้ กระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์มีขั้นตอนการทำงานดังแผนภาพรูปที่ 1 [4]



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์

จากแผนภาพการทำงานของขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ รอบของการค้นหาแต่ละรอบประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลังจากการเริ่มต้นสร้างประชากรผึ้ง ดังนี้

1) ระยะผึ้งงาน (Employed Bees Phase)

ผึ้งงานแต่ละตัวจะกำหนดแหล่งอาหารใหม่ v_j จากบริเวณแหล่งอาหารข้างเคียงในหน่วยความจำของ x_j ในบทความนี้ใช้สมการที่ (11) และทำการประเมินความน่าจะเป็นหรือค่าความเหมาะสม (fitness) ของแหล่งอาหาร

$$v_j = x_j + \phi_j (x_j - x_{j'}) \quad (11)$$

โดยที่

x_j คือ แหล่งอาหารที่เลือกแบบสุ่ม

j คือ ตัวแปรสุ่มเลือก

ϕ_j คือ การสุ่มค่า Employed Bees Phase ในช่วง $[-a, a]$

หลังจากสร้างแหล่งอาหารใหม่ v_j แล้วทำการประเมินค่าความเหมาะสมโดยเลือกใช้ระหว่าง v_j และ x_j การแก้ปัญหาค่าความเหมาะสม $fit_i(x_i)$ สำหรับปัญหาค่าเหมาะที่สุดนี้ใช้สมการ (12)

$$fit_i(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i(x_i)} & \text{If } f_i \geq 0 \\ 1 + abs(f_i(x_i)) & \text{If } f_i < 0 \end{cases} \quad (12)$$

โดยที่

$f_i(x_i)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการแก้ปัญหา x_i

x_i คือ ผึ้งที่ถูกคัดเลือกจากการพิจารณา

2) ระยะผึ้งพิจารณา (Onlooker Bees Phase)

ผึ้งงานประกอบด้วย 2 กลุ่ม คือ ผึ้งสำหรับพิจารณาและผึ้งสำรวจ ผึ้งงานที่สำรวจจะทำหน้าที่ส่งข้อมูลให้ผึ้งงานตัวอื่นพิจารณาเพื่อคัดเลือกแหล่งอาหารจากข้อมูลที่ได้รับ โดยเกณฑ์การคัดเลือกแหล่งอาหารนั้นขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็น ซึ่งคำนวณจากค่าความเหมาะสมของผึ้งงาน ดังสมการที่ (13)

$$p_i = \frac{fit_i(x_i)}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i(x_i)} \quad (13)$$

โดยที่

p_i คือ ค่าความน่าจะเป็น

SN คือ ขนาดประชากร

3) ระยะผึ้งสำรวจ (Scout Bees Phase)

ผึ้งงานที่เลือกแหล่งอาหารเรียกว่า ผึ้งสำรวจ ผึ้งงานนั้นไม่สามารถกำหนดการปรับปรุงของการค้นหาไว้ล่วงหน้าได้ ในขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์นั้นถูกกำหนดโดยขีดจำกัด (limit) หรือ เกณฑ์การปล่อย ผึ้งสำรวจทำการวิเคราะห์เพื่อละทิ้งแหล่งอาหารโดยใช้เกณฑ์การปล่อย แล้วทำการเริ่มต้นหาค่าตอบใหม่ [4]

4. ผลการทดลอง

ในบทความนี้ ใช้ระบบทดสอบมาตรฐาน 6 บิต 30 บิต และ 57 บิต [5] ทำการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อหาต้นทุนการผลิต

กำลังไฟฟ้าของระบบค่าที่สุกโคใช้ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยเพื่องานนามอันดับสอง ทดสอบด้วยวิธี BFGS, GA และ ABC เปรียบเทียบกัน โดยวิธี BFGS เป็นกล่องเครื่องมือสำเร็จรูปของแมทแลบสำหรับคำนวณหาค่าต่ำสุดของปัญหา แต่ละวิธีทำการทดลองทั้งหมด 30 ครั้ง โดยสุ่มค่าเริ่มต้นที่ต่างกัน กำหนดตัวประกอบการปรับโทษของทุกระบบเท่ากับ 1,000,000 เพื่อให้ค่าคอปไม่ข้ามไปยังเขตค่าคอปที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละวิธีให้เหมาะสมกับทุกระบบทดสอบ เพื่อให้ได้ค่าคอปที่เหมาะสมที่สุด ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของระบบทดสอบ ดังตารางที่ 1, 2 และ 3 ผลการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA, BFGS และ ABC ดังตารางที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของระบบทดสอบ 6 บัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	a	b	c
P_{G1}	50 MW	200 MW	0	100	100
P_{G2}	20 MW	80 MW	0	500	100

ตารางที่ 2 ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของระบบทดสอบ 30 บัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	a	b	c
1	50	200	0.00375	2.00	0
2	20	80	0.01750	1.75	0
5	15	50	0.06250	1.00	0
8	10	35	0.00834	3.25	0
11	10	30	0.02575	3.00	0
13	12	40	0.02500	3.00	0

ตารางที่ 3 ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของระบบทดสอบ 57 บัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	a	b	c
1	20	300	0.0150	2.45	105
2	10	150	0.0225	3.25	90.5
3	25	100	0.0175	3.89	44.4
6	15	300	0.0155	2.75	50.5
8	15	200	0.0210	2.85	95
9	20	200	0.0185	3.40	120
12	10	250	0.0130	3.51	40.6

ตารางที่ 4 คำนวณการหาค่าที่สุกแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 6 บัส

วิธี	ค่าเฉลี่ย (S.I./h)				เวลา (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
BFGS	525.845	656.687	575.823	34.116	1.334
GA	541.863	639.416	575.264	25.141	62.926
ABC	544.904	623.014	569.820	20.288	5.858

ตารางที่ 5 คำนวณการหาค่าที่สุกแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 30 บัส

วิธี	ค่าเฉลี่ย (S.I./h)				เวลา (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
BFGS	647.355	16793.7	1853.76	3402.5	75.622
GA	700.524	921.911	804.953	58.226	448.126
ABC	633.353	908.609	804.028	60.410	48.801

ตารางที่ 6 คำนวณการหาค่าที่สุกแต่ละวิธีของระบบทดสอบ 57 บัส

วิธี	ค่าเฉลี่ย (S.I./h)				เวลา (วินาที)
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
BFGS	9804.40	48392.00	13770.00	9200.1	1061.20
GA	9422.00	11624.00	10268.00	452.46	1418.80
ABC	9254.20	10562.00	10006.00	343.41	234.99

