

วิธีแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาเงื่อนไขการจำกัดกระแสลัดวงจร

นายสมบูรณ์ นามโชติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

SOLUTION METHODS FOR OPTIMAL POWER FLOW CONSIDERING SHORT-CIRCUIT
CURRENT LIMITATION

Mr. Somboon Namchoat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วิธีแก้ปัญหาคาร์บอนของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด

โดยพิจารณาเงื่อนไขการจำกัดกระแสลัดวงจร

โดย

นายสมบูรณ์ นามโชติ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุนเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุลยศ อุดมวงศ์เสรี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุนเจริญ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุรัชย์ ชัยทัศน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จิราพร ศิริคำ)

สมบูรณ์ นามโชติ : วิธีแก้ปัญหาคารไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาเงื่อนไขการจำกัดกระแสลัดวงจร. (SOLUTION METHODS FOR OPTIMAL POWER FLOW CONSIDERING SHORT-CIRCUIT CURRENT LIMITATION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. แนนบุญ หุนเจริญ, 104 หน้า.

ปัญหาคารไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดที่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงโดยทั่วไปยังไม่พิจารณาเงื่อนไขการจำกัดกระแสลัดวงจร ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติสำหรับระบบส่งไฟฟ้าในบริเวณรอบเมืองใหญ่ที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาคารไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดที่พิจารณาเงื่อนไขการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยประยุกต์วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีความซับซ้อนสูงได้โดยสะดวก พิจารณาเงื่อนไขจุดทำงานของระบบ เงื่อนไขความมั่นคงของระบบ ได้แก่ เสถียรภาพเชิงแรงดัน การทำงานของระบบกรณีสายส่งหลุด 1 วงจร และพิกัดกระแสลัดวงจร นอกจากนี้อาจจะมีเงื่อนไขเฉพาะเพิ่มเติมในแต่ละวิธีจำกัดกระแสลัดวงจรที่พิจารณา ซึ่งในที่นี้ได้แก่ เงื่อนไขของการแบ่งแยกบัส การเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง และการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแส โดยกำหนดรูปแบบปัญหาเพื่อหาตำแหน่งและจำนวนการเปลี่ยนแปลงระบบอย่างเหมาะสมที่สุด

ทดสอบสมรรถนะกับระบบส่งไฟฟ้าบริเวณรอบกรุงเทพฯ พบว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ อีกทั้งยังใช้เวลาการคำนวณน้อยกว่าวิธีการค้นหาแบบปัญญาเชิงคำนวณอื่น นอกจากนี้ในการประยุกต์ใช้งานผู้ใช้ยังสามารถระบุขอบเขตของบัสที่จะพิจารณาเปลี่ยนแปลงเพื่อช่วยลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณได้อีกด้วย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2556.....

5470405821: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: OPTIMAL POWER FLOW/ SHORT-CIRCUIT CURRENT LIMITATION/ GENETIC ALGORITHM/ PARTICLE SWARM OPTIMIZATION/ N-1 CONTINGENCY

SOMBOON NAMCHOAT: SOLUTION METHODS FOR OPTIMAL POWER FLOW CONSIDERING SHORT-CIRCUIT CURRENT LIMITATION. ADVISOR: ASST.PROF.NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., 104 pp.

Generally, problem formulation of the security constrained optimal power flow (SCOPF) does not consider the limit of short circuit current constraint, which may cause damage to a transmission system in metropolitan area. This thesis proposes the solution method of SCOPF with consideration of the short-circuit current limitation, using Particle Swarm Optimization (PSO) technique, of which it can conveniently be applied to a complex optimal power flow problem. There are three sets of constraints which are the system operating constraints, the security constraints and the additional specific constraints. For the security constraints, this thesis considers the voltage stability, the N-1 contingency and the short-circuit current limit. In addition, the specific constraints will depend on selected short-circuit current limitation technique, which in this case includes bus splitting, line bypassing and current limiting reactor. The formulated problem is to minimize the changes in network configuration while maintaining reliability and stability of the system.

The test results, using the transmission system serving Bangkok area, show that the proposed solution method can find the optimal solution with less computational time, when comparing to other computational intelligent techniques in respective cases. In practice, the computational time can further be reduced by the user pre-defining the group of buses that are allowed to be reconfigured.

Department:Electrical Engineering.....Student's Signature.....

Field of Study:Electrical Engineering.....Advisor's Signature.....

Academic Year: ..2013.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กระผมขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ พร้อมทั้งแรงกระตุ้นและแรงบันดาลใจในการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุศลศ อุดมวงศ์เสรี อาจารย์ ดร. สุรัชชัย ชัยทัศนีย์ และดร. จิราพร ศิริคำ ที่ได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์พร้อมทั้งให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะระหว่างการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้า กำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์ทุนโครงการศิษย์ก้นกุฏิเป็นทุนการศึกษาในการเรียนระดับปริญญาโทมาบัดนี้

ขอขอบคุณ ผู้ร่วมวิจัยในห้องปฏิบัติการที่คอยให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ตลอดจนญาติทุกๆ ท่านที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด.....	5
2.1 รูปแบบของปัญหา.....	5
2.2 วิธีการแก้ปัญหา.....	10
2.2.1 การค้นหาคำตอบเชิงศีกษาสำนึก.....	11
2.2.2 การค้นหาเชิงวิวัฒนาการ.....	12
2.2.3 การค้นหาแบบการเคลื่อนที่เป็นกลุ่ม.....	14
2.3 การค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค.....	15
2.3.1 องค์ประกอบพื้นฐาน.....	17
2.3.2 วิธีการประยุกต์.....	18
2.4 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	20
บทที่ 3 การประเมินความมั่นคงของระบบ.....	21
3.1 ความมั่นคงเสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	21
3.2 ความมั่นคงเมื่อมีสายส่งหลุด 1 วงจร.....	22
3.3 การจำกัดกระแสลัดวงจร.....	25
3.3.1 การแบ่งแยกบัส.....	25

3.3.2	การเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง	27
3.3.3	การประยุกต์ใช้รีแอกเตอร์จำกัดกระแส	28
บทที่ 4	ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร	30
4.1	นิยามของตัวแปร	30
4.2	รูปแบบปัญหา	31
4.2.1	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	31
4.2.2	เงื่อนไขบังคับ	31
4.2.2.1	เงื่อนไขจุดทำงานของระบบ	31
4.2.2.2	เงื่อนไขความมั่นคงของระบบ	32
4.2.2.3	เงื่อนไขเฉพาะ	32
4.3	การประยุกต์วิธีค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค	33
4.4	การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	43
บทที่ 5	การทดสอบสมรรถนะ	46
5.1	ระบบทดสอบ	46
5.2	ผลการทดสอบสมรรถนะ	50
5.2.1	กรณีศึกษาที่ 1 การหาค่าราคาเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดกับระบบ IEEE 30 บัส	51
5.2.2	กรณีศึกษาที่ 2 การจำกัดกระแสลัดวงจรด้วยการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งกับระบบส่งไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพฯ	53
5.2.3	กรณีศึกษาที่ 3 การจำกัดกระแสลัดวงจรด้วยการแบ่งแยกบัสกับระบบส่งไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพฯ	66
5.2.4	กรณีศึกษาที่ 4 การจำกัดกระแสลัดวงจรด้วยการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสกับระบบส่งไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพฯ	75
5.2.4.1	กรณีที่ 1 พิจารณาค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแส 2 ค่า และไม่อนุญาตให้มีการแบ่งแยกบัสถาวร	77
5.2.4.2	กรณีที่ 2 พิจารณาค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแส 2 ค่า และอนุญาตให้มีการแบ่งแยกบัสถาวรได้	81
5.2.4.3	กรณีที่ 3 พิจารณาค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแส 6 ค่า และไม่อนุญาตให้มีการแบ่งแยกบัสถาวร	82
5.3	แนวทางการประยุกต์ใช้งาน	87
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	90

6.1 สรุปผลการวิจัย.....	90
6.2 ข้อเสนอแนะ	92
รายการอ้างอิง	93
ภาคผนวก.....	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	104

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดง OPF และ SCOPF	6
ตารางที่ 2.2 ผลตอบ SCOPF.....	9
ตารางที่ 4.1 ค่าขอบเขตความเร็วของอนุภาค.....	35
ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างการให้คะแนนของการเปลี่ยนแปลงระบบ	38
ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อปรับจำนวนอนุภาคของตัวอย่าง.....	44
ตารางที่ 4.4 กรณีของค่าคงที่ความเร่งของตัวอย่าง	44
ตารางที่ 5.1 สัมประสิทธิ์ราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบ IEEE 30 บัส	47
ตารางที่ 5.2 แสดงค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสของแต่ละสถานีในเขตกรุงเทพ และปริมณฑล ...	49
ตารางที่ 5.3 ราคาซื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดจากการค้นหาแต่ละอัลกอริทึม	52
ตารางที่ 5.4 เปอร์เซนต์ความแตกต่างของคำตอบ.....	52
ตารางที่ 5.5 เวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อปรับจำนวนอนุภาคของกรณีศึกษาที่ 2	57
ตารางที่ 5.6 กรณีค่าคงที่ความเร่งของกรณีศึกษาที่ 2	58
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2	59
ตารางที่ 5.8 แสดงเวลาการคำนวณที่ใช้ของแต่ละอัลกอริทึมในกรณีศึกษาที่ 2	64
ตารางที่ 5.9 ตารางเปรียบเทียบเวลาการค้นหารูปแบบปัญหากรณีศึกษาที่ 2	65
ตารางที่ 5.10 แสดงรายละเอียดของคำตอบของการแบ่งแยกบัส	70
ตารางที่ 5.11 แสดงเวลาการคำนวณที่ใช้ของแต่ละอัลกอริทึมในกรณีศึกษาที่ 3	74
ตารางที่ 5.12 แสดงรายละเอียดของคำตอบของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการ แบ่งแยกบัสกรณีที่ 1	77
ตารางที่ 5.13 แสดงรายละเอียดของคำตอบของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการ แบ่งแยกบัสกรณีที่ 2	82
ตารางที่ 5.14 ขนาดของ CLR ที่สมมติขึ้นมา.....	82
ตารางที่ 5.15 แสดงรายละเอียดของคำตอบของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการ แบ่งแยกบัสกรณีที่ 2	83
ตารางที่ 5.16 แสดงเวลาการคำนวณที่ใช้ของแต่ละอัลกอริทึมในกรณีศึกษาที่ 4	86
ตารางที่ 5.17 บัสที่อนุญาตให้แบ่งแยก	87
ตารางที่ 5.18 เวลาที่ใช้ในการคำนวณของการจำกัดจำนวนบัสที่อนุญาตให้เปลี่ยนแปลง	88
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส	97

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	98
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	98
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	100

สารบัญญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงสถานะความปลอดภัย	7
ภาพที่ 2.2 ระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2	8
ภาพที่ 2.3 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง	9
ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างอัลกอริทึมของปัญญาเชิงคำนวณ	11
ภาพที่ 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคก่อนพบคำตอบ	16
ภาพที่ 2.6 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อพบคำตอบ	16
ภาพที่ 2.7 การทำงานทั่วไปของ PSO	17
ภาพที่ 3.1 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า ณ สภาวะพังทลายของแรงดัน	21
ภาพที่ 3.2 เหตุการณ์สายส่งหลุด	23
ภาพที่ 3.3 การเชื่อมต่อแบบขนานที่ลดลงของสายส่ง ภายหลังจากแบ่งแยกบัส	25
ภาพที่ 3.4 จำนวนของแหล่งจ่ายที่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร ณ จุดที่เกิดลัดวงจร	26
ภาพที่ 3.5 การแบ่งแยกบัสแบบถาวร และไม่ถาวร	26
ภาพที่ 3.6 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง	27
ภาพที่ 3.7 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งแบบที่ 1	28
ภาพที่ 3.8 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งแบบที่ 2	28
ภาพที่ 3.9 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งแบบที่ 3	29
ภาพที่ 4.1 แสดงกระบวนการแก้ปัญหาด้วยวิธี PSO	34
ภาพที่ 4.2 กระบวนการตรวจสอบคำตอบเริ่มต้น	35
ภาพที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์คุณภาพของชุดคำตอบ	36
ภาพที่ 4.4 กระบวนการตรวจสอบ N-1	37
ภาพที่ 4.5 แสดงหลักการหาค่า <i>pbest</i> และ <i>gbest</i>	39
ภาพที่ 4.6 กระบวนการปรับค่าเวกเตอร์ความเร็วและเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค	40
ภาพที่ 4.7 กระบวนการแก้ปัญหาของปัญหาหอรอง	42
ภาพที่ 4.8 การลู่เข้าหาคำตอบเมื่อปรับจำนวนอนุภาค	43
ภาพที่ 4.9 การลู่เข้าหาคำตอบเมื่อปรับค่าคงที่ความเร่ง	45
ภาพที่ 5.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส	46
ภาพที่ 5.2 การเชื่อมต่อสายส่งของแต่ละสถานีไฟฟ้าแรงสูงในกรุงเทพฯ และปริมณฑล	47
ภาพที่ 5.3 รูปแผนภาพเส้นเดี่ยวของวงจรไฟฟ้าในกรุงเทพฯ และปริมณฑล	48

ภาพที่ 5.4 ขนาดกระแสลัดวงจรในกรณีฐานที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล	48
ภาพที่ 5.5 ค่า PQVSI ของสายส่งกรณีฐานในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล	50
ภาพที่ 5.6 การเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งที่บัส k.....	53
ภาพที่ 5.7 แสดงการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งของตัวอย่าง.....	54
ภาพที่ 5.8 การลู่เข้าหาคำตอบเมื่อปรับจำนวนอนุภาคของกรณีศึกษาที่ 2	57
ภาพที่ 5.9 การลู่เข้าหาคำตอบเมื่อปรับค่าคงที่ความเร่งของกรณีศึกษาที่ 2	58
ภาพที่ 5.10 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งที่บัสบางกอกน้อย.....	59
ภาพที่ 5.11 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งที่บัสพระนครเหนือ.....	60
ภาพที่ 5.12 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งที่บัสพระนครใต้.....	60
ภาพที่ 5.13 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล	61
ภาพที่ 5.14 ขนาดแรงดันของบัสหลังเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งในเขตกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล	61
ภาพที่ 5.15 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลงหลังเปลี่ยนเส้นทางการ เชื่อมต่อสายส่งในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล.....	62
ภาพที่ 5.16 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหลังเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งใน เขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล	62
ภาพที่ 5.17 ค่า PQVSI ของสายส่งหลังเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งในเขตกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล	63
ภาพที่ 5.18 แสดงการลู่เข้าหาคำตอบของทั้งสามอัลกอริทึมในกรณีศึกษาที่ 2	64
ภาพที่ 5.19 แสดงการลู่เข้าหาคำตอบของ 2-stage PSO.....	65
ภาพที่ 5.20 การแบ่งแยกบัสที่บัส k.....	67
ภาพที่ 5.21 รูปแบบการแบ่งแยกบัสของตัวอย่าง.....	68
ภาพที่ 5.22 ก่อนและหลังการแบ่งแยกบัสพระนครใต้.....	70
ภาพที่ 5.23 ก่อนและหลังการแบ่งแยกบัสพระนครเหนือ.....	71
ภาพที่ 5.24 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล	71
ภาพที่ 5.25 ขนาดแรงดันของบัสหลังแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล.....	72
ภาพที่ 5.26 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลงหลังแบ่งแยกบัสในเขต กรุงเทพฯ และปริมณฑล	72

ภาพที่ 5.27 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหลังแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล	73
ภาพที่ 5.28 ค่า PQVSI ของสายส่งหลังแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล.....	73
ภาพที่ 5.29 แสดงการลู่เข้าหาคำตอบของทั้งสามอัลกอริทึม	74
ภาพที่ 5.30 ก่อนและหลังทำการติดตั้ง CLR ร่วมกับการแบ่งแยกบัสที่บัสแจ้งวัฒนะ	78
ภาพที่ 5.31 ก่อนและหลังทำการติดตั้ง CLR ร่วมกับการแบ่งแยกบัสที่บัสบางกอกน้อย.....	78
ภาพที่ 5.32 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัด กระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 1	79
ภาพที่ 5.33 ขนาดแรงดันของบัสหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัส ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 1	79
ภาพที่ 5.34 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลงหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์ จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 1.....	80
ภาพที่ 5.35 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแส ร่วมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 1	80
ภาพที่ 5.36 ค่า PQVSI ของสายส่งหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยก บัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 1.....	81
ภาพที่ 5.37 ก่อนและหลังการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกที่บัสพระนคร เหนือ	83
ภาพที่ 5.38 ก่อนและหลังการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกที่บัสธนบุรีใต้.....	83
ภาพที่ 5.39 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัด กระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลกรณีที่ 2.....	84
ภาพที่ 5.40 ขนาดแรงดันของบัสหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัส ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 2	84
ภาพที่ 5.41 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลงหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์ จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 2.....	85
ภาพที่ 5.42 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแส ร่วมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 2	85
ภาพที่ 5.43 ค่า PQVSI ของสายส่งหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยก บัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 2.....	86
ภาพที่ 5.44 เวลาที่ใช้ในการคำนวณของการจำกัดจำนวนบัสที่อนุญาตให้เปลี่ยนแปลง.....	89