5. สรุป

บทความนี้แสดงการใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ในการค้นหาค่าคอปการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าทุกวิธีสามารถค้นหาค่าคอปที่ต่ำที่สุดได้ใกล้เคียงกัน เมื่อระบบทดสอบมีขนาดเล็ก แต่ถ้ระบบทดสอบมีขนาดใหญ่ขึ้น BFGS จะมีการเข้าสู่ของจุดค่าคอปลดลงเพราะ BFGS ไม่ใช้การค้นหาแบบปัญญาประดิษฐ์พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) พบว่า ABC และ GA มีค่าน้อยกว่า BFGS ทุกระบบ แต่ BFGS ใช้เวลาน้อยสุดเมื่อระบบมีขนาดเล็ก แต่เมื่อระบบมีขนาดใหญ่ BFGS ใช้เวลามากขึ้น ส่วน GA ใช้เวลามากที่สุดในทุกระบบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนัชช ฤทธรวานิชพงษ์, "การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง", SUT 3rd Edition, จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์, พิมพ์ครั้งที่ 1, มกราคม 2551
- [2] ธนัชช ฤทธรวานิชพงษ์, "เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด Optimization Techniques", เอกสารประกอบการสอน, SUT 2nd Edition, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สิงหาคม 2550
- [3] D. Karaboga and B. Bosturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony optimization", *Journal of Global Optimization*, pp. 459-471.
- [4] N. Linh and N. Anh, "Application of artificial bee colony algorithm (ABC) for reconfiguring distribution network", *International Conference on Computer Modelling and Simulation*, pp. 102-106.
- [5] M.A. Abido, "Multiobjective Particle Swarm Optimization for Optimal power flow Problem", *Power System Conference, 2008. MEPCON 2008. 12th International Middle-East*, 2008, pp. 392 - 396.

Optimal Power Flow Solution Using Artificial Bees Colony Algorithms

Umaporn Kwannetr¹, Uthen Leeton² and Thanatchai Kulworawanichpong³

Abstract –This paper illustrates an application of Artificial Bees Colony (ABC) algorithms to optimal power flow (OPF) problems in comparative with some effective mathematical and evolutionary optimization methods. The ABC is one of swarm intelligences, which was just developed since 2005. This algorithm is to simulate the intelligent behaviour of honey bee swarms. It is a population-based search method and simply employs only common control parameters such as colony size and maximum generation number. The artificial bees are created to discover places of food sources with high amount of nectar. At the end of ABC searching procedure, the food source with the highest nectar is found to represent the global optimum. The proposed algorithm was tested with four mathematical test functions (simple quadratic function, Rosenbrock's function, circle function and Bohachevski's function) and five standard IEEE test power systems (6-bus, 14-bus, 30-bus, 57-bus and 118-bus test systems). The test power systems were divided into two cases. The first test case was given by applying a quadratic function to generators' fuel-cost curve whereas a non-smooth fuel-cost function was assigned to the second. The comparisons among solutions obtained by sequential quadratic programming (SQP), genetic algorithms (GA) and artificial bees colony (ABC) were carried out. As revealed from the simulated results, the effectiveness of the ABC algorithm for solving OPF problems was confirmed. Copyright © 2009 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.

Keywords: Optimal Power Flow, Artificial Bees Colony, Genetic Algorithms, Quasi-Newton Search Method

I. Introduction

To date, an electrical power system is very large and obviously complicated due to technological enhancement of power system engineering. Increasing of electrical energy consumption often leads extending and upgrading an existing power transmission and distribution network to serve all customers sufficiently, effectively and economically. To achieve good performance for power delivery, a real power dispatching problem must be taken into account in order to minimize total generation cost [1]. Also, appropriately reactive power flows relate to power losses and system voltage profiles, directly. In this viewpoint, tap setting of under-load tap-changing transformers (ULTCs), voltage magnitude of voltage-controlled buses or installing reactive power sources can improve voltage characteristics and reduce power losses, considerably [2]. In 1968, Dommel and Tinney [3] proposed the method of OPF, which employs allocation of real power generated by generators to co-operate with controlling ULTCs, magnitude of voltage-controlled buses or reactive power sources for minimizing the system objective.

As a general approach, a typical OPF problem employs an optimization method for balancing the power flow equations, and finding the optimum solution. The solution satisfies the constraint of the minimum value of an objective function, ie total generation cost for most cases, within the entire search space. The OPF problem is

in general non-convex and non-linear. It may exist many local minima. Many mathematical techniques have been developed and applied to this problem such as linear programming, interior point method, quadratic programming, etc [4]. The algorithms essentially need some problem simplification such that the problem is linear or convex. Thus, a true global minimum cannot be guaranteed. Then, stochastic optimization methods such as Genetic Algorithms (GAs), Simulated Annealing (SA), Artificial Neural Network (ANN), Evolutionary Programming (EP), Particle Swarm Optimization (PSO) [5-9], were applied for solving such a problem directly without any simplification. These methods can successfully manipulate a problem in non-convex or non-linear. Therefore, an obtained optimal solution is more accurate and realistic. Unfortunately, these algorithms normally take lengthy calculation time when compared with the mathematical optimization methods. Since 2005, artificial bees colony has been introduced and performed drastically improved search performance. Regarded as one of stochastic search processes, ABC provides a near global minimum by successfully avoiding local-minimum traps. Successful applications of the ABC have emerged, such as in [10-12]. Although the ABC algorithm was developed as a stochastic optimization technique, it can find an optimal solution within a short calculation time. Consequently, this paper applied the ABC for solving the OPF problem.

This article consists of 7 sections. The next section, Section 2, describes literature review in optimal power

flow solutions and artificial bees colony algorithms. Section 3 presents the formulation of the OPF problem. The optimization techniques namely SQP [29, 30], GA and ABC are described in section 4. Also, the demonstration of ABC to OPF problems was explained in Section 5. Section 6 presents the simulation results based on the standard IEEE 6-bus, 14-bus, 30-bus, 57-bus and 118-bus test systems for both convex, non-convex cases. The last section provides discussion and conclusion of the present work.

II. Literature Reviews

The followings are some recent reviewed literature concerning with optimal power flow solutions and artificial bees colony algorithms for optimization problems.

II.1. Literature Review in Optimal Power Flow

Santos and Costa (1995) [13] presented a novel approach for solving optimal power flow problems based on Newton's method. Using the Lagrangian functions to combine problem constraints, the nonlinear optimization problem can be solved effectively. Muriithi (1996) [14] presented the problem of power flow optimization taking into account the principles of economics and reliability as its objective. This paper used some efficient mathematical programs that were the steepest descent method, the quadratic programming and the gradient projection method. Leung and Chung (2000) [15] proposed a genetic algorithm (GA) for solving optimal power flow problems in power systems which are equipped with flexible AC transmission systems (FACTS). Abido (2002) [16] proposed the optimal power flow solution by using Tabu search method (TS). The test was simulated by using the IEEE 30-bus test system with four test cases. The result of this simulation concluded that Tabu search method is capable to solve optimal power flow problem with the lowest objective function and the fastest convergence. Abido (2002) [17] proposed a power flow optimization by means of particle swarm optimization (PSO). This work was carried out by simulating the IEEE 30-bus test system with the fuel-cost function is the system objective. Gaing (2005) [18] employed the mixed-integer particle swarm optimization (MIPSO) for solving optimal power flow problems with a combination of continuous and discrete control variables. The total production cost with smooth and non-smooth curves was used as the system objective to be minimized. The IEEE 9-bus and 26-bus test power systems were challenged. Vaisakb and Srinivas (2005) [19] proposed optimal power flow solutions by using differential evolution (DE), which tested in the IEEE 30-bus test system with fuel-cost objective functions. Younes, Rahli and Koridak (2007) [20] proposed the optimal power flow solutions using genetic algorithms. The IEEE 57-bus test system was used together with the total production cost as the objective function. The

simulations were conducted by using MATHPOWER software package. Tangpatiphan and Yokoyama (2008) [21] presented evolutionary programming with artificial neural network by solving the transient stability based optimal power flow problems. The swing equation and the rotor angle dynamic were determined. The IEEE 30-bus test system was used for test. Fangxing Li and Tolbert (2008) [22] presented the problem of reactive power planning (RPP) to determine the optimal location and size of the reactive power sources. This work included the consideration of i) the ability of power transfer capability, ii) fuel-cost minimization and iii) the voltage stability enhancement. Oumarou, Jiang and Yijia (2009) [23] presented the optimal power flow solution by using the particle swarm optimization. The IEEE 30-bus test power system was used for test to adjust generators' powers, bus voltage magnitudes, reactive powers from the var sources and transformer taps. Tangpatiphan and Yokoyama (2009) [24] presented the evolutionary programming for solving the optimal power flow problem with consideration of steady-state voltage stability. The system objective function was the total production cost with system security and voltage stability constraints. In this paper, the IEEE 30-bus test system was employed. Va, Le, Vo and Tlusty (2010) [25] presented the optimal power flow solution using some efficient intelligent search methods. Genetic algorithms, differential evolution and ant colony optimization (ACO) were challenged with the IEEE 30-bus test system.

II.2. Literature Review in Artificial Bees Colony

Younes and Basturk (2007) [26] proposed an artificial bees colony (ABC) for some standard optimization test functions. The results obtained by the proposed method were compared with those obtained by genetic algorithms and particle swarm optimization. Quan and Shi (2008) [27] proposed artificial bees colony algorithms for finding optima of 10 standard optimization test functions. The test results showed the superior performance of the artificial bees colony algorithms to solve the engineering design problem. Chidambaram and Lopes (2009) [28] provided the use of artificial bee colony algorithms to recognize objects in images. The artificial bee colony algorithm is one of meta-heuristic approaches to imitate the nectar searching behavior of a bee colony. For gray-scale and color images, the artificial bees colony algorithm can find the optimal results faster than other evolutionary algorithms.

III. Optimal Power Flow Problem

Optimal power flow is a type of non-linear optimization problems in which all control variables are adjusted in such a way that the power flow of the entire system is optimized with respect to some objective [3]. This can be summarized as follows.

III.1. Nonlinear 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.

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

III.2. Objective Function

The objective function to be optimized is the total production cost. This function is a combination of all generators' fuel costs in the entire system. The fuel-cost characteristic of each generator is represented by using either a quadratic or non-smooth function as shown in below.

$$\begin{aligned} F_T &= \sum_{i=1}^{N_G} f_i(P_{Gi}) \\ &= \sum_{i=1}^{N_G} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + |d_i \sin e_i (P_{Gi}^{\min} - P_{Gi})| \end{aligned} \quad \text{e/h (1)}$$

Where:

f_i is the fuel cost of the i^{th} generator
 a_i, b_i, c_i, d_i and e_i are the cost coefficients of the i^{th} generator
 P_{Gi} is the real power output of the i^{th} generator
 N_G is the total number of generators

III.3. System Constraints

Equality constraints of the OPF problem are real and reactive power flow equations as described in (2) – (3). Some variable limits of the system are inequality constraints. These constraints can be formulated as shown in (4) – (7).

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} + \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (3)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (4)$$

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

$$Q_{comp,i}^{\min} \leq Q_{comp,i} \leq Q_{comp,i}^{\max} \quad (6)$$

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

Where:

N_B is the total number of buses
 P_{Gi} and Q_{Gi} are the real and reactive power generation at bus i respectively

P_{Di} and Q_{Di} are real and reactive power of load respectively

Y_{ij} and θ_{ij} are the magnitude and angle of bus admittance element ij

$V_i^{\min}, V_i^{\max}$ 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

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

IV. Artificial Bees Colony Optimization

Artificial Bees algorithm [10,11,12] was proposed by Karaboga in 2005 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.

- (i) Initial phase: Initial population of artificial bee swarms is created randomly by the following formula.

$$x_{ij} = x_{\min,j} + \text{rand}(0,1) \times (x_{\max,j} - x_{\min,j}) \quad (8)$$

- (ii) 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.

$$p_i = \frac{f_{\text{fit}_i}}{\sum_{j=1}^{SN} f_{\text{fit}_j}} \quad (9)$$

$$f_{ui} = \begin{cases} \frac{1}{1+f_i} & , f_i \geq 0 \\ \frac{1}{1+|f_i|} & , f_i < 0 \end{cases} \quad (10)$$

The fitness values might be calculated using the above definition as expressed in [11].

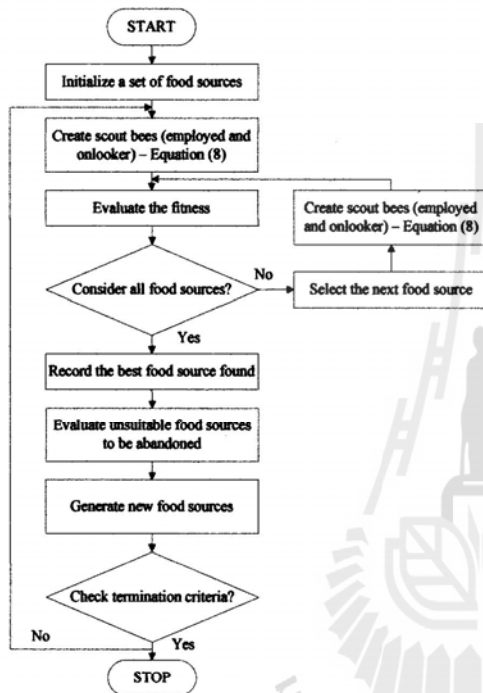


Fig. 1. Flowchart of the ABC procedure

- (iii) Onlooker bees phase: onlookers are placed onto the food source sites by using a fitness based selection technique, for example roulette wheel selection method.
- (iv) Scout bees phase: every bee swarm has scouts that are the swarm's 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 colony algorithm can be summarized in the flow diagram of Fig. 1.

V. Artificial Bees Colony Algorithms for Solving Optimal Power Flow Problems

As described in the previous section, the ABC algorithm is inspired by the intelligent behaviour of honey bee swarms to discover places of food sources with high amount of nectar. The most interesting feature of the ABC is that it does not require any prior knowledge or space limitations, such as smoothness or convexity of the function to be optimized. It exhibits a very good performance on the majority of the problems applied. To employ the ABC for solving optimal power flow problems, a brief description of the solution framework is given as follows.