ภาพที่ ก.1 จุดการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงของเขตกรุงเทพ และปริมณฑล กับพื้นที่ภาค กลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก	101
ภาพที่ ก.2 แผนภาพเส้นเดียวแสดงการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงของเขตกรุงเทพ และ ปริมณฑล กับพื้นที่ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก	102

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับความต้องการปริมาณไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น การควบคุมให้ระบบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอในขณะที่ระบบยังสามารถทำงานอยู่ภายใต้ขอบเขตที่ปลอดภัยได้นั้น มีแนวคิดหลายแนวคิดที่ออกแบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่รวมข้อจำกัดหลายอย่างในระบบไฟฟ้า โดยอาศัยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด (Optimal power flow problem) [1] ซึ่งถือเป็นรูปแบบปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดนี้ได้รับความนิยมนำมาประยุกต์กับระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาจุดการทำงานของระบบที่เหมาะสมที่สุด โดยแต่ละปัญหาจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับว่าระบบนั้นมีวัตถุประสงค์เป็นอย่างไรเช่น ต้องการลดกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของระบบให้น้อยที่สุดโดยระบบยังทำงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับ หรือต้องการวางแผนการเดินทางเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยคำนึงถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าทุกวัตถุประสงค์ล้วนแล้วแต่ต้องทำงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับควบคุมไปด้วย ในบางปัญหาอาจจะเพิ่มเงื่อนไขความมั่นคงขึ้นมาอีกเพื่อคงความมั่นคงและเสถียรภาพของระบบไว้ [2] ซึ่งจะเรียกปัญหานี้ว่า ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดที่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง (Security constrained optimal power flow problem)

การขยายระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรสูงเกินค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน [3] อาจสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ป้องกันและส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลังได้ วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรสูงในปัจจุบันที่ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) มีความสนใจ และได้ทำวิจัยขึ้นเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบจริง [3-5] โดยมากจะเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ภายหลังการเปลี่ยนแปลงต้องทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าว่ายังอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้หรือไม่ อีกทั้งจะส่งผลกระทบต่อความมั่นคงและเสถียรภาพของระบบด้วยหรือไม่ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงระบบจึงถือเป็นปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดที่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงรูปแบบหนึ่ง ดังนั้นจำเป็นต้องมีเทคนิคในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการทำงานในแต่ละวัตถุประสงค์ของระบบ

การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดประกอบด้วยหลายอัลกอริทึม ในอดีตได้นำเสนอวิธีการ gradient method, Newton method, Linear programming และ Mixed-integer linear programming [2,6] แต่ยังมีข้อเสียที่จะนำมาแก้ปัญหาอยู่มากเช่น ยากต่อการ

กำหนดให้อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขข้อสมการ ค่อนข้างมีปัญหาเรื่องการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุด หรือชอบลู่เข้าคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ถูกกำหนดให้เป็นแบบเชิงเส้นเท่านั้น ทำให้มีความแม่นยำต่ำ เป็นต้น ปัจจุบันมีวิธีการแก้ปัญหาที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานคือ การค้นหาคำตอบแบบปัญญาเชิงคำนวณ (Computational Intelligent Techniques) [7] เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ อีกทั้งใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการแก้ปัญหาในอดีต ซึ่งการค้นหาแบบปัญญาเชิงคำนวณประกอบด้วยหลายอัลกอริทึม ได้แก่ วิธีการค้นหาแบบตามู (Tabu Search) วิธีการค้นหาเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) หรือวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) เป็นต้น โดยแต่ละวิธีมีทั้งข้อดี และข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงข้อดี ข้อเสียของแต่ละวิธี และได้เลือกใช้วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสำหรับนำมาประยุกต์แก้ปัญหาให้มีความเหมาะสมมากขึ้น อาทิเช่น คุณภาพคำตอบที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ใช้เวลาการคำนวณลดน้อยลง และได้นำเสนอว่าวิธีการค้นหาคำตอบดังกล่าวมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานอย่างไร เพื่อให้ได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังนำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคแบบสองชั้น ที่มีการทำงานซ้อนทับกันอยู่

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อนำเสนอวิธีที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาเงื่อนไขกระแสลัดวงจร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. พิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรเฉพาะการแบ่งแยกบัส (Bus splitting) การเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง (Line by-pass) และการประยุกต์ใช้รีแอกเตอร์จำกัดกระแส ร่วมกับการแบ่งแยกบัส
2. พิจารณาระบบส่งไฟฟ้ากำลังที่สภาวะอยู่ตัว (Steady state)
3. พิจารณาเงื่อนไขการทำงานของระบบ ได้แก่ สมดุลของกำลังไฟฟ้าที่บัส พิกัดของแรงดันที่บัส พิกัดของสายส่ง พิกัดของหม้อแปลง พิกัดการจ่ายกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
4. พิจารณาเงื่อนไขกระแสลัดวงจร เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันแบบ PQ และเงื่อนไขความมั่นคง เมื่อมีสายส่งหลุดออก 1 วงจรเป็นเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ ในการหาตำแหน่งและจำนวนของการเปลี่ยนแปลงระบบ
5. พิจารณาการลัดวงจรเป็นแบบสามเฟสสมดุลเท่านั้น

6. ใช้วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคในการแก้ปัญหา
7. ทดสอบสมรรถนะของวิธีการแก้ปัญหากับระบบ IEEE 30 บัส และระบบส่งไฟฟ้าในเขตกรุงเทพ และปริมณฑล
8. ปรับหาค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมให้มีความเหมาะสมกับปัญหา
9. วิเคราะห์ผลการทดสอบ และเปรียบเทียบวิธีการแก้ปัญหามีความเหมาะสมที่สุด
10. ออกแบบ และทดสอบโดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 1.1 รวบรวมข้อมูลและศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด
 - 1.2 ศึกษาบทความเกี่ยวกับวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรด้วยการแบ่งแยกบัส การเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง และการใช้รีแอกเตอร์จำกัดกระแส
 - 1.3 ศึกษาบทความเกี่ยวกับวิธีการแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด
 - 1.4 ศึกษาบทความเกี่ยวกับวิธีการค้นหาค่าตอบแบบตาบู่ การค้นหาเชิงพันธุกรรม และวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค
2. วิเคราะห์และระบุปัญหาที่จะทำการศึกษา
3. กำหนดขอบเขตรวมถึงรายละเอียดของข้อมูลต่างๆที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัยสำหรับสร้างระบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ และออกแบบการทดลอง
4. ทำการพัฒนาโปรแกรมตามการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB และทดสอบสมรรถนะกับระบบทดสอบมาตรฐานและระบบส่งไฟฟ้า
5. ปรับหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบ
6. วิเคราะห์ สรุปผลงานวิจัยพร้อมทั้งข้อเสนอแนะ
7. เรียบเรียงผลงานวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. วิธีการที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดโดยคำนึงถึงความปลอดภัยต่างๆ ของระบบ ใช้เวลาการคำนวณน้อย และสามารถนำไปใช้กับระบบทดสอบใดๆ ได้

1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทประกอบด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดที่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง จากนั้นจะกล่าวถึงวิธีการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบปัญญาเชิงคำนวณ และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงการประเมินเงื่อนไขความมั่นคงของระบบภายหลังมีการเปลี่ยนแปลง

บทที่ 4 กล่าวถึงรูปแบบปัญหา และเงื่อนไขบังคับทั่วไป อีกทั้งยังกล่าวถึงการประยุกต์วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคกับรูปแบบปัญหาดังกล่าวด้วย

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึมกับกรณีทดสอบต่างๆ

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

การไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถนำมาวิเคราะห์สภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังได้ โดยผู้ดูแลระบบสามารถรับรู้ถึงจุดทำงานของระบบในขณะนั้นๆ และปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับระบบในอนาคตได้ ปัญหาที่สำคัญที่เกิดที่สภาวะการทำงานปกติได้แก่ มีกำลังงานสูญเสียในระบบมากเกินไป หรือเกิดแรงดันตกมากกว่าขอบเขตที่กำหนด นอกจากนี้เรื่องการทำงานแล้วปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์ก็เป็นหนึ่งสิ่งที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ ทุกประเด็นจึงนำไปสู่ปัญหาที่เรียกว่า ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแล้วถือปัญหานี้เป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งโดยมากจะมีลักษณะของปัญหาที่ไม่เป็นเชิง ในบทนี้จะกล่าวถึงปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงเพิ่มขึ้นมา พร้อมยกตัวอย่างเงื่อนไขความมั่นคงต่างๆ และจะกล่าวถึงวิธีแก้ปัญหาคต่อไป

2.1 รูปแบบของปัญหา

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal power flow problem: OPF) ถูกนำเสนอผ่านงานวิจัยของคาร์เพนทีเยร์ (Carpentier) [1-3] ในปี 1962 รูปแบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นการค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างบัสต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุดในการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแส ณ จุดต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะการทำงานปกติ ขนาดและมุมของศักดาทางไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ในระบบ กระแสที่ไหลตามสายส่งทุกเส้น กระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และที่จ่ายให้โหลด กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปรากฏจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในสายส่งและโหลด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด [8-10] ประกอบด้วยหลายรูปแบบ แต่โดยทั่วไปแล้วได้แก่ การหาค่าราคาเชื้อเพลิง หรือราคากำลังผลิตที่เหมาะสม การลดกำลังสูญเสียให้มีค่าน้อยที่สุด การหาตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด หรือการหาตำแหน่งที่จะติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุด เป็นต้น รูปแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขจำกัดสามารถเขียนอยู่ในรูปทั่วไปดังนี้

$$\text{Min} \quad f(x, u) \quad 2.1$$

$$\text{Subject to} \quad g(x, u) = 0 \quad 2.2$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad 2.3$$

โดย $f = (x, u)$ เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $g(x, u) = 0$ เป็นเงื่อนไขบังคับสมการ และ $h(x, u) \leq 0$ เป็นเงื่อนไขบังคับอสมการ ส่วนเวกเตอร์ x ประกอบไปด้วยตัวแปรที่ไม่อิสระต่อกัน และ u ประกอบไปด้วยตัวแปรที่ต้องการควบคุม เช่น ค่ากำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสที่ไหลในสายส่งกระแสตรง การตั้งค่าแท๊ปของหม้อแปลง เป็นต้น

ข้อจำกัดหลักๆ ของรูปแบบปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดนั้นจะเน้นถึงองค์ประกอบของระบบเดียว ว่าที่เวลานั้นๆ ในการดำเนินการของระบบสิ่งจำเป็นที่จะต้องรู้คือ

- (1.) เหตุการณ์ที่อาจจะส่งผลกระทบต่อระบบที่อาจเกิดขึ้นได้นั้น ระบบจะมีวิธีการป้องกันอย่างมีประสิทธิภาพได้อย่างไร
- (2.) หากเกิดเหตุการณ์เหล่านี้ขึ้น ระบบจะยังคงควบคุมให้อยู่ในข้อจำกัดต่างๆ ได้มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับก่อนเกิดเหตุการณ์

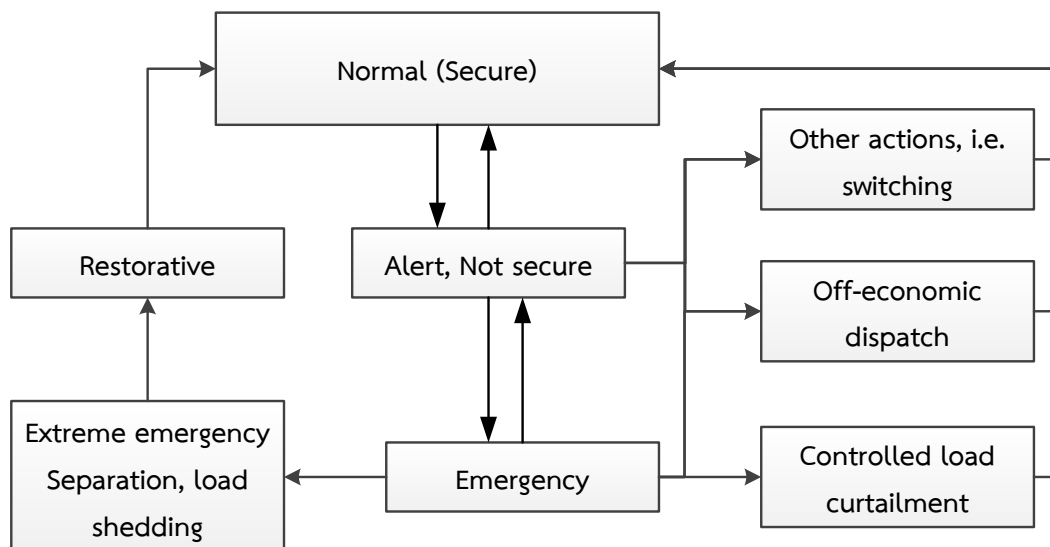
ในขณะที่อย่าง (1.) สามารถจัดการได้โดยการดำเนินการวิเคราะห์ความมั่นคงของคำตอบจากปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด และ (2) เป็นการพัฒนาเครื่องมือใหม่ๆ เพื่อการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ทั้งสองอย่างเป็นการกำหนดการนำไปสู่รูปแบบปัญหาใหม่คือ ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่พิจารณาความปลอดภัยเป็นเงื่อนไขจำกัด (Security-constrained Optimal power flow problem: SCOPF) [11-14] ตัวอย่างสมการ OPF และ SCOPFแสดงตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดง OPF และ SCOPF

OPF			SCOPF	
Min	$f = (x, u)$	←ฟังก์ชันวัตถุประสงค์→	Min	$f = (x, u)$
Subject to:	$g(x, u) = 0$	←เงื่อนไขสมการ→	Subject to:	$g(x, u) = 0$
	$h_{\min} \leq h(x, u) \leq h_{\max}$	←เงื่อนไขอสมการ →		$h_{\min} \leq h(x, u) \leq h_{\max}$
		←เงื่อนไขความมั่นคง→		$h'_{\min} \leq h'(x, u) \leq h'_{\max}$

ถ้าปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดที่พิจารณาความปลอดภัยเป็นเงื่อนไขจำกัดหรือปัญหา SCOPF นั้นเป็นการหาค่าต่ำสุด ผลตอบที่ได้จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับผลตอบของปัญหา OPF แบบธรรมดา และถ้าปัญหา SCOPF เป็นการหาค่าสูงสุด ผลตอบที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับผลตอบของปัญหา OPF แบบธรรมดา เนื่องจากมีเงื่อนไขความมั่นคงเพิ่มขึ้นมาจากเงื่อนไขบังคับปกติ เงื่อนไขความมั่นคงในที่นี้จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ เพื่อป้องกันการเกิดเหตุการณ์ผิดปกติคือการควบคุมจากสถานะการเตือนมาเป็นสถานะปกติ ตัวแปรควบคุมจะต้องสามารถทำงานได้ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดเมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติ ดังนั้นเงื่อนไขความมั่นคงประเภทนี้จะใช้

เป็นการปรับตั้งค่าเงื่อนไขต่างๆ ก่อนเกิดเหตุการณ์ผิดปกติ และประเภทที่ 2 คือเพื่อแก้ไขเมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติคือการควบคุมจากสถานะฉุกเฉินไปยังสถานะการเตือน หรือสถานะปกติ เงื่อนไขความมั่นคงประเภทนี้โดยมากจะถูกนำไปใช้ประเมินระบบหลังเกิดเหตุการณ์ผิดปกติว่าระบบนั้นยังสามารถทำงานต่อไปได้หรือไม่ ยังคงความน่าเชื่อถือหรือไม่ หรือยังคงมีเสถียรภาพอยู่หรือไม่ เป็นต้น ภาพที่ 2.1 แสดงแผนภาพสถานะของความปลอดภัยจากเงื่อนไขทั้งสองแบบ



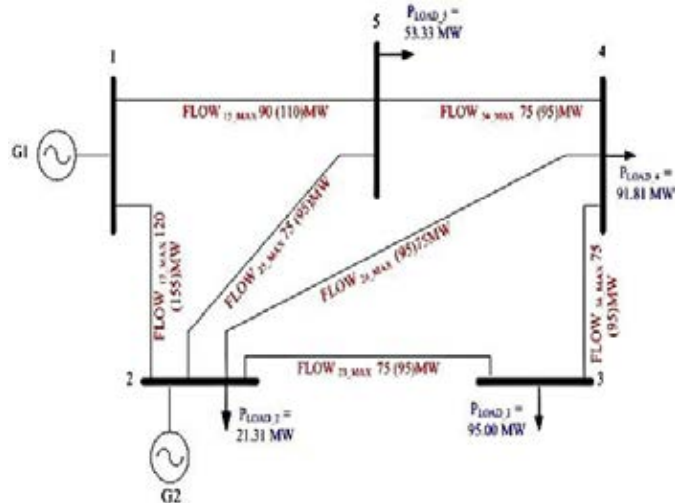
ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงสถานะความปลอดภัย

เงื่อนไขความมั่นคงที่เพิ่มขึ้นมาจาก OPF ธรรมดา นั้น ไม่ว่าจะเป็นแบบป้องกันการเกิดเหตุการณ์ผิดปกติ หรือแบบแก้ไขการเกิดเหตุการณ์ผิดปกติ นั้นสามารถนำไปใช้ตรวจสอบระบบได้หลายอย่างเช่น ต้องการตรวจสอบความมั่นคงของระบบ ต้องการตรวจสอบความเสถียรภาพของระบบได้แก่ การนำดัชนีความเสถียรภาพมาทำการตรวจสอบ หรือต้องการตรวจสอบความเชื่อถือได้ของระบบได้แก่

1. เงื่อนไข N-1 คือ เมื่อมีอุปกรณ์หลุดออกจากระบบ 1 อย่างเช่น สายส่ง หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบจะต้องสามารถทำงานต่อไปได้โดยที่ไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับใดๆ
2. เงื่อนไขกระแสลัดวงจร คือ เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นในระบบ ระบบจะต้องสามารถทำงานได้โดยไม่ละเมิดเงื่อนไขบังคับใดๆ

รูปแบบปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดที่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงเป็นเงื่อนไขจำกัดแสดงดังตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างที่ 1 จากระบบไฟฟ้าใน [15] แก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดเพื่อต้องการหาค่าการผลิตทั้งหมดที่ต่ำที่สุด โดยจะเปรียบเทียบกับผลปัญหาเมื่อมีสายส่งหลุดออกจากระบบดังนี้



ภาพที่ 2.2 ระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2

กำหนดให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ระบบปกติคือ $F^{obj} = \min_{P_{Gi}^0, P_{Gi}^k} C^0$ โดยที่ C^0 คือราคาการผลิตทั้งหมดประกอบไปด้วย ราคาการทำงานของแต่ละเครื่องกำเนิด และราคาการติดตั้งเริ่มต้นของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เงื่อนไขบังคับของระบบมีดังนี้

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{Gi,t}^0 - \sum_{j=1}^{NLoad} P_{Dj,t} - P_{Loss,t}^0 = 0$$

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i}^0 \leq P_{G,i}^{\max}$$

$$|S_{ij}^0| \leq S_{ij}^{\max}$$

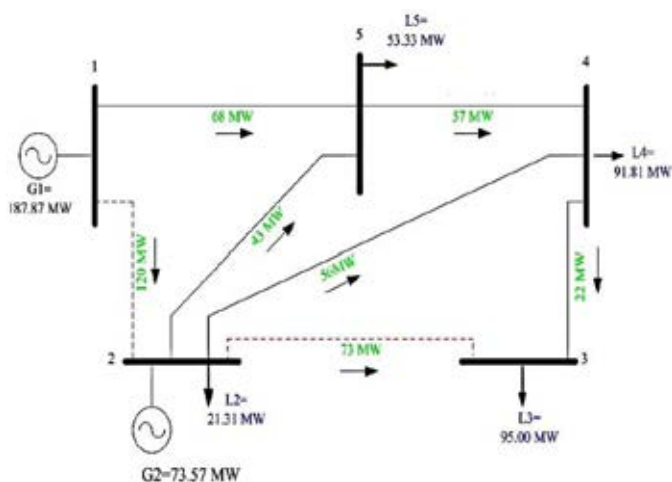
และเมื่อมีสายหลุดออกจากระบบ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ $F^{obj} = \min_{P_{Gi}^0, P_{Gi}^k} C^0 + \sum_{k=1}^K C^k$ โดยที่ C^k คือราคาการผลิตเมื่อเกิดเหตุการณ์สายหลุดออกจากระบบ และเงื่อนไขบังคับของระบบคือ

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{Gi,t}^k - \sum_{j=1}^{NLoad} P_{Dj,t} - P_{Loss,t}^k = 0$$

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i}^k \leq P_{G,i}^{\max}$$

$$|S_{ij}^k| \leq S_{ij}^{\max}$$

ผลจากการทดสอบ แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเส้นที่ 1-2 และ 2-3 จะทำงานที่ค่าพิกัดของระบบ ซึ่งหากระบบมีการปลดสายส่งเส้นดังกล่าวออก อาจจะมีส่งผลเสียให้กับระบบดังตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.3 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง

ตารางที่ 2.2 ผลตอบ SCOPF

จากบัสที่	ไปบัสที่	กำลังที่ไหลในสายส่ง		
			เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น	
			สายเส้น 1-2 หลุด	สายเส้น 2-3 หลุด
1	2	85	0	79
1	5	61	111	78
2	3	74	66	0
2	4	59	41	92
2	5	46	22	70
3	4	-21	-29	-95
4	5	-54	-80	-95
$P_{G,1}[MW]$		146.44	111.00	157.18
$P_{G,2}[MW]$		115.00	150.00	104.26

จากผลตอบจะเห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 จะมีกำลังการผลิตตกลงจาก 188 MW เป็น 146 MW โดยที่เมื่อสายส่งเส้นที่ 1-2 หลุดจะทำให้สายส่งเส้นที่ 1-5 จะมีกำลังไหลในสายเกิน 1 MW ดังนั้นหากเกิดเหตุการณ์ในกรณีนี้ จำเป็นที่จะต้องลดโหลดลงเพื่อที่จะเพิ่มความปลอดภัยให้กับระบบ ส่วนเมื่อสายส่งเส้นที่ 2-3 หลุด ระบบจะยังคงทำงานต่อไปได้ โดยไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับต่างๆ

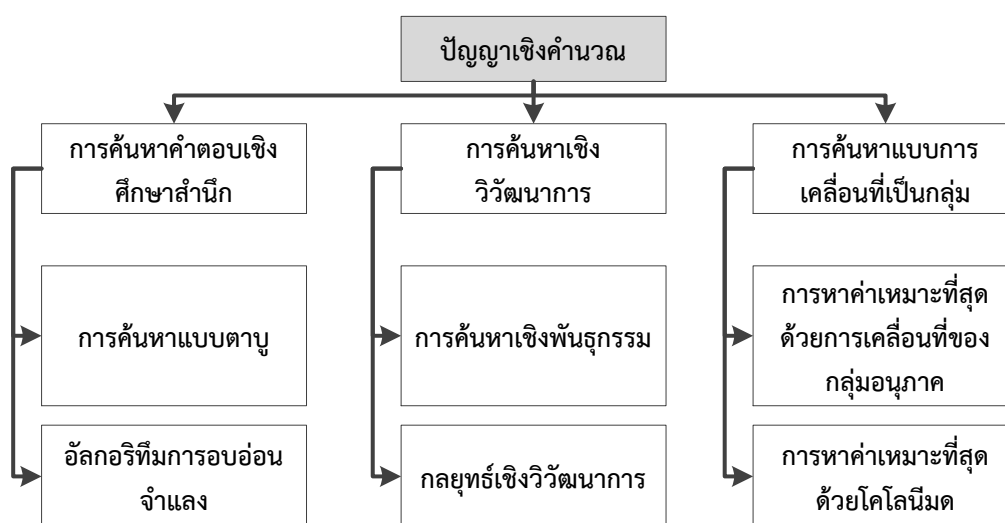
ปัญหา SCOPF มีรูปแบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับปัญหา OPF และบางครั้งอาจทำให้คำตอบเป็นแบบวงกว้างเฉพาะถิ่น (Local Optimal) ขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่ และเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีทั้งตัวแปรแบบต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง (Continuous and Discrete variables) การแก้ปัญหาคำนึงถึงทั้งกรณีฐาน และกรณีหลังจากที่ระบบเกิดเหตุการณ์ที่ผิดปกติ เช่น สายส่งหลุดออกจากระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ เป็นต้น นอกจากนี้ ปัญหา SCOPF ยังเป็นการรวมกันของหลักการที่สวนทางกัน ยกตัวอย่างเช่น ต้องการลดราคาต้นทุนให้น้อยที่สุด แต่ยังคงต้องการการทำงานที่ดีที่สุด และมีความมั่นคงสูงสุด เป็นต้น ดังนั้นหากพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงเพิ่มขึ้นมาแล้ว จะทำให้ผลตอบที่ได้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับปัญหา OPF ธรรมดา ในหัวข้อถัดไปจะยกตัวอย่างเงื่อนไขความมั่นคงต่างๆ จากนั้นจะกล่าวถึงวิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดในอดีต และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ตามลำดับ

2.2 วิธีการแก้ปัญหา

การแก้ปัญหา OPF หรือ SCOPF ประกอบด้วยหลายอัลกอริทึม ในอดีตได้นำเสนอวิธีการ gradient method, Newton method, Linear programming และ Mixed-integer linear programming แต่ยังคงพบข้อเสียที่จะนำมาแก้ปัญหาอยู่มากเช่น ยากต่อการกำหนดให้อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขสมการ ค่อนข้างมีปัญหาเรื่องการลู่เข้าหาค่าตอบที่ดีที่สุด หรือขอบลู่เข้าคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ถูกกำหนดให้เป็นแบบเชิงเส้นเท่านั้น ทำให้มีความแม่นยำต่ำ เป็นต้น [2,6] ปัจจุบันมีการพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อแก้ปัญหา OPF หรือ SCOPF มากขึ้น และอัลกอริทึมใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมใช้ในการแก้ปัญหา OPF คือ ปัญญาเชิงคำนวณ หรือ Computational Intelligent Technique [6,7,16] ซึ่งมีข้อดีกว่าอัลกอริทึมในอดีตได้แก่

1. สามารถประยุกต์ใช้แก้ปัญหากับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความซับซ้อนสูงได้อย่างหลากหลายเช่น ต้องการหาราคาผลิตต่ำสุด ต้องการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียให้น้อยที่สุด หรือต้องการสร้างกำไรให้กับผู้ผลิตมากที่สุด เป็นต้น โดยที่ระบบยังคงสามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขที่บังคับได้ทุกประการ
2. คำตอบที่หาได้มีโอกาสเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง หรือ Global Optimum
3. มีความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบ
4. มีความเหมาะสมในการแก้ปัญหาที่มีหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ปัญญาเชิงคำนวณ (Computational Intelligent Techniques) เป็นศาสตร์การคำนวณอีก รูปแบบหนึ่งที่น่าเอาปัญญามาผสมผสานกับกระบวนการธรรมชาติกลายเป็นเทคนิคการคำนวณที่มีความชาญฉลาดมากขึ้น แม้จะไม่ใช่ว่าคำตอบถูกต้องเชิงตัวเลขแบบตรงๆ แต่ผลตอบที่ได้ก็ถือเป็นคำตอบที่น่าสนใจ และมีประโยชน์ จึงเหมาะที่จะนำไปเป็นเครื่องมือในการคำนวณที่มีประสิทธิภาพสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง หรือยากต่อการวิเคราะห์แบบเจาะลึกในเชิงคณิตศาสตร์ ปัญญาเชิงคำนวณในนี้จะแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบดังนี้



ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างอัลกอริทึมของปัญญาเชิงคำนวณ

ต่อไปจะกล่าวถึงแนวคิด ที่มาของแต่ละอัลกอริทึม รวมไปถึงจุดเด่นและจุดด้อยของ อัลกอริทึมนั้นๆ โดยจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักๆ คือ การค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึก การค้นหาเชิงวิวัฒนาการ และการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่แบบกลุ่ม ดังต่อไปนี้

2.2.1 การค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึก (Heuristic search)

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการค้นหาคำตอบถือเป็นเทคนิคทางปัญญาเชิงคำนวณ ซึ่งสามารถหาคำตอบของปัญหาหลายๆ อย่างได้ด้วยการค้นหา แทนที่จะเป็นการแก้ปัญหาโดยตรง วิธีในการค้นหาคำตอบนั้นมีอยู่หลายวิธี โดยแต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพกับระบบที่แตกต่างกันออกไป วิธีการค้นหาคำตอบแบ่งเป็น 2 กลุ่มได้แก่ การค้นหาแบบไม่ใช้ข้อมูลความรู้ (Uninformed search) และการค้นหาแบบใช้ข้อมูลความรู้ (Informed search)

การค้นหาแบบไม่ใช้ข้อมูลความรู้นั้น เป็นการค้นหาที่ไม่มีการใช้ข้อมูลใดๆ มาช่วยในการค้นหาคำตอบ บางครั้งจะเรียกว่าการค้นหาคำตอบแบบบอด (Blind search) ในขณะที่การค้นหาแบบใช้ข้อมูลความรู้จะมีลักษณะตรงกันข้าม กล่าวคือ มีการนำเอาข้อมูลมาช่วยในการค้นหาเส้นทางที่ได้

คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งหลักการในการค้นหาแบบนี้จะเรียกว่าการค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึก (Heuristic search) [7,16] ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าการค้นหาแบบไม่ใช้ความรู้นั้นมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการค้นหาแบบใช้ความรู้ อย่างไรก็ตามการค้นหาแบบไม่ใช้ความรู้ก็ยังมีประโยชน์ในบางครั้ง โดยเฉพาะสำหรับหลายๆ ระบบที่ไม่มีข้อมูลใดๆ ให้ได้ใช้พิจารณาในขณะที่ทำการค้นหาคำตอบ การค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึกในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเพียง 2 วิธีเท่านั้นได้แก่

1) วิธีการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search , TS) [7,17,18] เป็นวิธีการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงผสมผสานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบัน TS เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีที่มีความสามารถในการหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local optimum) และยังสามารถค้นหาคำตอบต่อไปจนกระทั่งให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global optimum) ได้ ปัจจุบัน TS ได้มีการพัฒนาให้มีความสามารถในการค้นหาคำตอบได้ดียิ่งขึ้นเช่น การค้นหาตาบู่ขนิดขนาน (Parallel Tabu search) การค้นหาแบบตาบู่ชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Tabu search) เป็นต้น

2) อัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing , SA) [7,9,19] ถูกจำลองจากการควบคุมการเย็นตัวของวัตถุในอ่างความร้อน ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า แอนนิลลิ่ง เมื่อวัตถุถูกให้ความร้อนจนกระทั่งถึงจุดหลอมเหลวก็จะปล่อยให้วัตถุเย็นตัวลงเรื่อยๆ เย็นตัวลง และจะทำให้วัตถุมีความแข็ง ซึ่งโดยปกติถ้ายิ่งให้วัตถุเย็นตัวลงช้ามากเท่าไร ก็จะทำให้วัตถุมีความแข็งแรงมากขึ้นเท่านั้น โดยการเย็นตัวลงนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการทำให้วัตถุเย็นลง (Rate of cooling) จากจุดเริ่มต้นนี้ Kirkpatrick จึงได้นำมาใช้แก้ปัญหาการตัดสินใจเมื่อต้องการคำตอบเกี่ยวกับค่าต่ำสุดหรือค่าสูงสุด คำตอบที่หาได้ ณ ช่วงเวลาต่างๆ โดยวิธี SA นี้ จะค่อยๆ ลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดเหมือนในกระบวนการทำให้วัตถุเย็นตัวลง อัลกอริทึมนี้ถูกสร้างสำหรับประยุกต์ใช้กับปัญหาทั่วไป แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณนั้นมีความค่อนข้างมาก ถึงแม้ว่าจะมีการดัดแปลงตัวอัลกอริทึมแล้วก็ยังคงมีความยุ่งยากต่อการนำไปใช้งาน และเป็นอัลกอริทึมเก่า ปัจจุบันไม่ค่อยได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานมากนัก

2.2.2 การค้นหาเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary computation)

การค้นหาเชิงวิวัฒนาการเป็นการคำนวณที่คัดลอกมาจากการวิวัฒนาการของธรรมชาติ โดยปกติแล้วธรรมชาติจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา สิ่งมีชีวิตที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาได้นั้นจะต้องสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปได้ จึงจะสามารถเป็นผู้ที่อยู่รอดในธรรมชาติได้ กระบวนการที่มี “วิวัฒนาการ” คือ การปรับตัวที่มุ่งหมายให้เกิดความสามารถในการอยู่รอด ไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนการถูกคัดเลือกโดยธรรมชาติ (Selection) การรอดชีวิตด้วยความเหมาะสมที่สุด (Fittest) การกำเนิดใหม่ (Reproduction)

การกลายพันธุ์หรือมิวเทชัน (Mutation) การแข่งขัน (Competition) และสภาวะการอยู่ร่วมกัน (Symbiosis) วิทยาพันธุศาสตร์นี้จะกล่าวถึง 2 อัลกอริทึมที่เป็นการค้นหาเชิงวิวัฒนาการ ดังนี้