V.1. Control Parameters

Initially, the IHS was designed to work on a real-valued representation of the problem parameters. During the searching process, a musical notation as a collection of musical notes represents a solution vector. Let $\bar{x}_i$ be a created musical notation. The power output of all generating units ($\bar{P}, \bar{Q}$), the voltage magnitude and angle of all buses ($|\bar{V}|, \bar{\delta}$) and the tapping value of all transformers ($\bar{T}$) and reactive power injection from reactive power compensators ($\bar{Q}_C$) are typical members of the solution vector and it can be written as described in (11).

$$\bar{x}_i = [\bar{P} \quad \bar{Q} \quad |\bar{V}| \quad \bar{\delta} \quad \bar{T} \quad \bar{Q}_C]^T \quad (11)$$

V.2. Objective Function and Its Fitness

The total production cost is computed as the sum of the individual unit costs and therefore used as the system objective function. To account for all the system constraints (2) – (7), the total production cost is augmented by non-negative penalty terms to penalize the constraint violations. Thus, the augmented cost function, called the penalty function [29-30], is formed as (12).

$$P(\bar{x}_i) = \sum_{i=1}^{N_G} f_i(P_{Gi}) + \Omega_E + \Omega_I \quad (12)$$

Where:

Ω_E is the penalty terms to penalize equality constraints

Ω_I is the penalty terms to penalize inequality constraints

VI. Results and Discussion

The test systems were separated into two groups. The first group consisted of four mathematical functions which were a simple quadratic function, the circle function, the Rosenbrock's function and the Bohachevski's function. The second group employed five standard IEEE test power systems which were the 6-bus, 14-bus, 30-bus, 57-bus and 118-bus test power systems [31]. The detail of each group was given as follows.

VI.1. Mathematical Test Functions

To evaluate the performance of the ABC algorithm without a biased conclusion towards some selected problems, four mathematical test functions as shown in Fig. 2 – Fig. 5 associated with (13) – (16), respectively, were used for this challenge.

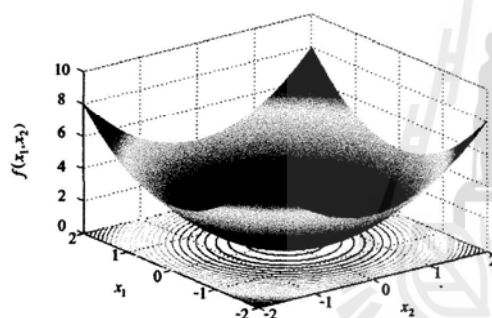


Fig. 2. Simple quadratic test function

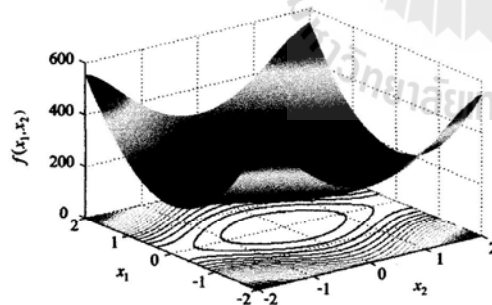


Fig. 3. 2D circle function

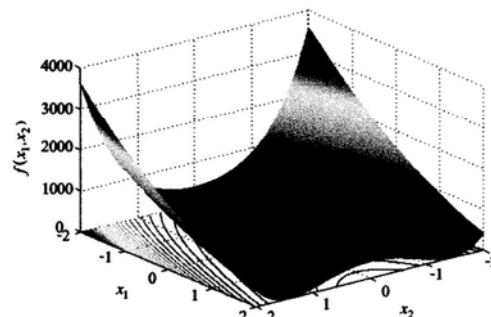


Fig. 4. Rosenbrock's test function

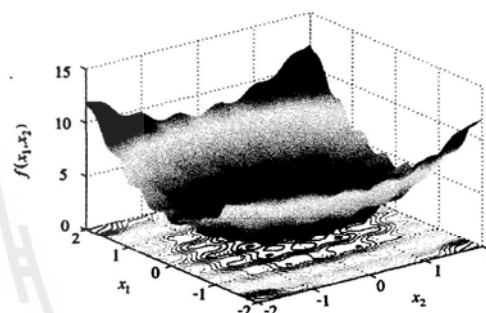


Fig. 5. Bohachevski's test function

$$f(x) = x_1^2 + x_2^2 \quad (13)$$

$$f(x) = (x_1^2 + x_2^2)^{\frac{1}{4}} \sin^2 \left\{ 50(x_1^2 + x_2^2)^{\frac{1}{10}} + 0.1 \right\} \quad (14)$$

$$f(x) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (15)$$

$$f(x) = x_1^2 + 2x_2^2 - 0.3 \cos(3\pi x_1) - 0.4 \cos(4\pi x_2) + 0.7 \quad (16)$$

The above four mathematical test functions are regarded as a set of combined simple and commonly-used functions for benchmarking. The summary for the simulation results of 30 trials for each method per test function (e.g. mean, minimum, maximum, standard deviation, CPU time) were listed in Table I – IV for comparisons.

The results revealed that the ABC algorithm can find the solutions with the same level of accuracy. When considering the CPU time, the solution obtained by the ABC algorithm was 22 – 24 times faster than those obtained by the GA. Although the SQP was the fastest among them, it was not successful to find the true global solution where several local minima exist such as in the Bohachevski's test function.

TABLE I
RESULTS OF THE SIMPLE QUADRATIC TEST FUNCTION

Method	Objective function				CPU Time (s)	CPU time ratio
	Minimum	Maximum	Mean	S.D.		
SQP	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	0.0156	0.069
GA	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	5.1324	22.77
ABC	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	0.2254	1.000

* CPU time ratio = CPU time used by the contestant / CPU time used by the ABC

TABLE II
RESULTS OF THE CIRCLE TEST FUNCTION

Method	Objective function				CPU Time (s)	CPU time ratio
	Minimum	Maximum	Mean	S.D.		
SQP	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	0.0142	0.059
GA	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	5.4770	22.72
ABC	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	0.2411	1.000

* CPU time ratio = CPU time used by the contestant / CPU time used by the ABC

TABLE III
RESULTS OF THE ROSENBRACK'S TEST FUNCTION

Method	Objective function				CPU Time (s)	CPU time ratio
	Minimum	Maximum	Mean	S.D.		
SQP	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	0.0197	0.085
GA	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	5.5677	24.09
ABC	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	0.2311	1.000

* CPU time ratio = CPU time used by the contestant / CPU time used by the ABC

TABLE IV
RESULTS OF THE BOHACHEVSKI'S TEST FUNCTION

Method	Objective function				CPU Time (s)	CPU time ratio
	Minimum	Maximum	Mean	S.D.		
SQP	$< 1 \times 10^{-4}$	0.1812	0.0156	0.0314	0.0156	0.068
GA	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	5.1959	22.57
ABC	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	0.2302	1.000

* CPU time ratio = CPU time used by the contestant / CPU time used by the ABC

VI.2. IEEE Standard Test Systems

Although a modern electric power system consists of many types of power plants, in this research the tests are based on fossil power generation units only. A simple model of such a generator is made from its input fuel cost and corresponding power output generated in MW and output variables, respectively [32]. The test scenarios were divided into two main conditions. The first was smooth and non-smooth fuel-cost curves. In the smooth curve case, all generators' fuel-cost curves were quadratic whilst the second test used a valve-point loading function [35,36]. Fuel-cost function of each generator connected to the system is generally given in the form of valve-point loading on top of having a quadratic term in it.

Smooth fuel cost case - quadratic cost function

In this case, a quadratic fuel-cost function was used for all generators. The test was performed on an Intel Core 2 Duo, 2.4 GHz, 3.0 GB RAM with MATLAB. The SQP used in these tests is of MATLAB Optimization Toolbox [33-34]. Other three methods were implemented by using MATLAB programming. Three standard test power systems (6-bus, 14-bus, 30-bus, 57-bus and 118-bus) as shown in Fig. 6 – 10 were used for test.

This test case was performed with 30 computational trials per method. The results of each test system were presented in Tables 5 – 9, respectively. Table 10 described CPU time ratio comparisons between the ABC method and the other two methods.

As shown in Table 5, the SQP can find the lowest averaged minimum cost function that is 418.8620 €/h. The ABC is the method with the highest precision that is an S.D. of 10.4851 with the second lowest averaged minimum fuel cost. Although the GA and ABC can reach the similar amount of averaged cost function, it spent comparatively long computation time (62.2800 s for the GA, 6.1536 s for the ABC and 2.9097 s for the SQP). Undoubtedly, the SQP is the best choice of a small 6-bus test system with quadratic fuel-cost function in the execution time and minimum cost considerations. From Tables 6, the ABC can find the lowest averaged minimum cost function of 373.9864 €/h. The ABC is also the method with the highest precision whereas its S.D. is 0.5127. Although the GA can reach the similar amount of averaged cost function, it spent comparatively long computation time (100.0874 s for the GA, 15.3139 s for the ABC and 9.2358 s for the SQP). Table 7, the ABC can find the lowest averaged minimum cost function at 463.733 €/h. From Tables 8, the ABC can find the lowest averaged minimum cost function of 590.4034 €/h. The results were similar for the IEEE 118-

bus test system as shown in Table 9. The ABC is the fastest method to find the near global solutions with the smallest S.D. Remarkably, the CPU time to find optimal solutions by using the SQP is slower than those of the ABC algorithm in the large 118-bus test system. The SQP is suitable for the optimal power flow problem with smooth fuel cost functions. When the total number of buses in the entire system is relatively large, say 118 buses as in the given example, the ABC method showed outstanding performance in finding the near global solution and consuming the fast execution time. In addition, the solution convergences for three selected test cases were shown in 11 – 15.

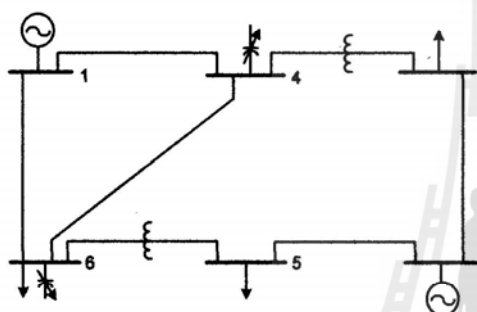


Fig. 6. Standard IEEE 6-bus test power system

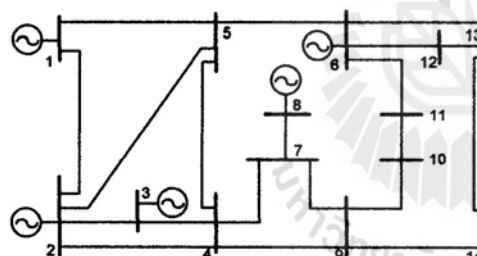


Fig. 7. Standard IEEE 14-bus test power system

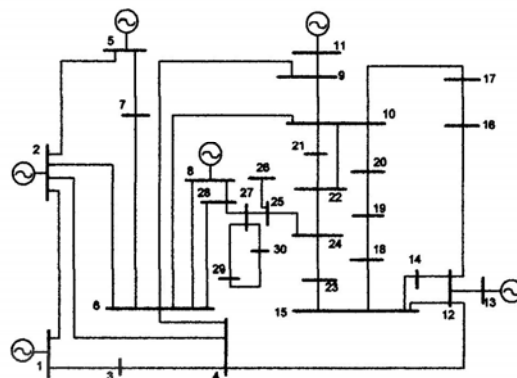


Fig. 8. Standard IEEE 30-bus test power system

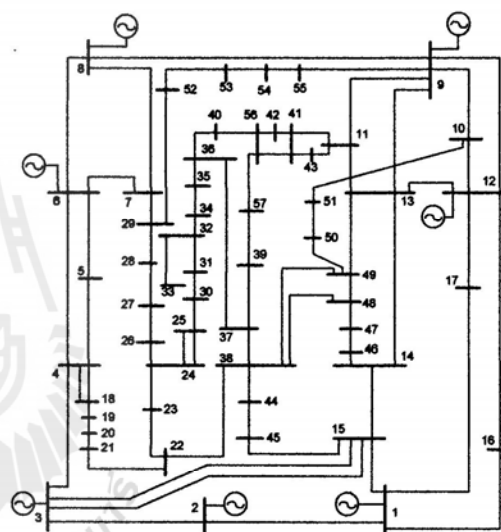


Fig. 9. Standard IEEE 57-bus test power system

TABLE V
RESULTS OF THE STANDARD IEEE 6-BUS TEST POWER SYSTEM FOR SMOOTH FUEL COST

Method	Total production cost (€/h)				CPU time (s)
	Minimum	Maximum	Average	S.D.	
SQP	351.5242	557.1320	418.8620	55.1839	2.9097
GA	383.6745	586.2633	450.1367	58.3261	62.2800
ABC	368.0630	538.5500	423.4920	38.0931	6.15388

TABLE VI
RESULTS OF THE STANDARD IEEE 14-BUS TEST POWER SYSTEM

Method	Total production cost (€/h)				CPU time (s)
	Minimum	Maximum	Average	S.D.	
SQP	372.6646	384.0442	374.0665	2.4761	9.2358
GA	373.2930	376.9141	374.3683	0.7561	100.0874
ABC	373.2492	374.8412	373.9864	0.5127	15.3139