1) การค้นหาเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) [7,19,21] เป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบสุ่ม (Stochastic optimization) อย่างหนึ่งที่เลียนแบบหลักการถ่ายทอดพันธุกรรมทางธรรมชาติเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global optimum) โดยอาศัยการสมมติผลตอบรับมาหลายๆจุดก่อน แล้วประยุกต์ใช้หลักการค้นหาผลตอบที่เหมาะสมที่สุดซึ่งมีโอกาสที่จะอยู่รอดมากที่สุด เพื่อให้ได้ผลตอบที่ดียิ่งขึ้นในแต่ละรุ่นของการถ่ายทอด (Generation) สำหรับในแต่ละรุ่นของการถ่ายทอดจะมีการประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness) ของแต่ละผลตอบ แล้วพิจารณาเลือกผลตอบใหม่จากค่าความเหมาะสมนี้โดยอาศัยวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ วิธีการคัดเลือกดังกล่าวประกอบด้วย การคัดเลือก การข้ามสายพันธุ์ และการผ่าเหล่า แต่ละผลตอบจะประกอบไปด้วยตัวแปรที่ถูกเข้ารหัสไว้เรียกว่า โครโมโซม (Chromosomes) ซึ่งสามารถถอดรหัสเป็นค่าของตัวแปรจริงได้ โดยทั่วไปนิยมลงรหัสตัวแปรให้เป็นระบบเลขฐานสอง การค้นหาเชิงพันธุกรรมนี้มีจุดเด่นและจุดด้อยดังนี้

- มีเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือในการหาค่าตอบที่ดีที่สุด ถึงแม้ว่าระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงไป
- สามารถหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global Optimum)
- มีความยืดหยุ่นในการออกแบบชนิดของโครโมโซม ยีนของโครโมโซมสามารถถูกออกแบบให้เป็นตัวเลขชนิดใดก็ได้ตามความเหมาะสมกับระบบ
- เหมาะสำหรับระบบที่มีเงื่อนไขจำกัดต่างๆ ในหลายๆ ระบบจะมีการระบุเงื่อนไขของตัวแปรต่างๆ เพื่อจำกัดให้ระบบมีเสถียรภาพและเป็นไปตามเงื่อนไขทางกายภาพ เงื่อนไขดังกล่าวถือเป็นการจำกัดพื้นที่ค้นหา GA มีโครงสร้างที่สามารถออกแบบให้มีการจำกัดขอบเขตของโครโมโซมได้อย่างสะดวก
- เหมาะสำหรับระบบที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบพหุคูณ และสามารถใช้กับระบบที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่งได้
- ใช้แก้ปัญหาของระบบได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องรู้ หรือคำนวณหาผลเฉลยรูปแบบปิด (closed form solution) ของระบบ โดยปกติแล้วการคำนวณหาผลเฉลยดังกล่าวจะมีความยุ่งยาก และต้องใช้เวลามาก การนำเอา GA มาประยุกต์ใช้จะช่วยลดความยุ่งยากในส่วนนี้
- อาจเกิดการลู่เข้าก่อนวัย (premature convergence) เนื่องจากขาดความหลากหลายของประชากรในระบบ หรือมีจำนวนประชากรน้อยเกินไปสำหรับปัญหานั้นๆ

2) กลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary strategies, ES) [7,14] เป็นเทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ที่มีกระบวนการคล้ายกับ GA แต่ความแตกต่างนั้นอยู่ที่รูปแบบการแทนค่าตอบของระบบ

ใน ES จะใช้เป็นค่าจริง (ฟิโนไทป์) พร้อมกับปฏิบัติการทางพันธุกรรมเช่น มิวเทชัน ที่ซึ่งใช้การสุ่มเปลี่ยนค่าตอบด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ก่อให้เกิดการวิวัฒนาการของคำตอบที่ดีขึ้นได้ คำตอบที่ดีกว่าถูกคัดเลือกจากการประเมินค่าความเหมาะสม ข้อแตกต่างของ ES กับ GA คือ GA ใช้ทั้งกระบวนการครอสโอเวอร์และมิวเทชัน แต่ ES ใช้เพียงแค่กระบวนการมิวเทชัน นอกจากนี้แล้ว ES ไม่จำเป็นต้องเข้ารหัสโครโมโซม จึงถือได้ว่า ES เป็นวิธีการเชิงตัวเลข และ ES ยังไม่สามารถใช้งานได้ครอบคลุมและหลากหลายเทียบเท่า GA

2.2.3 การค้นหาแบบการเคลื่อนที่เป็นกลุ่ม (Swarm intelligent)

ระบบการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่เป็นกลุ่มโดยปกติแล้วจะประกอบไปด้วยกลุ่มประชากรของตัวแทนที่ไม่ซับซ้อน แต่ละตัวแทนสามารถสื่อสารกับตัวแทนอื่นๆ ภายในพื้นที่และสามารถสื่อสารกับสถานะแวดล้อมได้ การทำงานร่วมกันเป็นกลุ่มทำให้เกิดพฤติกรรมของระบบที่ใหญ่และซับซ้อนขึ้น เมื่อพิจารณาแต่ละตัวแทนเดี่ยวๆ ภายในกลุ่ม พฤติกรรมโดยรวมของการทำงานเป็นกลุ่มของสิ่งมีชีวิตจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ดังนั้นการทำงานจะทำระหว่างพฤติกรรมส่วนตัวของแต่ละตัวแทนภายในกลุ่ม กับพฤติกรรมโดยรวมของกลุ่ม พฤติกรรมส่วนตัวของแต่ละตัวแทนเมื่อรวมกันแล้วจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมโดยรวมของกลุ่ม ในขณะที่พฤติกรรมโดยรวมของกลุ่ม ก็เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขที่ตัวแทนแต่ละตัวจะต้องกระทำ การกระทำดังกล่าวแต่ละสถานะแวดล้อมจะส่งผลให้พฤติกรรมของตัวแทนนั้นเปลี่ยนไปด้วย พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของกลุ่มไม่ได้กำหนดด้วยตัวแทนใดตัวแทนหนึ่ง แต่การสื่อสารโต้ตอบระหว่างตัวแทนจะเป็นตัวกำหนดกฎเกณฑ์พฤติกรรมโดยรวมของกลุ่ม การสื่อสารโต้ตอบระหว่างตัวแทนนั้นช่วยทำให้เกิดการค้นกรองและแลกเปลี่ยนประสบการณ์ความรู้เกี่ยวกับสภาพแวดล้อม และช่วยเพิ่มสมรรถนะการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด การค้นหาแบบการเคลื่อนที่เป็นกลุ่มในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 2 อัลกอริทึมที่ได้รับความนิยมเท่านั้น ดังนี้

- 1) การค้นหาด้วยคอลอนีเมด (Ant Colony Optimization, ACO) [7] เริ่มต้นมาจากการสังเกตพฤติกรรมของมดในการค้นหาอาหาร โดยมดจะมีการติดต่อสื่อสารกันด้วยการส่งผ่านข้อมูลด้วยฟีโรโมน (Pheromone) มดจะทำสัญลักษณ์ตามเส้นทางที่เดินผ่านด้วยฟีโรโมนนี้ ซึ่งฟีโรโมนจะมีจำนวนมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะทางและคุณภาพของแหล่งอาหารที่พบ แล้วมดตัวอื่นก็จะตามรอยฟีโรโมนมายังแหล่งอาหารในที่สุด เปรียบเสมือนผลตอบแทนที่ดีที่สุดสามารถส่งสัญญาณไปยังผลตอบแทนอื่นๆ ให้ลู่เข้ามาหาผลตอบแทนที่ดีที่สุดนั่นเอง แต่ยังเป็นอัลกอริทึมที่ใหม่ จึงคงมีการพัฒนาต่อไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบที่ดีขึ้น

- 2) การค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) [7,10,12,22] มีหลักการค้นหาคัล้ายกับการค้นหาเชิงวิวัฒนาการ หลักการจะเริ่มจากการสุ่ม

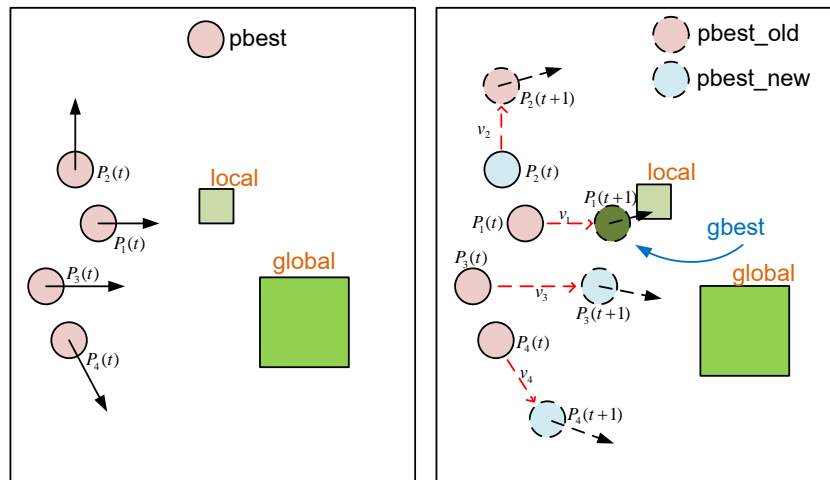
ประชากรเริ่มต้น และทำการปรับประชากรนั้นๆ ในทุกรอบการคำนวณ เพื่อค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด แต่ PSO จะไม่มีปฏิบัติการทางสายพันธุ์เหมือน GA คำตอบของระบบใน PSO แทนด้วยอนุภาคที่ทำการเคลื่อนที่ไปในปริภูมิค้นหา (search space) โดยมีทิศทางการค้นหาที่ใกล้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด PSO เริ่มได้รับความนิยมในการนำไปแก้ปัญหามากขึ้น เนื่องจากการคำนวณมีประสิทธิภาพ เวลาการคำนวณค่อนข้างเร็วเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาหลายรูปแบบ พร้อมทั้งการปรับแต่งอัลกอริทึมด้วยจำนวนพารามิเตอร์เพียงไม่กี่ตัวก็สามารถหาค่าเหมาะสมที่สุดได้

จากจุดเด่น และจุดด้อยของแต่ละอัลกอริทึมในการนำไปแก้ปัญหา การค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) ถือเป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหา เนื่องจากตัวอัลกอริทึมไม่มีความซับซ้อน สามารถนำไปประยุกต์กับปัญหาที่มีสภาพเหตุการณ์ได้หลากหลาย มีความทนทานต่อการหาคำตอบ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ รวมทั้งมีประสิทธิภาพสูงในการค้นหาคำตอบที่เป็นแบบวงกว้าง ในส่วนถัดไปจะนำเสนอแนวคิดพื้นฐาน องค์ประกอบพื้นฐาน และวิธีการประยุกต์ใช้ของการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

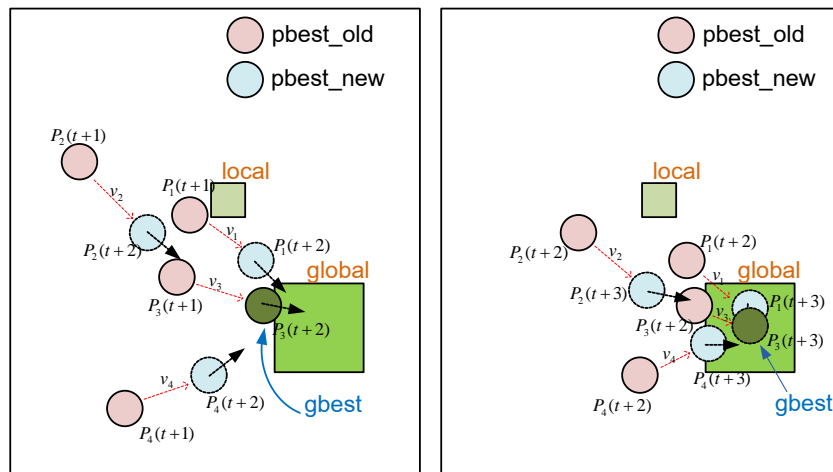
2.3 การค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO)

การค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค หรือ PSO [7,16] มีหลายอย่างที่เหมือนกับการค้นหาเชิงวิวัฒนาการ ซึ่งเป็นอัลกอริทึมเชิงประชากรเช่นเดียวกัน อนุภาคย่อยๆ (individual particle) ในกลุ่มประชากรทำงานร่วมมือกันในการแก้ปัญหา โดยอนุภาคย่อยๆ จะเปรียบเหมือนกับโครโมโซมในการค้นหาเชิงพันธุกรรม แต่สิ่งที่น่าสนใจใน PSO คือความเรียบง่ายของตัวอัลกอริทึม ทำให้เมื่อนำไปประยุกต์กับงานจริง การค้นหาสามารถหาผลตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการทำงานพื้นฐานของ PSO โดยทั่วไปแสดงดังภาพที่ 2.7

การเคลื่อนที่เป็นกลุ่มประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค โดยแต่ละอนุภาคเป็นตัวแทนของผลตอบของระบบที่ต้องการค้นหา อนุภาคเหล่านี้จะทำการเคลื่อนที่ไปในปริภูมิค้นหา โดยตำแหน่งจะเปลี่ยนไปตามข้อมูลของสภาพแวดล้อมที่เคลื่อนที่ผ่านมา และข้อมูลจากอนุภาคภายในกลุ่มด้วยตัวเอง กำหนดให้ $\vec{p}_i(t)$ แทนเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค (position vector) ณ เวลา t และ $\vec{v}_i(t)$ แทนเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาค (velocity vector)



ภาพที่ 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคก่อนพบคำตอบ



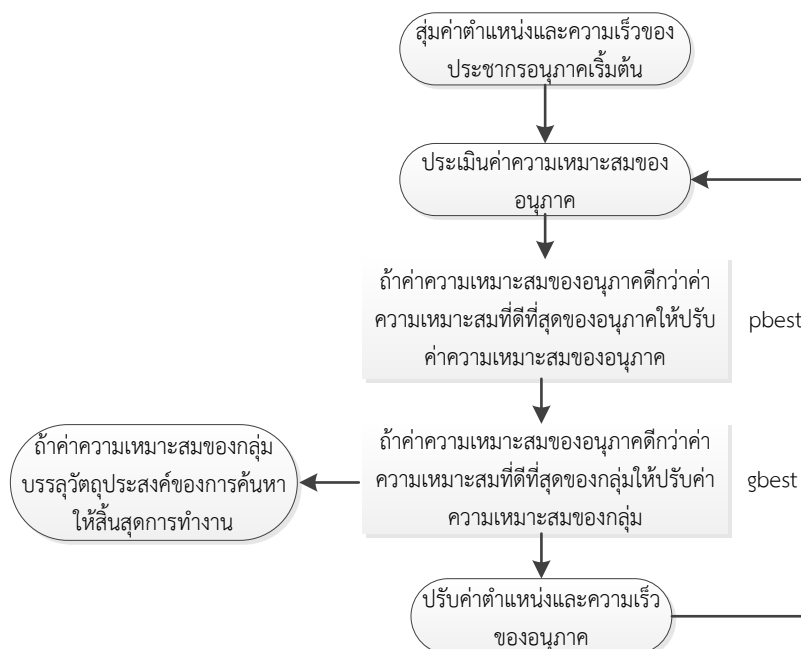
ภาพที่ 2.6 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อพบคำตอบ

ภาพที่ 2.5 และภาพที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการค้นหาคำตอบของการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค จะเห็นได้ว่าตอนเริ่มแรกแต่ละอนุภาคจะทิศทางการค้นหาที่แตกต่างกัน เมื่อเคลื่อนที่ไปและมีอนุภาคตัวใดตัวหนึ่งพบเจอคำตอบจะส่งสัญญาณให้อนุภาคตัวอื่นๆ เพื่อที่จะไปหาคำตอบเดียวกัน แต่หากมีตัวที่พบเจอคำตอบหลายตัว จะทำการวิเคราะห์หาคำตอบไหนดีที่สุดเพื่อตั้งให้อนุภาคนั้นๆ ลู่เข้าหาคำตอบ โดยแต่ละอนุภาคมีทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะสมของตัวเอง (*pbest*) และของกลุ่ม (*gbest*) ในแต่ละตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไป [7,16,23,24] แต่ละอนุภาคจะทำการประเมินค่าความเหมาะสมเพื่อดูว่าทิศทางที่เคลื่อนที่ไปนั้นมีโอกาสพบเจอคำตอบมากน้อยเพียงใด หากตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปไม่มีโอกาสพบคำตอบ จะทำการเคลื่อนที่มายังตำแหน่งเดิม และดูทิศทางการเคลื่อนที่ของกลุ่มว่าทิศทางใดที่มีโอกาสพบเจอคำตอบ ก็จะเบนการเคลื่อนที่ไปในทิศทางนั้นๆ โดยคำตอบสุดท้ายก็คือ *gbest* นั่นเอง