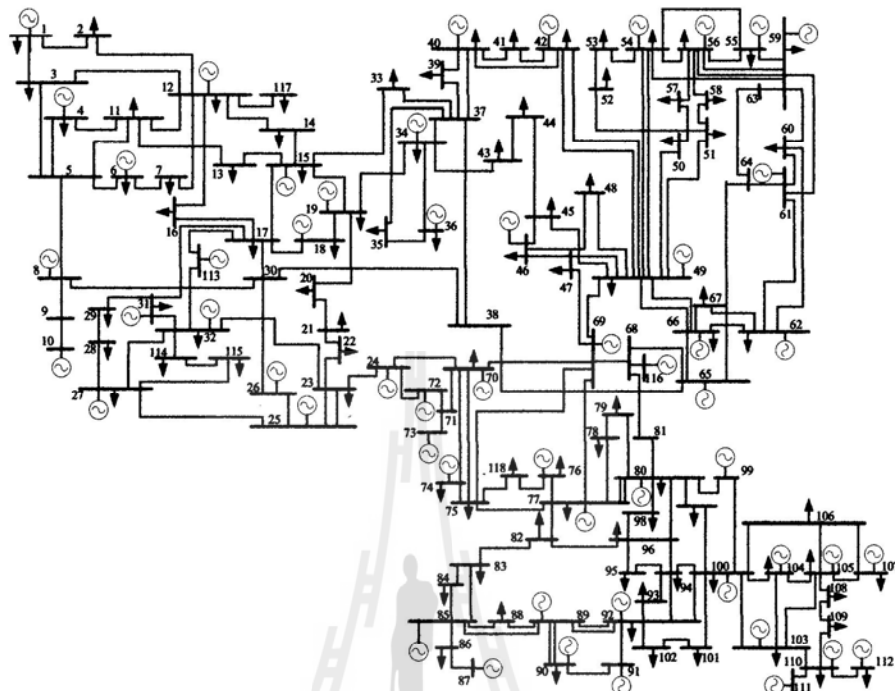


Fig. 10. Standard IEEE 118-bus test power system

TABLE VII
RESULTS OF THE STANDARD IEEE 30-BUS TEST POWER SYSTEM FOR SMOOTH FUEL COST

Method	Total production cost (€/h)				CPU time (s)
	Minimum	Maximum	Average	S.D.	
SQP	462.1570	8693.3500	1101.8900	1999.1000	76.8828
GA	462.4670	465.7670	464.0290	0.7487	457.4660
ABC	462.6990	465.1180	463.7330	0.4920	48.6542

TABLE VIII
RESULTS OF THE STANDARD IEEE 57-BUS TEST POWER SYSTEM FOR SMOOTH FUEL COST

Method	Total production cost (€/h)				CPU time (s)
	Minimum	Maximum	Average	S.D.	
SQP	$> 1 \times 10^6$	$> 1 \times 10^6$	$> 1 \times 10^6$	$> 1 \times 10^6$	460.7739
GA	589.2654	2026.8	712.213	274.4687	1436.2
ABC	586.7784	609.985	590.4034	3.9521	155.8379

TABLE IX
RESULTS OF THE STANDARD IEEE 118-BUS TEST POWER SYSTEM FOR SMOOTH FUEL COST

Method	Total production cost (€/h)				CPU time (s)
	Minimum	Maximum	Average	S.D.	
SQP	$> 1 \times 10^5$	$> 1 \times 10^5$	$> 1 \times 10^5$	$> 1 \times 10^5$	1799.9
GA	43095	377520	133140	69404	5651.5
ABC	3827.9	3850.5	3840.1	5.3286	638.8858

TABLE X
CPU TIME RATIO FOR SMOOTH FUEL COST

Test system	CPU time ratio with respect to the SQP method	CPU time ratio with respect to the GA method
6-bus	0.473	10.120
14-bus	0.603	6.536
30-bus	1.580	9.402
57-bus	2.957	9.216
118-bus	2.817	8.846

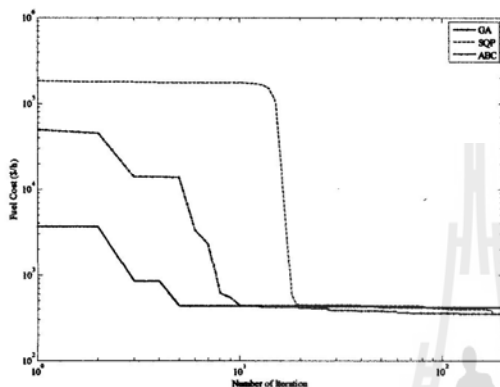


Fig. 11. Solution convergence for the 6-bus test system (smooth fuel cost case)

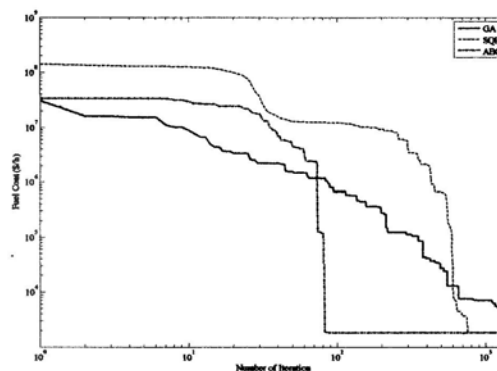


Fig. 14. Solution convergence for the 57-bus power system (smooth fuel cost case)

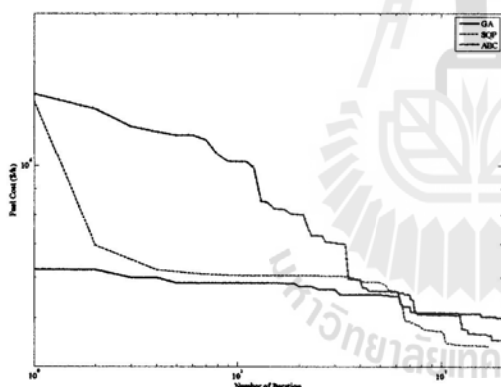


Fig. 12. Solution convergence for the 14-bus power system (smooth fuel cost case)

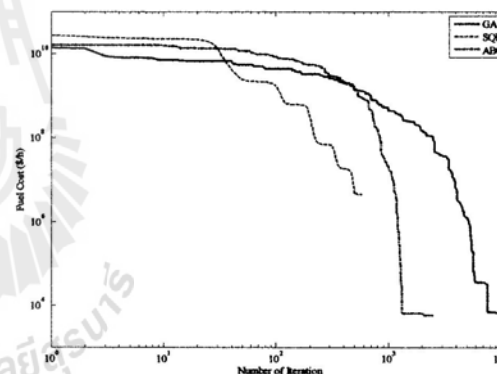


Fig. 15. Solution convergence for the 118-bus power system (smooth fuel cost case)

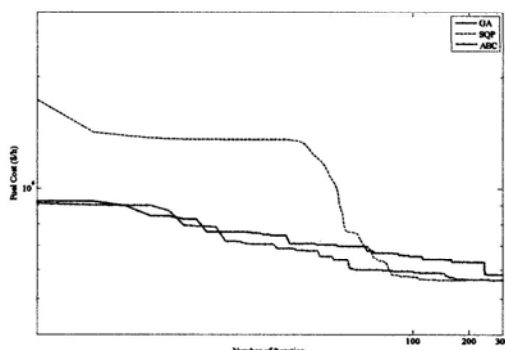


Fig. 13. Solution convergence for the 30-bus power system (smooth fuel cost case)

- *Non-smooth fuel cost case – valve point loading*

In this case, a valve-effect fuel-cost function was assigned to all generators. Three standard IEEE test power systems (6-bus, 14-bus and 30-bus) were used for test. This test case was performed with 30 computational trials per method. The results of each test system are presented in Tables 11 – 13, respectively.

TABLE XI
RESULTS OF THE STANDARD IEEE 6-BUS TEST POWER SYSTEM FOR NON-SMOOTH CASE

Method	Total production cost (€/h)				CPU time (s)
	Minimum	Maximum	Average	S.D.	
SQP	217.8005	251.2565	219.936	5.9582	0.7344
GA	217.9507	228.6866	219.766	2.4358	15.7273
ABC	217.746	219.986	218.737	0.4984	5.7416

TABLE XII
RESULTS OF THE STANDARD IEEE 14-BUS TEST POWER SYSTEM FOR NON-SMOOTH CASE

Method	Total production cost (€/h)				CPU time (s)
	Minimum	Maximum	Average	S.D.	
SQP	393.0719	620.1599	404.709	42.544	9.1813
GA	393.9104	426.8578	400.0034	7.9385	51.5541
ABC	352.3943	353.4678	353.1572	0.2896	15.3587

TABLE XIII
RESULTS OF THE STANDARD IEEE 30-BUS TEST POWER SYSTEM FOR NON-SMOOTH CASE

Method	Total production cost (€/h)				CPU time (s)
	Minimum	Maximum	Average	S.D.	
SQP	221.36	2907.47	347.081	493.168	76.0206
GA	221.271	229.192	224.06	1.55033	302.106
ABC	180.544	181.994	181.339	0.374565	48.8614

TABLE XIV
CPU TIME RATIO FOR NON-SMOOTH CASE

Test system	CPU time ratio with respect to the SQP method	CPU time ratio with respect to the GA method
6-bus	0.128	2.739
14-bus	0.598	3.357
30-bus	1.556	6.183

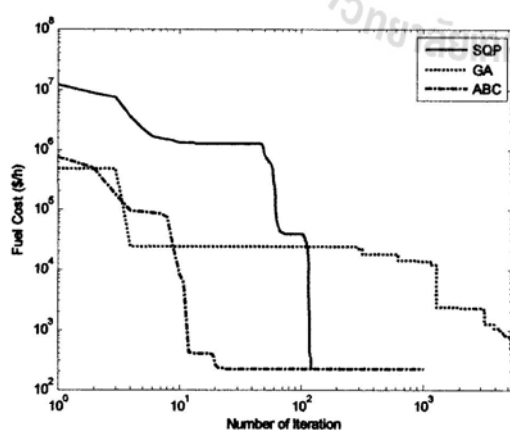


Fig. 16. Solution convergence for the 6-bus power system (non-smooth fuel cost)

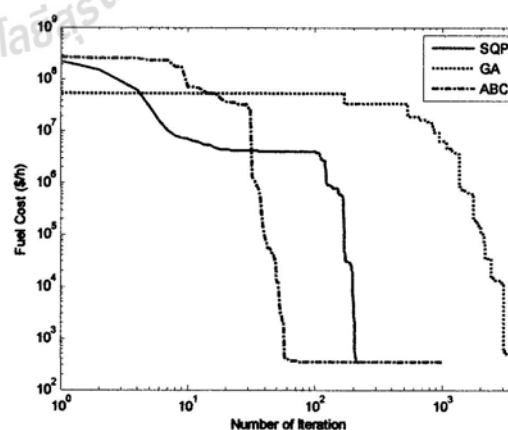


Fig. 17. Solution convergence for the 14-bus power system (non-smooth fuel cost)

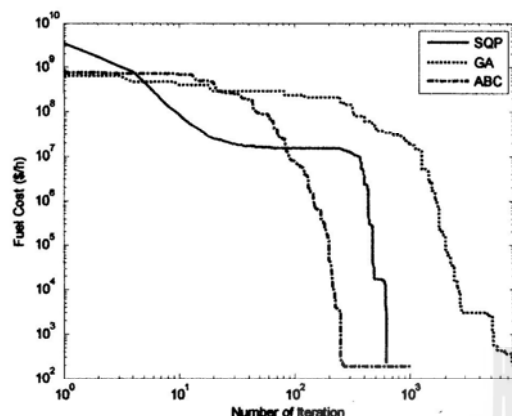


Fig. 18. Solution convergence for the 30-bus power system (non-smooth fuel cost)

The results show that, for the 6-bus system, the ABC can again obtain the lowest averaged minimum cost function (218.7370 €/h, 219.7660 €/h and 219.9360 €/h for ABC, GA and SQP respectively). Due to a small number of control variables to be optimised, the SQP can be an appropriate choice of solving the optimal power flow problem even the fuel-cost function is non-smooth. For the 14-bus test system, when comparing the averaged minimum costs obtained among those methods, the ABC is the best method (404.7090 €/h for the SQP, 400.0034 €/h for the GA and 353.15728 €/h for the ABC). However, with calculation time comparison, the ABC method can obtain the solution with the fastest calculation time consumed (15.3587 s) among the other intelligent search methods, while the others are far behind (51.5541 s and GA, respectively). The last test system is the 30-bus test system. The ABC is the best method (347.081 €/h for the SQP, 224.06 €/h for the GA and 181.339 €/h for the ABC). Although the ABC is the fastest method to find the solution, the ABC is the best among all when considering both the minimum objective value found and the lowest execution time. In addition, Table 11 described CPU time ratio comparisons between the ABC method and the other two methods for the non-smooth case. Moreover, the solution convergences for each test case were shown in Fig. 16 – 18. Although the SQP is the fastest method, the ABC can find the most accurate solution with satisfactory CPU time consumed.

VII. Conclusion

This paper described the use of artificial bees colony algorithm to find optimal power flow solutions. This work was conducted by 30 trials for both smooth and non-smooth fuel-cost functions in which five standard IEEE test power systems (6-bus, 14-bus, 30-bus, 57-bus and 118-bus) were employed. The test also applied the SQP and the genetic algorithm (GA) of 30 trials each for comparison. The results showed that the artificial bees colony algorithm can be the most accurate method with

satisfactory time consumed among all as it gives the smallest standard deviation of the 30 trial solutions for every test case. It also revealed that the SQP is suitable for optimal power flow problems with smooth quadratic fuel-cost functions where the total number of buses is small.

Acknowledgements

This work was supported by the Thailand Research Fund through the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program (Grant No. PHD/0047/2551) to Uthen Leeton and Thanatchai Kulworawanichpong.