2.3.1 องค์ประกอบพื้นฐาน

องค์ประกอบที่ต้องพิจารณาคือ พารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการค้นหาคำตอบของกลุ่มอนุภาคซึ่งได้แก่ ค่าคงที่ความเร่ง (c_p และ c_g) [7] และจำนวนอนุภาคในการเคลื่อนที่ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- **ค่าคงที่ความเร่ง (acceleration constant)** กำหนดการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคในกลุ่ม, c_p จะมีอิทธิพลของ $pbest$ ต่ออนุภาคนั้นๆ ในขณะที่ c_g มีอิทธิพลของ $gbest$ ต่อพฤติกรรมของอนุภาค
 - ถ้า $c_g > c_p$ ส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนรอบๆ ที่คำตอบที่ดีที่สุด (global)
 - ถ้า $c_p > c_g$ แต่ละอนุภาคจะเคลื่อนที่รอบๆ คำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่น (local) ของอนุภาคนั้นๆ กล่าวคืออนุภาคจะเคลื่อนที่เป็นอิสระต่อกัน
- **จำนวนของอนุภาคภายในกลุ่ม** เป็นปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการค้นหาคำตอบของระบบโดยตรง ในลักษณะเดียวกันกับจำนวนโครโมโซมของ GA จำนวนอนุภาคที่มากจะทำให้ระบบครอบคลุมปริภูมิค้นหาที่กว้างกว่า ช่วยเพิ่มโอกาสในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (global solution) อย่างไรก็ตามจำนวนอนุภาคที่มากจะต้องใช้เวลาการคำนวณที่มากตามไปด้วย



ภาพที่ 2.7 การทำงานทั่วไปของ PSO

2.3.2 วิธีการประยุกต์

วิธีการประยุกต์ใช้การค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคประกอบด้วย 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการสุ่มค่าเวกเตอร์ตำแหน่ง และความเร็วของแต่ละอนุภาคในกลุ่มประชากร เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคมีมิติเท่ากับ N ซึ่งเป็นขนาดของตัวแปรในปัญหาที่ต้องการค้นหา ดังนั้นสามารถมองตำแหน่งของอนุภาคในรูปของเวกเตอร์ $\vec{p}_i(t)$ ขนาด N ได้ และค่าสุ่มความเร็วของแต่ละอนุภาคจะมีค่าเท่ากับ N ด้วย โดยเรียกว่าเวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) กำหนดให้ \vec{v}_i แทนเวกเตอร์ความเร็วดังกล่าว ซึ่งแต่ละองค์ประกอบของเวกเตอร์ความเร็วจะเป็นค่าความเร็วของแต่ละตัวแปรในอนุภาคนั้นเอง ดังนั้นตำแหน่งของอนุภาค P_i จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยการบวกเวกเตอร์ตำแหน่งเข้ากับเวกเตอร์ความเร็วดังนี้

$$\vec{p}_i(t) = \vec{p}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad 2.4$$

2. ทำการประเมินค่าความเหมาะสม F ของแต่ละอนุภาค ซึ่งการประเมินค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหาค่าความเหมาะสมที่ได้จากการประเมินจะถูกพิจารณาในสองขั้นตอนดังนี้

- ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาค P_i มีค่าดีกว่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (global best fitness) หรือ $gbest$ กล่าวคือถ้า $F(\vec{p}_i(t)) < gbest$ (กรณีหาค่าน้อยที่สุด) ให้ทำการบันทึกค่าความเหมาะสมของระบบและค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคนั้นๆ ไว้ดังต่อไปนี้

$$\blacksquare gbest = F(\vec{p}_i(t))$$

$$\blacksquare \vec{p}_{gbest} = \vec{p}_i(t)$$

- ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาค P_i มีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาคนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า $pbest_i$ (p มาจาก personal) กล่าวคือ $F(\vec{p}_i(t)) < pbest_i$ ให้ทำการบันทึกค่าความเหมาะสม และเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคไว้ใน $pbest_i$ ดังนี้

$$\blacksquare pbest_i = F(\vec{p}_i(t))$$

$$\blacksquare \vec{p}_{pbest_i} = \vec{p}_i(t)$$

3. ทำการปรับค่าความเร็วของอนุภาค P_i ดังนี้

$$\vec{v}_i(t) = \omega \vec{v}_i(t-1) + \rho_p [\vec{p}_{pbest_i} - \vec{p}_i(t)] + \rho_g [\vec{p}_{gbest} - \vec{p}_i(t)] \quad 2.5$$

โดยที่ ω เป็นค่าน้ำหนักความเฉื่อยสำหรับใช้ลดความเร็วของอนุภาค Van den Bergh [7,25] ได้นำเสนอความสัมพันธ์ของค่าน้ำหนักความเฉื่อยไว้เพื่อรับประกันการลู่เข้าของคำตอบของกลุ่มอนุภาค โดยความสัมพันธ์ต้องเป็นไปตามสมการที่ 2.6

$$\omega > \frac{1}{2}(c_p + c_g) - 1 \quad 2.6$$

ส่วน ρ_p และ ρ_g เป็นตัวแปรสุ่ม เทอมที่สองของสมการข้างต้นเรียกว่า องค์ประกอบเชิงปริชาณ (cognitive component) และเทอมสุดท้ายเรียกว่าองค์ประกอบทางสังคม (social component)

4. ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค P_i ตามสมการที่ 2.4 ในขั้นตอนที่ 1
5. ทำการปรับค่าตัวแปรเวลา $t = t + 1$ และดำเนินการขั้นตอนทั้งหมดกับอนุภาคถัดไปในกลุ่มประชากร จนครบทุกอนุภาค
6. วนรอบการทำงานทั้งหมดจนกระทั่งมีการลู่เข้าสู่คำตอบของอนุภาคที่ดีที่สุดในกลุ่ม หรือตามเงื่อนไขหยุดที่กำหนดไว้

โดยปกติแล้วจะทำการกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหาไว้ หรือการค้นหาสามารถสิ้นสุดลงได้เมื่อค่า $gbest$ บรรลู่วัตถุประสงค์ของการค้นหา แต่ละองค์ประกอบของเวกเตอร์อนุภาคที่ได้คือ ตัวแปรของปัญหาที่ต้องค้นหานั้นเอง องค์ประกอบเชิงปริชาณแทนประสบการณ์ค้นหาคำตอบของแต่ละอนุภาค ในขณะที่องค์ประกอบเชิงสังคมแทนประสบการณ์ค้นหาของกลุ่มอนุภาค ถ้าเราไม่พิจารณาองค์ประกอบเชิงสังคมในการปรับค่าเวกเตอร์ความเร็ว PSO นี้จะเรียกว่าเป็นแบบเฉพาะที่ (local best) ค่าของ ρ_p เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เป็นค่าสุ่มและกำหนดขนาดโดยผู้ใช้ พารามิเตอร์ดังกล่าวใช้จำกัดขนาดเส้นทางเดินของอนุภาคออกจากตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ค่า ρ_p ที่มาก จะทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการกวัดแกว่ง ในทำนองเดียวกัน ρ_g ก็เป็นพารามิเตอร์ที่จำกัดเส้นทางเดินของกลุ่มอนุภาค ทั้งค่า ρ_p และ ρ_g กำหนดได้เป็น $\rho_p = r_p c_p$ และ $\rho_g = r_g c_g$ โดยที่ $r_p, r_g \in U(0,1)$ และ c_p, c_g เป็นค่าคงที่ความเร่งที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยจะมีค่าเป็นบวกทั้งสองค่า โดยส่วนมากความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองจะเป็นไปตามสมการที่ 2.7

$$c_p + c_g \leq 4 \quad 2.7$$

2.4 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

เนื่องจากในปัจจุบันปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย งานวิจัยในอดีตได้มีการนำเสนอวิธีแก้ปัญหาไว้หลายรูปแบบ ดังนั้นหัวข้อนี้จะนำเสนอ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงกรณีศึกษาในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้างานนี้

[4] ได้ศึกษาวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรด้วยวิธีการแบ่งแยกบัส โดยใช้การค้นหาแบบตาบอดชนิดปรับตัวได้ ในการหาค่าตำแหน่ง และจำนวนบัสที่แบ่งแยก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การค้นหาแบบตาบอดชนิดปรับตัวได้ สามารถหาค่าตำแหน่ง และจำนวนบัสที่แบ่งแยกได้อย่างเหมาะสม และสามารถจำกัดกระแสลัดวงจรให้ไม่เกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ แต่ยังมีข้อเสียที่เวลาในการคำนวณคือ ใช้เวลาการคำนวณมากเกินไป และจำนวนชุดคำตอบของปัญหา (feasible set) ยังแคบอยู่

[12] ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง (SCOPF) ด้วยวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาราคาเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุด และเงื่อนไขความมั่นคงคือระบบยังคงทำงานได้หากมีสายหลุด 1 เส้น (N-1) วิธีการแก้ปัญหามานำมาทดสอบกับระบบ IEEE 30 บัส ผลการทดสอบพบว่า PSO สามารถหาราคาเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดได้ โดยที่ไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับ

[16] ได้ศึกษาวิธีเงินเนติกอัลกอริทึมในการแก้ปัญหา OPF เพื่อระบุค่าที่เหมาะสมของกำลังไฟฟ้าขาออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และมุมของ phase-shifter ของหม้อแปลงที่จะติดตั้งกับระบบ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ หาค่าดัชนีความรุนแรงต่ำที่สุด (severity-index) และเงื่อนไขความมั่นคงคือ ระบบทำงานได้ปกติเมื่อสายส่งหลุดออกจากระบบ 1 เส้น ตำแหน่งที่จะใช้ในการติดตั้ง phase-shifter มาจากการวิเคราะห์ sensitivity ของสายส่ง ผลการทดสอบ สามารถกำหนดค่าที่เหมาะสมของกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และมุมของ phase-shifter ที่ติดตั้งได้ แต่ยังใช้เวลาการคำนวณค่อนข้างนาน

[26] ทำการศึกษาการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง Fault Current Limiter (FCL) ในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบ และรักษาระดับแรง โดยที่มีค่ากระแสลัดวงจรลดลงด้วย กระบวนการได้ถูกทดสอบโดยระบบทดสอบ IEEE 39 บัส ซึ่งผลการทดสอบพบว่า PSO สามารถหาค่าตำแหน่ง และจำนวนที่เหมาะสมของ FCL ได้คือ ติดตั้ง FCL 2 ตัวที่สาย 6 และ 7 โดยจะมีผลให้ค่ากระแสลัดวงจรลดลงด้วย

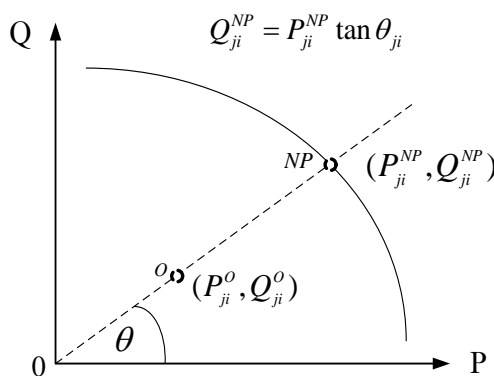
บทที่ 3

การประเมินความมั่นคงของระบบ

เงื่อนไขความมั่นคงที่ใช้พิจารณาสำหรับปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด ประกอบด้วยหลายเงื่อนไขเช่น เงื่อนไขความมั่นคงเมื่อมีสายส่งหลุดออก 1 วงจร หรือเงื่อนไขความมีเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ เป็นต้น เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงเงื่อนไขความมั่นคงที่ได้นำมาพิจารณา ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ความมั่นคงเสถียรภาพเชิงแรงดัน

การประเมินความมั่นคงเสถียรภาพเชิงแรงดันประกอบด้วยหลายดัชนี ในที่นี้จะนำเสนอดัชนี PQVSI ซึ่งถูกพัฒนาโดยกลุ่มนักวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเพื่อใช้ชี้วัดระบบทดสอบ ณ เงื่อนไขจุดทำงานหนึ่งๆ ว่ามีเสถียรภาพเชิงแรงดันที่จุดทำงานนั้นๆ มากน้อยเพียงใด [27] ซึ่งพัฒนามาจากแนวคิดที่ว่าระบบไฟฟ้าที่มีความแข็งแกร่งทางด้านเสถียรภาพเชิงแรงดันต้องมีจุดทำงานที่สภาวะไหลตหนึ่งๆ ห่างจากจุดพังทลายของแรงดัน (Nose point) ที่สภาวะไหลตนั้นๆ



ภาพที่ 3.1 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า ณ สภาวะพังทลายของแรงดัน

การคำนวณค่าดัชนีนี้จะถือว่าการเพิ่มของโหลดเป็นการเพิ่มแบบตัวประกอบกำลังคงที่ตามแนวเส้นประที่แสดงในภาพที่ 3.1 และเนื่องจากกำหนดให้สายส่งที่พิจารณามีบัสที่รับกำลังไฟฟ้าจริง นั่นคือ $P_{ji} < 0$ ซึ่งตามทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าดังกล่าว จะทำให้ค่า $\sec \theta_{ji} < 0$ เสมอ ดังนั้นสามารถคำนวณ P_{ji}^{NP} ได้ดังสมการที่ 3.1

$$P_{ji}^{NP} = \frac{|V_s|^2}{2[\text{Im}\{AB^*\} \tan \theta_{ji} - \text{Re}\{AB^*\} + |A||B| \sec \theta_{ji}]} \quad 3.1$$

จากแนวคิดที่ว่าระบบไฟฟ้ากำลังที่แข็งแกร่งต้องมีจุดทำงานในสถานะปัจจุบันห่างจากจุดที่เกิดการพังทลายของแรงดันมาก ดังนั้นดัชนี PQVSI นิยามจากอัตราส่วนระหว่างขนาดของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่จุดทำงานปัจจุบันกับขนาดของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่จุดพังทลายทางแรงดัน ณ จุดทำงานนั้นๆ นั่นคือ

$$PQVSI = \sqrt{\frac{P_{ji}^{o2} + Q_{ji}^{o2}}{P_{ji}^{NP2} + Q_{ji}^{NP2}}} \quad 3.2$$

$$PQVSI = \frac{P_{ji}^o}{P_{ji}^{NP}} \sqrt{\frac{(1 + \tan^2 \theta_{ji})}{(1 + \tan^2 \theta_{ji})}} \quad 3.3$$

จัดรูปสมการที่ 3.3 ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังนี้

$$PQVSI = \frac{P_{ji}^o}{P_{ji}^{NP}} \quad 3.4$$

โดยที่ P_{ji}^o คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากบัสด้านรับกำลัง
 P_{ji}^{NP} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากบัสด้านรับกำลัง ณ จุดพังทลายเชิงแรงดัน

จากสมการที่ 3.4 จะเห็นว่าหากสายส่งใดมีค่าดัชนี PQVSI เข้าใกล้ 1 หมายความว่าสายส่งเส้นนั้นอาจเป็นสาเหตุหลักทำให้เกิดปัญหาการพังทลายเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้าได้

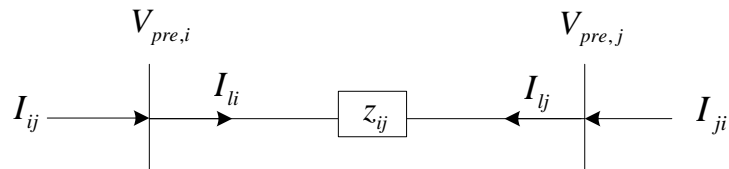
การประเมินเสถียรภาพแรงดันโดยใช้ PQVSI ต้องทำการคำนวณค่า PQVSI ของทุกสายส่งและห้อมีค่าจากนั้นให้กำหนดค่า PQVSI ที่มีค่ามากที่สุดเป็นค่า PQVSI ของระบบ

3.2 ความมั่นคงเมื่อมีสายส่งหลุด 1 วงจร

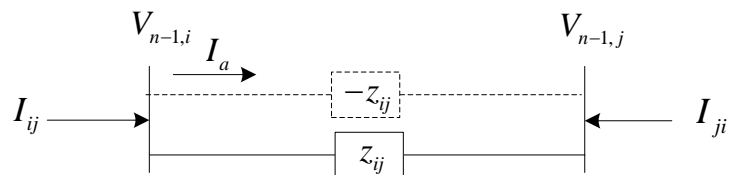
เหตุการณ์สายส่งหลุดเป็นเหตุการณ์ผิดปร้องประเภทอนุกรมในระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิดเหตุการณ์นี้ขึ้น จะส่งผลต่อจุดทำงานของระบบไฟฟ้าในเรื่องของแรงดันที่บัส และกำลังที่ไหลในสายส่ง การจำลองเหตุการณ์สายส่งหลุดจึงสามารถนำมาเป็นดัชนีชี้ให้เห็นว่า ระบบไฟฟ้านั้นมีความมั่นคงมากน้อยเพียงใด เหตุการณ์สายส่งหลุดอาจเกิดขึ้น 1 วงจร (N-1 contingency) หรือมากกว่า 1 วงจรพร้อมกันได้ [4,5] แต่ความน่าจะเป็นในการเกิดก็จะน้อยลงตามเหตุการณ์ที่จำนวนวงจรสายส่งที่หลุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการประเมินผลกระทบจากเหตุการณ์สายส่งหลุดเพียง 1 วงจรเท่านั้น

การประเมินผลกระทบสามารถทำได้โดยประเมินค่าแรงดันที่บัสต่างๆ และกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร เมื่อมีเหตุการณ์สายส่งหลุดเกิดขึ้น โดยการคำนวณจะอาศัยหลักการชดเชย

กระแส ดังเช่นว่าสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j เกิดหลุดออกจากระบบซึ่งเปรียบเสมือนกับมีการเพิ่มสายส่งที่ค่าอิมพีแดนซ์ติดลบขนาดเท่ากับสายส่งที่หลุดออกจากระบบเข้าไประหว่างบัสคู่หนึ่งๆ ดังภาพที่ 3.2



(ก) สายส่งก่อนเกิดเหตุการณ์สายส่งหลุด



(ข) สายส่งเมื่อเกิดเหตุการณ์สายส่งหลุด

ภาพที่ 3.2 เหตุการณ์สายส่งหลุด

จากภาพที่ 3.2 ข. ใช้หลักการคำนวณแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยสมการบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์จะสามารถคำนวณหากระแสที่เปลี่ยนแปลงที่บัส i และบัส j เนื่องจากการปลดสายส่งในระบบซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.5

$$I_a = \frac{V_{pre,i} - V_{pre,j}}{(Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij}) - z_{ij}} \quad 3.5$$

โดยที่ I_a คือ กระแสที่รบกวนระบบจากเหตุการณ์สายส่งหลุด 1 วงจร
 Z_{ii}, Z_{jj}, Z_{ij} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ในบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ตำแหน่งที่ ii, jj และ ij ตามลำดับ
 z_{ij} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งระหว่างบัส i และ j ที่หลุดออกจากระบบ

ดังนั้นค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงไปในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ 3.6

$$\Delta I_{n-1} = [0 \quad \cdots \quad -I_a \quad \cdots \quad I_a \quad \cdots \quad 0]^T \quad 3.6$$

จากสมการ 3.6 สามารถคำนวณค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้ากำลังได้โดยใช้ค่า บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ดังสมการที่ 3.7

$$\Delta V_{n-1} = Z_{bus} \Delta I_{n-1} \quad 3.7$$

ดังนั้นค่าแรงดันที่บัสภายในระบบเมื่อเกิดเหตุการณ์สายส่งหลุด 1 วงจร คือ

$$V_{n-1} = V_{pre} + \Delta V_{n-1} \quad 3.8$$

โดยที่ V_{n-1} คือ เมตริกซ์แรงดันที่บัสเมื่อเกิดเหตุการณ์สายส่งหลุด 1 วงจร
 V_{pre} คือ เมตริกซ์แรงดันที่บัสก่อนเกิดเหตุการณ์สายส่งหลุด 1 วงจร
 ΔV_{n-1} คือ เมตริกซ์ผลต่างของแรงดันที่บัสจากเหตุการณ์สายส่งหลุด 1 วงจร

จากนั้นสามารถคำนวณค่ากระแสที่ไหลในสายส่งเส้นใดๆ จากเหตุการณ์สายส่งหลุดได้ดัง สมการ 3.9

$$I_{n-1,pq} = -I_{n-1,pq} = y_{pq} (V_{n-1,p} - V_{n-1,q}) \quad 3.9$$

เมื่อ p และ q เป็นคู่บัสใดๆ ของวงจรสายส่งที่ไม่ได้หลุดออกจากระบบไฟฟ้า ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งใดๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.10 และ 3.11

$$S_{n-1,pq} = V_{n-1,p} I_{n-1,pq}^* \quad 3.10$$

$$S_{n-1,qp} = V_{n-1,q} I_{n-1,qp}^* \quad 3.11$$

โดยที่ $S_{n-1,pq}, S_{n-1,qp}$ คือ กำลังในสายส่งที่ไหลจากบัส p ไปบัส q และ ไหลจากบัส q ไปบัส p จากเหตุการณ์สายส่งหลุด 1 วงจร
 $V_{n-1,p}, V_{n-1,q}$ คือ แรงดันที่บัส p และ q จากเหตุการณ์สายส่งหลุด 1 วงจร
 $I_{n-1,pq}, I_{n-1,qp}$ คือ กระแสในสายส่งที่ไหลจากบัส p ไปบัส q และ ไหลจากบัส q ไปบัส p จากเหตุการณ์สายส่งหลุด 1 วงจร

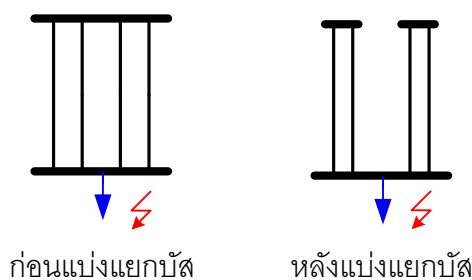
จากนั้นตรวจสอบผลของแรงดัน และค่ากำลังที่ไหลในสายส่งเมื่อเกิดเหตุการณ์สายส่งหลุดว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ ทำการคำนวณเหตุการณ์สายส่งหลุดจนครบทุกเหตุการณ์ที่สามารถเกิดได้ ถ้ามีเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ถือว่าระบบยังไม่ผ่านการประเมินความมั่นคงนี้

3.3 การจำกัดกระแสลัดวงจร

วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรที่ใช้หลักการเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ได้แก่ วิธีการแบบพาสซีฟ ซึ่งคุณสมบัติคือ ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเปลี่ยนแปลงไปทั้งในสภาวะที่ระบบทำงานปกติ และสภาวะที่ระบบเกิดลัดวงจร โดยค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจะเพิ่มขึ้นเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นให้มีค่าลดลง ซึ่งจะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงานของระบบ ทำให้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบในสภาวะปกติ [3-5] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาการทำงานของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรอบคอบก่อนนำมาใช้งาน ซึ่งวิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบพาสซีฟที่พิจารณา และมีการนำมาใช้ในปัจจุบันมีดังนี้

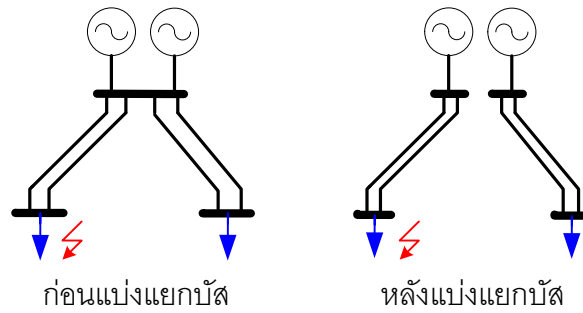
3.3.1 การแบ่งแยกบัส (Bus Splitting)

การปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าโดยวิธีการแบ่งแยกบัสในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเป็นหนึ่งในวิธีการลดกระแสลัดวงจร โดยเทคนิคการลดกระแสลัดวงจรที่สำคัญคือ การเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบ ซึ่งการแบ่งแยกบัสสามารถเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบได้ โดยลดการเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าลง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์บริเวณจุดที่เกิดการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น ภายหลังจากการแบ่งแยกบัส [4,5,28] แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 3.3

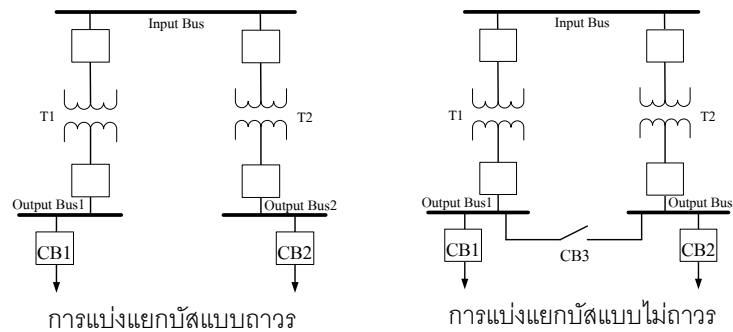


ภาพที่ 3.3 การเชื่อมต่อแบบขนานที่ลดลงของสายส่ง ภายหลังจากแบ่งแยกบัส

นอกจากนี้การแบ่งแยกบัส ยังทำให้บัสที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสลัดวงจรมีความสามารถในการจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง เนื่องจากจำนวนของแหล่งจ่ายที่ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดการลัดวงจรลดลง แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 จำนวนของแหล่งจ่ายที่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร ณ จุดที่เกิดลัดวงจร ทั้งก่อนและหลังแบ่งแยกบัส



ภาพที่ 3.5 การแบ่งแยกบัสแบบถาวร และไม่ถาวร

บัสที่จะทำการแบ่งแยกบัสต้องมีสายส่งเชื่อมต่ออยู่อย่างน้อย 2 เส้น และการแบ่งแยกบัสจะกระทำที่บัสภายในสถานีไฟฟ้า โดยทั่วไปการแยกบัสจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การแบ่งแยกบัสแบบถาวร และไม่ถาวร ดังแสดงในภาพที่ 3.5 โดยการแบ่งแยกบัสแบบไม่ถาวรจะมี Tie circuit breaker ไว้ทำการเชื่อมต่อบัสในกรณีฉุกเฉิน ซึ่งข้อดีและข้อเสียของวิธีการลดกระแสลัดวงจรโดยวิธีแบ่งแยกบัสมีดังนี้

ข้อดี

- 1) ลดความรุนแรงของกระแสลัดวงจร โดยแบ่งแยกแหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร
- 2) ไม่ต้องนำอุปกรณ์จำกัดกระแสมาเชื่อมต่อส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบ
- 3) เป็นวิธีแก้ปัญหามีความเชื่อถือได้สูง
- 4) เป็นวิธีที่สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในปัจจุบัน โดยใช้เวลาดำเนินการไม่มาก
- 5) ค่าใช้จ่ายต่ำมากเมื่อเทียบกับการแก้ปัญหาด้วยการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร

ต่างๆ

ข้อเสีย

- 1) ต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่แบ่งแยก (Bus transfer equipment)

- 2) เมื่อ巴士ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายหลักให้โหลดจุดหนึ่งในระบบถูกแบ่งแยก จะทำให้ความเชื่อถือได้ ณ จุดโหนดนั้นลดลง จึงต้องทำการศึกษผลกระทบในส่วนของโหลดอย่างรอบคอบ
- 3) ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง ในกรณีที่ต้องทำการเปลี่ยนชุด巴士ใหม่ หากชุด巴士เดิมไม่สามารถทำการแบ่งแยกได้

3.3.2 การเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง (Line By-pass)

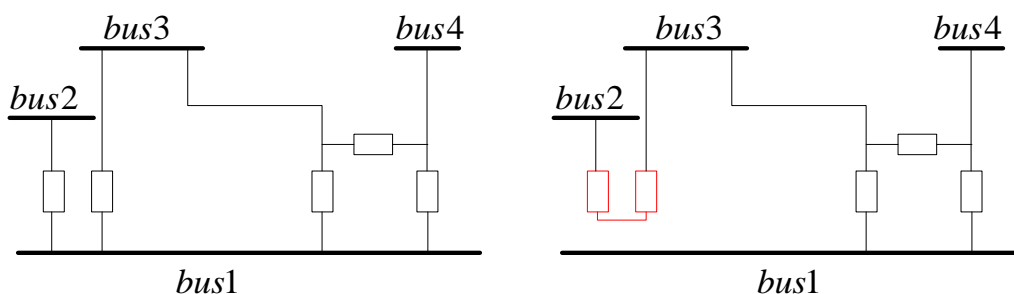
วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งในระบบส่งกำลังไฟฟ้า [3,28] เป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะสั้น และในสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยมีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนทิศทางไหลของกระแสลัดวงจรไม่ให้ไหลสู่บริเวณที่มีปริมาณกระแสลัดวงจรมากดังภาพที่ 3.6 ซึ่งส่งผลทำให้บริเวณที่ทำการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง มีปริมาณกระแสลัดวงจรลดลง

ข้อดี

- 1) ไม่มีความจำเป็นในการใช้เงินลงทุน
- 2) ดำเนินการแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย
- 3) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีความเชื่อถือได้สูง
- 4) ผลกระทบต่อระบบที่ตามมาไม่น้อยกว่าวิธีการเปิดวงจร (Line splitting)

ข้อเสีย

- 1) วงจรสายส่งที่ทำการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งต้องทำการศึกษผลกระทบต่อการทำงานของระบบอย่างรอบคอบ
- 2) ความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลง
- 3) บางระบบสามารถเลือกตำแหน่งในการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งได้จำกัด

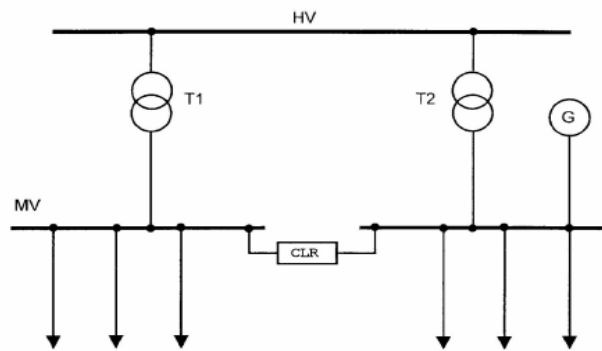


ภาพที่ 3.6 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง

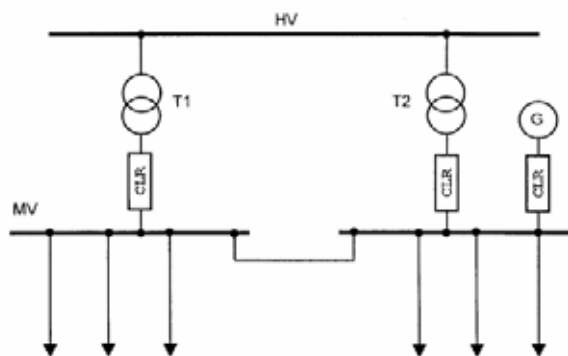
3.3.3 การประยุกต์ใช้รีแอกเตอร์จำกัดกระแส

รีแอกเตอร์จำกัดกระแส(Current Limiting Reactor, CLR) เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความต้านทานโดยรวมสูงขึ้น โดยจะทำการติดตั้งแบบอนุกรมเข้ากับระบบไฟฟ้า [3-4] การใช้งานของ CLR สามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบแล้วแต่จุดประสงค์ของผู้ใช้งาน เช่น ใช้เพื่อป้องกันกระแสลัดวงจรลงดิน หรือป้องกันกระแสลัดวงจรระหว่างเฟส

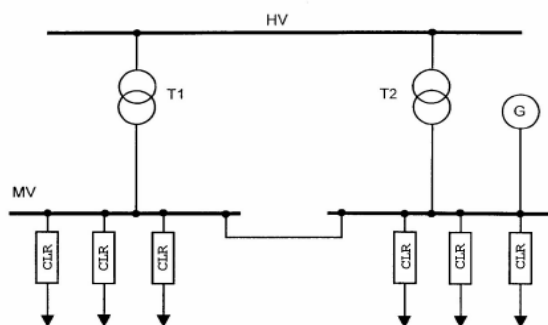
การใช้งานของ CLR จะต้องเลือกตำแหน่งในการติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมที่สุด และ CLR สามารถต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้หลายลักษณะ ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ถึงภาพที่ 3.9 การต่อ CLR กับบัสบาร์ในสถานีไฟฟ้าในลักษณะที่แตกต่างกันนี้ ซึ่งจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป



ภาพที่ 3.7 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งแบบที่ 1



ภาพที่ 3.8 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งแบบที่ 2



ภาพที่ 3.9 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งแบบที่ 3

ข้อดี

- 1) ทำการติดตั้งเข้าไปในระบบได้สะดวก
- 2) ราคาไม่สูงมาก
- 3) ช่วยจำกัดอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินไป เพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้า
- 4) มีความสามารถในการป้องกันกระแสลัดวงจรระดับสูงได้ดี

ข้อเสีย

- 1) มีปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อม กำลังสูญเสีย เนื่องจากอุปกรณ์มีค่าอิมพีแดนซ์สูงซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียเสถียรภาพทางแรงดัน
- 2) CLR บางประเภทก่อให้เกิด Magnetic flux ซึ่งส่งผลต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิต และสภาวะการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่อยู่ใกล้เคียง

วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟไม่ได้มีเพียงแค่วิธีที่กล่าวมาเท่านั้น ยังมีวิธีการปลดสายส่งออกเมื่อเกิดการลัดวงจร (Line Splitting) การใช้หม้อแปลง High Impedance Transformer และการต่ออิมพีแดนซ์ลงดินผ่านสายนิวทรัล เป็นต้น และนอกจากวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟก็ยังมีวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรแบบอื่นอีกด้วย

จากวิธีที่ได้กล่าวมานั้นล้วนเป็นวิธีที่เปลี่ยนแปลงโครงข่ายเพื่อเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ แต่ระบบเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงข่ายย่อมมีผลกระทบเกิดขึ้นตามมา อาทิเช่น ระบบอาจสูญเสียเสถียรภาพ ระบบอาจเกิดการแบ่งแยกตัว ดังนั้นเมื่อโครงข่ายของระบบเปลี่ยนไป การประเมินความมั่นคงของระบบจึงจำเป็นต้องนำมาพิจารณาเพื่อให้ระบบสามารถทำงานที่สภาวะปกติต่อไปได้ หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงดัชนีที่นำมาใช้ชี้วัดความมั่นคงของระบบ

บทที่ 4

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของรูปแบบปัญหาโดยทั่วไปของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะประกอบด้วยรูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด และเงื่อนไขบังคับต่างๆ จากนั้นจะกล่าวถึงการประยุกต์วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคกับปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

4.1 นิยามของตัวแปร

ก่อนที่จะกล่าวถึงรูปแบบปัญหา กระบวนการปรับค่าพารามิเตอร์ และกระบวนการแก้ปัญหา จะนิยามตัวแปรที่ใช้สื่อความหมายในการแก้ปัญหาดังต่อไปนี้

$iter_max$	คือ	จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด
obj_count	คือ	จำนวนครั้งการสุ่มเข้าหาคำตอบที่ดีที่สุด
$main_par$	คือ	จำนวนอนุภาคของปัญหาหลัก
sub_par	คือ	จำนวนอนุภาคของปัญหารอง
S_0	คือ	ชุดคำตอบเริ่มต้นของปัญหาหลัก
S_{new}	คือ	ชุดคำตอบใหม่ของปัญหาหลัก
S_{best}	คือ	ชุดคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาหลัก
$S_{neighbor}$	คือ	ชุดคำตอบรอบๆ g_{best} ของปัญหาหลัก
$radius$	คือ	รัศมีของการสร้างชุดคำตอบรอบๆ g_{best}
F_0	คือ	ชุดคำตอบเริ่มต้นของปัญหารอง
F_{new}	คือ	ชุดคำตอบใหม่ของปัญหารอง
F_{best}	คือ	ชุดคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหารอง
$pbest$	คือ	คำตอบที่ดีที่สุดเมื่อเทียบอนุภาคต่ออนุภาคในแต่ละรอบการคำนวณ
$gbest$	คือ	คำตอบที่ดีที่สุดของทั้งกลุ่มอนุภาคในแต่ละรอบการคำนวณ
$\vec{v}(t)$	คือ	เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคที่รอบการคำนวณ t
$\vec{p}(t)$	คือ	เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคที่รอบการคำนวณ t
C_p	คือ	ค่าคงที่ความเร่งของตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว
C_g	คือ	ค่าคงที่ความเร่งของตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล
ω	คือ	ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อย (inertia weight)

4.2 รูปแบบปัญหา

รูปแบบปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในบางปัญหาไม่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันต่อเนื่องได้ จึงถือเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขบังคับของวัตถุประสงค์นั้นๆ ดังต่อไปนี้

4.2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้านั้น โดยมากจะใช้ดัชนีตัวใดตัวหนึ่งมาเป็นวัตถุประสงค์ในการแก้ปัญหาเช่น ต้องการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียให้ได้มากที่สุด ดัชนีที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ก็คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ต่ำสุด หรือถ้าหากต้องการหาผลกำไรจากการผลิตให้มากที่สุด ดัชนีที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ก็คือ ผลกำไรจากการผลิต นั่นเอง ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังสมการที่ 4.1

$$\text{Maximize / Minimize index} \quad 4.1$$

4.2.2 เงื่อนไขบังคับ

เงื่อนไขบังคับของปัญหาในที่นี้จะแบ่งเงื่อนไขบังคับออกเป็น 3 เงื่อนไขคือ เงื่อนไขการทำงานของระบบ เงื่อนไขความมั่นคงของระบบ และเงื่อนไขเฉพาะของแต่ละปัญหา ซึ่งรายละเอียดของเงื่อนไขการทำงาน และเงื่อนไขความมั่นคงมีดังต่อไปนี้

4.2.2.1 เงื่อนไขจุดทำงานของระบบ

1) เงื่อนไขการแยกตัวของระบบ

$$\text{islanding} = 1 \quad 4.2$$

โดยถ้า *islanding* เป็น 1 แสดงว่าไม่มีการแยกตัวของระบบ และถ้าเป็น 0 แสดงว่ามีการแยกตัวของระบบเกิดขึ้น

2) ความสมดุลของกำลังไฟฟ้าที่บัส (Power balance) ต้องเป็นไปตามสมการ

$$P_i = P_{G_i} - P_{D_i} = \sum_{j=1}^{nbus} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad i = 2, \dots, nbus \quad 4.3$$

$$Q_i = Q_{G_i} - Q_{D_i} = - \sum_{j=1}^{nbus} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad i = 2, \dots, nbus \quad 4.4$$

3) ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i ต้องอยู่ระหว่างค่าพิกัดต่ำสุดและสูงสุด

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \quad 4.5$$

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max} \quad 4.6$$

4) ค่าแรงดันที่บัส i ต้องอยู่ระหว่างค่าพิกัดต่ำสุดและสูงสุด

$$V_i^{\min} \leq |V_i| \leq V_i^{\max} \quad 4.7$$

5) ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่งจากบัส i ไปบัส j ต้องไม่เกินค่าพิกัดสูงสุดที่สายส่งทนได้

$$|S_{ij}| \leq S_{ij}^{\max} \quad 4.8$$

4.2.2.2 เงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

1) เงื่อนไขความมั่นคงเมื่อมีสายส่งหลุดออก 1 วงจร

$$N_{-1} = 1 \quad 4.9$$

โดยถ้า N_{-1} เป็น 1 แสดงว่าผ่านเงื่อนไข และถ้าเป็น 0 แสดงว่าไม่มีผ่านเงื่อนไข

2) เงื่อนไขเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ

$$VSI_i < VSI_margin, i = 1, 2, \dots, nbranch \quad 4.10$$

3) ค่ากระแสลัดวงจรที่บัส i ต้องไม่เกินค่าพิกัดของเบรกเกอร์

$$|I_{sc_i}| \leq CB_i^{rate}, i = 1, 2, \dots, nbus \quad 4.11$$

4.2.2.3 เงื่อนไขเฉพาะ

เงื่อนไขเฉพาะจะขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหาที่พิจารณา ซึ่งบางปัญหาอาจจะไม่มีก็ได้ สำหรับปัญหาที่ต้องพิจารณา ควรจะนำไปพิจารณาเป็นเงื่อนไขแรกๆ ของการแก้ปัญหา เนื่องจากเป็นเงื่อนไขหลักที่ต้องผ่านการวิเคราะห์เท่านั้น ถึงจะนำไปพิจารณาคำตอบต่อไป

จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขบังคับต่างๆ จำเป็นต้องมีกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหา โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 มาเป็นวิธีการแก้ปัญหา ดังนั้นต่อไปจะกล่าวถึงขั้นตอนการแก้ปัญหาละเอียด รวมไปถึงวิธีปรับหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปใช้แก้ปัญหา

4.3 การประยุกต์วิธีค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

หลังจากทำการปรับหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วนั้นจะกล่าวถึงการประยุกต์วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเข้ากับปัญหา โดยวิธีค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคที่นำมาใช้แก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้แต่ละอนุภาคเป็นชุดคำตอบที่ต้องการค้นหา และแบ่งรูปแบบปัญหาออกเป็น 2 แบบคือ

แบบที่ 1 รูปแบบปัญหาที่แต่ละอนุภาคสามารถนำไปวิเคราะห์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้โดยตรง (1-stage PSO)

แบบที่ 2 รูปแบบปัญหาสามารถแบ่งเป็นปัญหาย่อยได้ โดยจะแบ่งออกเป็นปัญหาหลักและปัญหารอง (2-stage PSO) เนื่องจากแต่ละอนุภาคของปัญหาหลักอาจจะยังไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาหลักได้โดยตรง จึงต้องนำแต่ละอนุภาคของปัญหาหลักไปวิเคราะห์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหารองก่อน และนำผลการวิเคราะห์ของปัญหารองกลับมาวิเคราะห์ในปัญหาหลักต่อไป

ขั้นตอนการแก้ปัญหาทั้งสองแบบมีหลักการการทำงานที่คล้ายกัน แต่จะแตกต่างกันเพียงไม่กี่ขั้นตอน ซึ่งจะกล่าวในส่วนถัดไป

ขั้นตอนของการแก้ปัญหาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ขั้นตอนของการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค และขั้นตอนของการวิเคราะห์คุณภาพของคำตอบ ซึ่งภาพที่ 4.1 แสดงแผนภาพกระบวนการทั้งหมดของ PSO

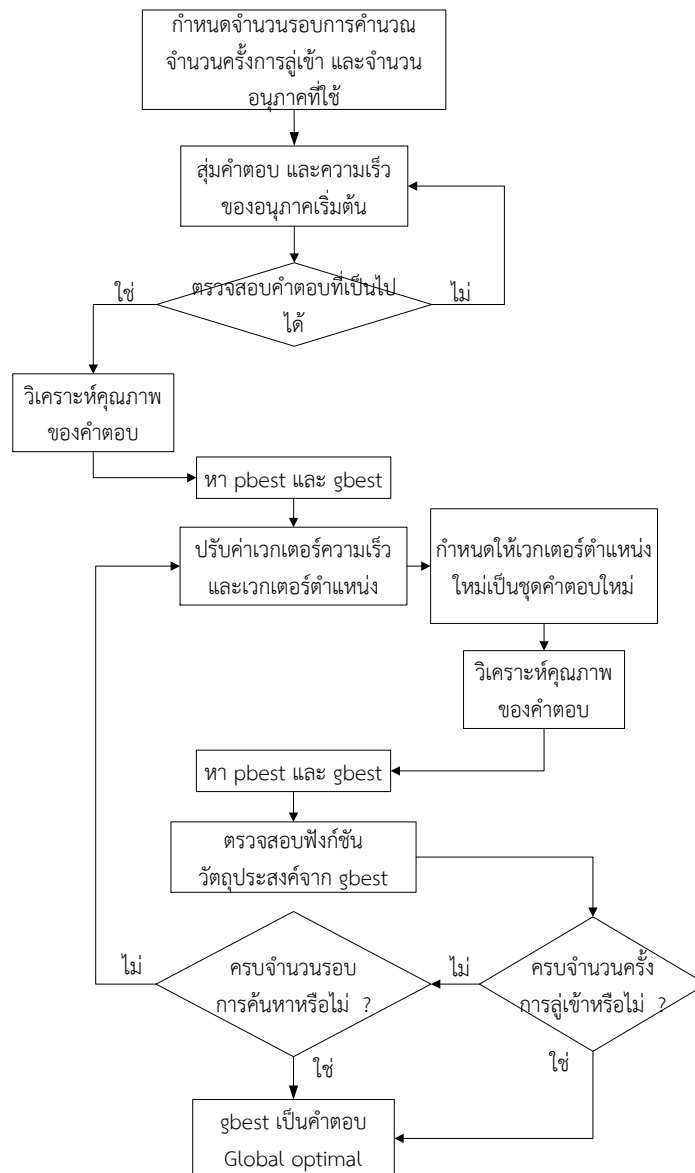
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด ($iter_max$) จำนวนครั้งของการสุ่มค่าคำตอบ (obj_count) และจำนวนอนุภาค ($main_par$) ที่ใช้ในการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 2 สุ่มชุดคำตอบเริ่มต้นจากชุดคำตอบที่เป็นไปได้ตามเงื่อนไขที่พิจารณา กำหนดให้อนุภาคแทนชุดคำตอบของปัญหา โดยทำการสุ่มชุดคำตอบเท่ากับจำนวนของอนุภาคที่กำหนดไว้ตามขั้นตอนที่ 1 จนครบตามจำนวนอนุภาคที่ใช้ในการคำนวณ กำหนดให้ทุกอนุภาคเป็นชุดคำตอบเริ่มต้น (S_0) และสุ่มเวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้นจากช่วงของความเร็วที่กำหนดโดยช่วงของเวกเตอร์ความเร็วกำหนดได้ดังสมการที่ 4.12 และ 4.13

$$v_{max} = k \times p_{max} \quad 4.12$$

$$v_{min} = k \times (-p_{max}) \quad 4.13$$

โดยที่ k คือ ค่าปัจจัยที่กำหนดช่วงความเร็วของอนุภาค มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1



ภาพที่ 4.1 แสดงกระบวนการแก้ปัญหาด้วยวิธี PSO

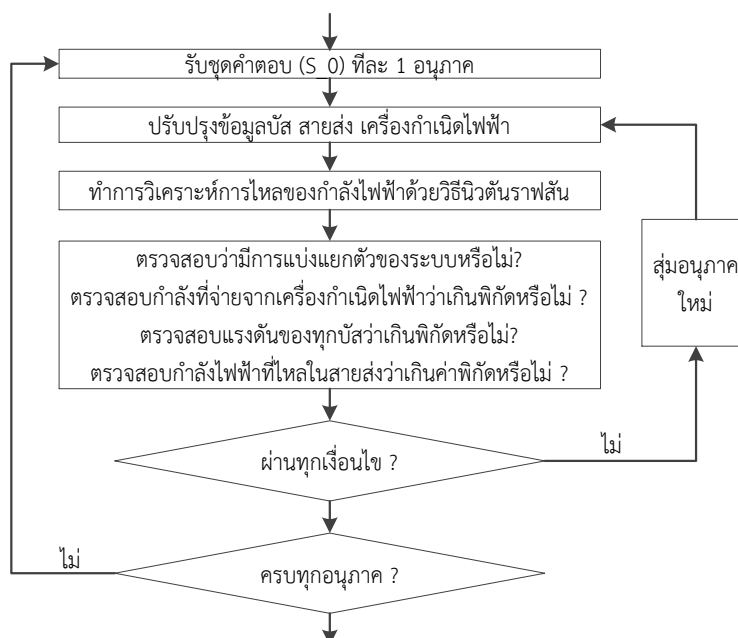
ตัวอย่างการกำหนดช่วงความเร็วของอนุภาค สมมติระบบต้องการหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ จำกัดกระแสที่บัส โดยบัสที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสได้คือบัสที่ 1, 12, 21, 23, 25 และ 57 ดังนั้นจะได้ว่า p_{\max} มีค่าเท่ากับ 57 ขอบเขตของเวกเตอร์ความเร็วแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าขอบเขตความเร็วของอนุภาค

k	v_{\min}	v_{\max}
0.01	-0.57	0.57
0.05	-2.85	2.85
0.1	-5.7	5.7
0.5	-28.5	28.5
1	-57	57

จากตารางจะเห็นได้ว่า เมื่อค่า k มีค่าน้อยๆ อนุภาคที่เคลื่อนที่ไปในแต่ละรอบจะช้า แต่ช่วยเพิ่มความละเอียดของการค้นหา ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก ซึ่งในบางปัญหาอาจจะทำให้ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้างได้ ในขณะที่ค่า k มีค่าเข้าใกล้ 1 จะทำให้ช่วงของการเคลื่อนที่ไปค่อนข้างกว้าง ซึ่งในบางปัญหาอาจจะไม่เหมาะสมเช่นกัน ดังนั้นควรพิจารณาค่า k ให้มีความเหมาะสมกับปัญหานั้นๆ ด้วย

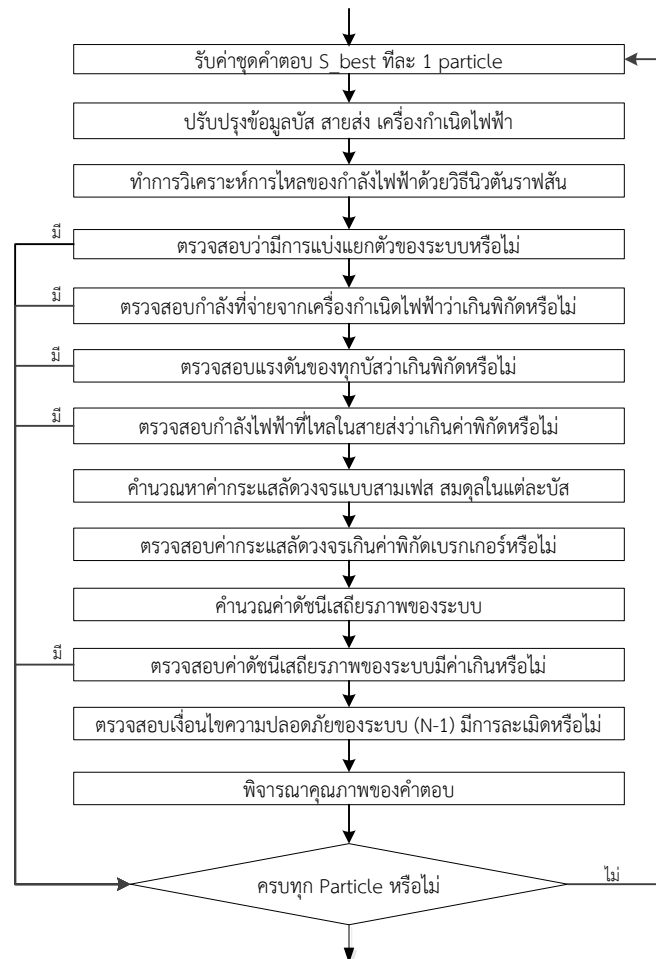
ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบชุดคำตอบเริ่มต้น (S_0) ว่าเป็นคำตอบที่เป็นไปได้หรือไม่ (feasible solution) ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 กระบวนการตรวจสอบคำตอบเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดให้ชุดคำตอบเริ่มต้น (S_0) เป็นชุดคำตอบที่ดีที่สุด (S_{best})

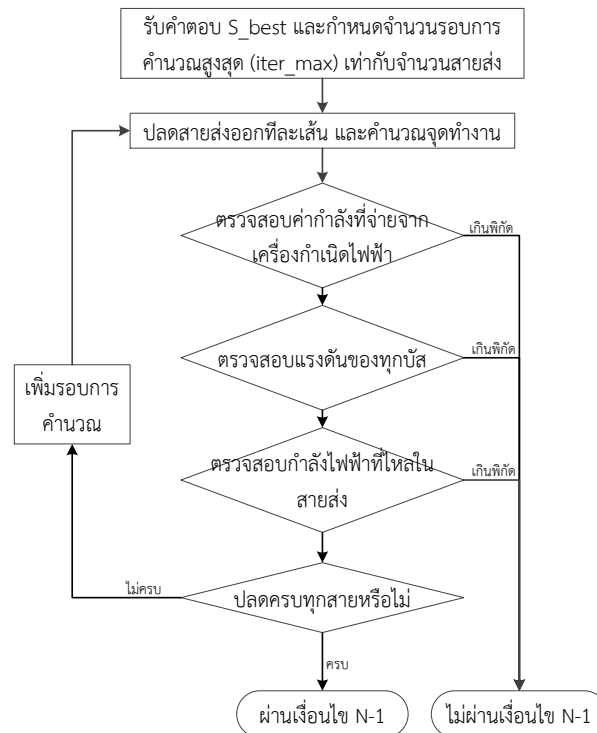
ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์คุณภาพคำตอบของแต่ละอนุภาคจนครบทุกอนุภาค โดยรายละเอียดที่พิจารณาเป็นไปตามภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์คุณภาพของชุดคำตอบ

จากภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ถ้าอนุภาคใดไม่ผ่านการวิเคราะห์เงื่อนไขการทำงานของระบบอนุภาคนั้นจะไม่ถูกนำมาพิจารณาต่อ แต่ถ้าอนุภาคใดผ่านการวิเคราะห์เงื่อนไขการทำงานของระบบจะนำมาพิจารณาเงื่อนไขกระแสลัดวงจรต่อ จากนั้นจะพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบต่อไป

การคำนวณค่าดัชนีเสถียรภาพของระบบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ดัชนีเสถียรภาพเชิงแรงดันแบบ PQ จะพิจารณาที่สายส่งทุกเส้น นำค่าที่คำนวณได้ไปตรวจสอบกับค่าขอบที่กำหนดไว้จากกรณีฐาน และกำหนดให้ค่าดัชนีที่มีค่ามากที่สุดเป็นตัวแทนของอนุภาคนั้นๆ ส่วนการตรวจสอบเงื่อนไขความมั่นคง N-1 จะทำการวิเคราะห์ทีละอนุภาคว่ามีการละเมิดเงื่อนไขหรือไม่ เมื่อมีการปลดสายส่งออกจากวงจรทีละเส้น หากมีกรณีใดกรณีหนึ่งที่เกิดการละเมิด ถือว่าไม่ผ่านเงื่อนไข N-1 ภาพที่ 4.4แสดงกระบวนการตรวจสอบเงื่อนไข N-1



ภาพที่ 4.4 กระบวนการตรวจสอบ N-1

สำหรับการพิจารณาคุณภาพของคำตอบจะใช้หลักการให้คะแนนเข้ามาช่วย โดยจะพิจารณาอนุภาคที่ผ่านเงื่อนไขการทำงานทั้งหมดของระบบทั้งหมด เกณฑ์ของคะแนนจะพิจารณาจากคะแนนรวมจากคะแนนของระบบ คะแนนจากเงื่อนไขดัชนีเสถียรภาพของระบบ และคะแนนจากเงื่อนไขความมั่นคงเมื่อมีสายส่งหลุด 1 วงจร ซึ่งแต่ละคะแนนมีหลักการหาดังนี้

■ คะแนนของระบบ (Network score)

คะแนนของระบบจะขึ้นอยู่กับจำนวนของโครงข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยระบบจะต้องผ่านเงื่อนไขการทำงานทั้งหมดก่อนที่จะนำมาคิดคะแนน ถ้าไม่ผ่านเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งแล้วจะถือว่าคะแนนของระบบนั้นเป็น 0 คะแนน แต่ถ้าผ่านเงื่อนไขการทำงานได้ทั้งหมดจะสามารถคำนวณคะแนนของระบบได้ตามสมการที่ 4.14 ดังนั้นคะแนนในส่วนนี้จะถูกกำหนดให้อยู่ในช่วง 1 ถึง 10,000 คะแนน

$$Network\ score = integer \left[10,000 \times \left(\frac{I}{No.\ of\ network\ changed} \right) \right] \quad 4.14$$

■ คะแนนจากค่าดัชนีเสถียรภาพของระบบ (Security score)

หลังจากคำนวณค่าดัชนีเสถียรภาพของระบบ (Security index) แล้ว จะนำค่าขอบของดัชนีเสถียรภาพ (Security margin) ที่ถูกกำหนดมาจากกรณีฐานมาหารเพื่อแปลงค่าดัชนีเสถียรภาพให้

อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยที่ค่าดัชนีเสถียรภาพของระบบจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าขอบของดัชนีเสถียรภาพเสมอ มิฉะนั้นจะถือเป็นการละเมิดเงื่อนไข คะแนนสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4.15 และ 4.16

$$\text{security rate} = \frac{\text{security index}}{\text{security margin}} \quad 4.15$$

$$\text{Security score} = 1 - \max(\text{security rate}) \quad 4.16$$

▪ **คะแนนจากเงื่อนไขความมั่นคงเมื่อมีสายส่งหลุด 1 วงจร (N-1 score)**

คะแนนในส่วนนี้จะถูกคิดก็ต่อเมื่อระบบผ่านทุกเงื่อนไขก่อนหน้า และจะแบ่งออกเป็น 2 คะแนนเท่านั้นขึ้นอยู่กับว่า ระบบสามารถผ่านหรือไม่ผ่านเงื่อนไข N-1 นี้ ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงแล้ว ระบบยังสามารถทำงานได้หากมีสายส่งหลุดออก 1 วงจรคะแนนที่ได้จะเท่ากับ 100,000 คะแนน แต่ถ้าหากไม่ผ่านคะแนนในส่วนนี้ก็ถือเป็น 0 คะแนนเช่นกัน

เมื่อมีคะแนนทั้งสามส่วนแล้วจะนำคะแนนที่ได้มารวมกันเป็นคะแนนรวมของระบบ (*System score*) จากนั้นทำการพิจารณาเปรียบเทียบคุณภาพของแต่ละอนุภาค ตารางที่ 4.2 ยกตัวอย่างการให้คะแนนของแต่ละอนุภาค

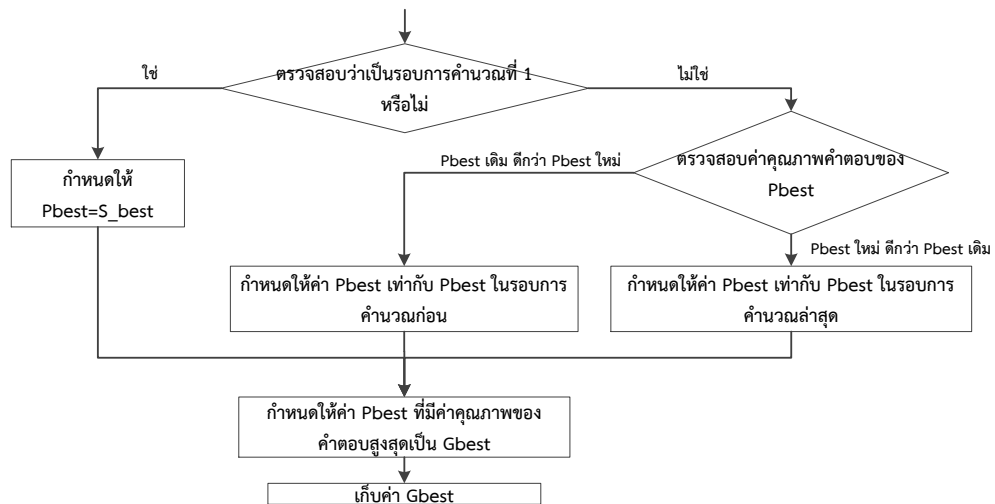
ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างการให้คะแนนของการเปลี่ยนแปลงระบบ

ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงระบบ			ผ่านเงื่อนไขบังคับ	คะแนนของระบบ	<i>PQVSI</i> สูงสุด	<i>PQVSI margin</i>	คะแนนจากค่าดัชนี <i>PQVSI</i>	ผ่านเงื่อนไข N-1	คะแนนรวมของระบบ
13	22	24	ไม่ผ่าน	0	-	0.5	-	-	0
0	0	12	ผ่าน	10,000	0.4781	0.5	0.0438	ไม่ผ่าน	10,000.0438
13	15	12	ผ่าน	3,333	0.4881	0.5	0.0238	ผ่าน	103,333.0238
1	11	15	ผ่าน	3,333	0.5643	0.5	-0.1286	ผ่าน	103,332.8714

จะเห็นได้ว่า เงื่อนไขบังคับที่พิจารณาจะถูกให้ความสำคัญมากกว่าการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายมากกว่าค่าดัชนีเสถียรภาพของระบบ และมากกว่าคะแนนจากเงื่อนไข N-1 เนื่องจากหากระบบมีการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายแล้วทำให้ละเมิดเงื่อนไขบังคับใดเงื่อนไขหนึ่ง ก็ถือว่าการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายของระบบนั้นไม่สามารถนำไปใช้จริงได้ และในทำนองเดียวกันหากระบบมีการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายที่มากก็จะทำให้ระบบมีความมั่นคงลดลง ดังนั้นการเปรียบเทียบคะแนนของแต่ละอนุภาคคือ ถ้าอนุภาคใดมีคะแนนมากกว่าจะถือว่าอนุภาคนั้นมีคุณภาพค่าตอบดีกว่า สังเกตได้จากชุดคำตอบที่ 3

และ 4 ที่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนเท่ากัน ผ่านเงื่อนไขการทำงานและเงื่อนไข N-1 เหมือนกัน แต่ค่าคะแนน PQVSI ที่ได้นั้นต่างกัน จึงสามารถนำมาชีวิตได้ว่าคำตอบไหนมีคุณภาพมากกว่ากัน หรือระบบหลังการเปลี่ยนแปลงแบบไหนที่มีความมั่นคงมากกว่ากัน

ขั้นตอนที่ 6 หาค่า $pbest$ และ $gbest$ จากอนุภาคโดยหลักการหาที่มีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 4.5 แสดงหลักการหาค่า $pbest$ และ $gbest$

การตรวจสอบคุณภาพคำตอบของ $pbest$ และ $gbest$ จะพิจารณาจากคะแนนรวมที่ได้จากขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 7 ทำการปรับค่าเวกเตอร์ความเร็ว และเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคตามสมการที่ 4.17 และ 4.18 ดังนี้

$$\vec{v}_i(t) = \omega \cdot \vec{v}_i(t-1) + c_p \cdot rand(0,1) \cdot [\vec{p}_{pbest_i} - \vec{p}_i(t)] + c_g \cdot rand(0,1) \cdot [\vec{p}_{gbest} - \vec{p}_i(t)] \quad 4.17$$

$$\vec{p}_i(t) = \vec{p}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad 4.18$$

ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อยใช้สำหรับการลดความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในแต่ละรอบการคำนวณ โดยวิธานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เป็นแบบฟังก์ชันเชิงเส้นดังสมการที่ 4.19

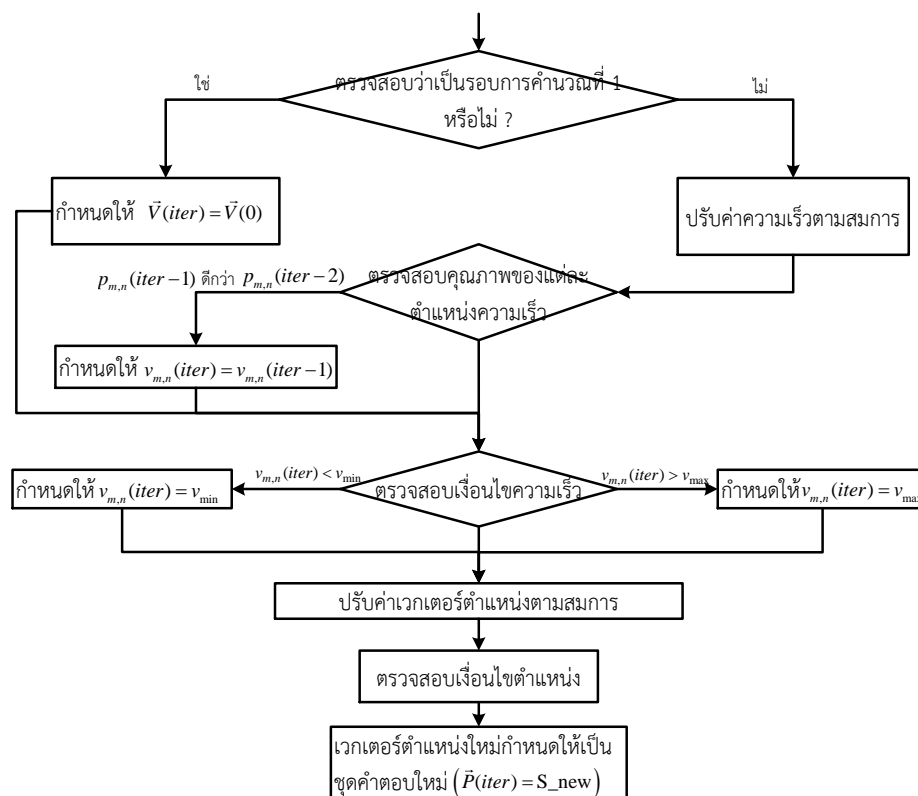
$$\omega = \omega_{max} - \left(\frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_max} \right) \times iter \quad 4.19$$

การปรับความเร็วของแต่ละอนุภาคในวิธานิพนธ์นี้จะใช้หลักการปรับค่าเวกเตอร์ความเร็วแบบใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการค้นหาให้หลุดจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น โดยใน

รอบการคำนวณที่ 1 จะยังคงปรับค่าความเร็วของอนุภาคตามสมการปรับความเร็วที่ 4.17 ในรอบการคำนวณถัดไปมีเงื่อนไขการปรับความเร็วที่พิจารณา ดังนี้

- ถ้าอนุภาคใดๆ เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่มีคุณภาพค่าตอบดีขึ้น จะคงค่าความเร็วของอนุภาคนั้นๆ ไว้ ไม่นำมาปรับตามสมการปรับความเร็วของอนุภาค
- ถ้าอนุภาคใดๆ เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ได้คุณภาพค่าตอบแย่ลง ให้นำค่าความเร็วของอนุภาคนั้นๆ มาปรับค่าความเร็วตามสมการที่ 4.17

เมื่อได้เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคแล้ว นำเวกเตอร์ความเร็วที่ได้มาตรวจสอบว่าอยู่ในช่วงความเร็วที่กำหนดไว้หรือไม่ จากนั้นนำเวกเตอร์ความเร็วที่ได้มาคำนวณหาเวกเตอร์ตำแหน่งตามสมการที่ 4.18 และกำหนดให้เวกเตอร์ตำแหน่งใหม่ที่ได้เป็นชุดค่าตอบใหม่ (S_{new})



ภาพที่ 4.6 กระบวนการปรับค่าเวกเตอร์ความเร็วและเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค

ขั้นตอนที่ 8 กำหนดให้ชุดค่าตอบใหม่ (S_{new}) เป็นชุดค่าตอบที่ดีที่สุด (S_{best})

ขั้นตอนที่ 9 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการค้นหาในขั้นตอนนี้จำประยุกต์การสร้างประชากรเพื่อนบ้านของการค้นหาแบบตาบอด มาตรวจสอบค่า $gbest$ ในแต่ละรอบการคำนวณ โดยสร้างชุดค่าตอบ ($S_{neighbor}$) รอบข้าง $gbest$ ที่