References

- [1] A.H. El-Abiad and F.J. Jaimes, A method for optimum scheduling of power and voltage magnitude, *IEEE Transactions. Power Apparatus and System*, vol. PAS-88, 1969, pp. 413 – 422.
- [2] M.O. Mansour and T.M. Abdel-Rahman, Non-linear VAR optimization using decomposition and coordination, *IEEE Transactions. Power Apparatus and System*, vol. PAS-103, 1984, pp. 246 – 255.
- [3] H.W. Dommel and W.F. Tinney, Optimal power flow solutions, *IEEE Transactions. Power Apparatus and System*, vol. PAS-87, 1968, pp. 1866 – 1876.
- [4] A.J. Wood and B.F. Wollenburg, *Power Generation Operation and Control*, 2 (John Wiley & Sons, 1996)
- [5] Y. Hong-Tzer, Y. Pai-Chuan and H. Ching-Lien, Evolutionary programming based economic dispatch for units with non-smooth fuel cost functions, *IEEE Transactions Power System*, vol. 11, 1996, pp. 112 – 118.
- [6] W. Kit Po, Computational intelligence applications in unit commitment, economic dispatch and load flow, *The 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM-97)*, vol. 1, 1997, pp. 54–59.
- [7] D.C. Walters and G.B. Sheble, Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading, *IEEE Transactions on Power System*, vol. 8, 1993, pp. 1325–1332.
- [8] D. Khanh and W. Kit Po, Artificial intelligence-based machine-learning system for thermal generator scheduling, *IEE Proceeding. Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, 1995, pp. 195 – 201.
- [9] J.T. Ma and L.L. Lai, Evolutionary programming approach to reactive power planning, *IEE Proceeding. Generation, Transmission and Distribution*, vol. 143, 1996, pp. 365 – 370.
- [10] T.L. Nguyen and Q.A. Nguyen, Application of artificial bee colony algorithm (ABC) for reconfiguring distribution network, *The 10th International Conference on Computer Modelling and Simulation (ICCMS-2011)*, vol. 1, 2010, pp. 102–106.
- [11] D. Karaboga, A new design method based on artificial bees colony algorithm for digital IIR filters, *Journal of the Franklin Institute*, vol. 346, 2009, pp.328 – 348.
- [12] D. Karaboga and B. Baturk, A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony optimization, *Journal of Global Optimization*, vol. 39, 2007, pp. 459 – 471.
- [13] A. Jr. Santos and G.R.M. da Costa, Optimal-Power-Flow Solution by Newton's Method Applied to An Augmented Lagrangian Function, *IEE Proceeding. Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, 1995, pp. 33 – 36.
- [14] M.G. Murlithi, Optimal Power Flow for The High Voltage Network of The Kenya Power System, *The 4th IEEE Africon*, vol. 1, 1996, pp. 162 – 168.
- [15] H.C. Leung, and T.S. Chung, Optimal Power Flow with A Versatile FACTS Controller by Genetic Algorithm Approach, *Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 4, 2000, pp. 2806–2811.

- [16] M.A. Abido, Optimal Power Flow using Tabu Search Algorithm, *Electric Power Components and Systems*, vol. 30, 2002, pp. 469-483.
- [17] M.A. Abido, "Optimal Power Flow using Particle Swarm Optimization", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 24, 2002, pp. 563-571.
- [18] G. Zwe-lee, Constrained optimal power flow by mixed-integer particle swarm optimization, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, 2005, pp. 243 - 250.
- [19] K. Vaisakh and L.R. Srinivas, Differential Evolution Approach for Optimal Power Flow Solution, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 1, 2005, pp. 261 - 268.
- [20] M. Younes, M. Rahli and L. Abdelhakem-Koridak, Optimal Power Flow Based on Hybrid Genetic Algorithm, *Journal of Information Science and Engineering*, vol. 1, 2007, pp. 1801 - 1816.
- [21] K. Tangpatiphan and A. Yokoyama, Evolutionary Programming Incorporating Neural Network for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow, *IEEE International Conferences on Power System Technology*, vol. 1, 2008, pp. 1 - 8.
- [22] Z. Wenjuan, L. Fangxing and L.M. Tolbert, Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow (VSCOPF) with Two Sets of Variables (TSV) for Reactive Power Planning, *IEEE-PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, vol. 1, 2008, pp. 1 - 6.
- [23] I. Oumarou, J. Daozhuo and Y. Cao, Particle Swarm Optimization Applied to Optimal Power Flow Solution, *International Conference on Natural Computation (ICNC'09)*, vol. 3, 2009, pp. 248 - 288.
- [24] K. Tangpatiphan and A. Yokoyama, Optimal Power Flow with steady-state voltage stability consideration using Improved Evolutionary, *PowerTech, IEEE Bucharest*, 2009, pp. 1 - 7.
- [25] V. PhanTu, L. DinhLuong, V. NgocDieu and J. Tlustý, A Novel Weight-Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Optimal Power Flow and Economic Load Dispatch Problems, *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2010, pp. 1 - 7.
- [26] D. Karaboga and B. Basturk, A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony algorithm (ABC) Algorithm, *Journal of Global Optimization*, vol. 39, 2007, pp. 459 - 471.
- [27] Q. Haiyan and S. Xinling, On the Analysis of Performance of the Improved Artificial-Bee-Colony Algorithm, *International Conference on Natural Computation (ICNC'08)*, vol. 7, 2008, pp. 654 - 658.
- [28] C. Chidambaram and H.S. Lopes, A New Approach for Template Matching in Digital Images Using An Artificial Bee Colony Algorithm, *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC'09)*, 2009, pp. 146 - 151.
- [29] J. Nocedal, and S.J. Wright, Numerical optimization, (Springer, 2000).
- [30] S.G. Nash and A. Sofer, Linear and nonlinear programming, (McGraw-Hill, 1996).
- [31] Z. Haibo, Z. Lizi and M. Fanling, Reactive power optimization based on genetic algorithm, *International Power Conference on Power System Technology* vol. 2, 18-21 August, 1998, pp. 1448 - 1453.
- [32] K. Somsai, A. Oonsivilai, A. Srikaew and T. Kulworawanichpong, Optimal PI controller design and simulation of a static var compensator using MATLAB's SIMULINK, *The 7th WSEAS International Conference on Power Systems*, 2007, pp. 30 - 35.
- [33] K. Vaisakh, P. Praveena and S. Rama Mohana Rao, Solving optimal power flow problems using bacterial swarm optimization algorithm, *International Conference Advance in Power System Control, Operation and Management (APSCOM'09)*, 2009, pp. 1 - 7.
- [34] X.P. Zhang and E.J. Handschin, Advanced implementation of UPFC in a nonlinear interior-point OPF, *Generation, Transmission and Distribution*, vol. 148, 2006, pp. 489 - 496.
- [35] P.N. Biskas, N.P. Ziogios, A. Tellidou, C.E. Zoumas, A.G. Bakirtzis and V. Petridis, Comparison of two metaheuristics with mathematical programming methods for the solution of OPF

Generation, Transmission and Distribution, vol. 153, 2006, pp. 16 - 24.

- [36] M.J. Rider, C.A. Castro, M.F. Bedrinana and A.V. Garcia, Towards a fast and robust interior point method for power system applications, *Generation, Transmission and Distribution*, vol. 151, 2004, pp. 575 - 581.



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.



Uthen Leeton was born in Loei, Thailand, on October 25, in 1985. He received B.Eng. with first-class honour in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand (2007). He is a Ph.D. Student of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. Mr. Uthen's research fields is interest include a power system analysis, optimization and artificial intelligent techniques. He has joined the school since June 2009, as a research assistant and a member in Power System Research Unit, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.



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

นางสาวอุมารณ์ ขวัญเนตร์ เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนคัสดรุณี จังหวัดฉะเชิงเทรา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเดิม ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1 (2) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 (4) ปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (5) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 และ (6) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 โดยมีความสนใจในด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง และการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดัง ภาคผนวก ก.

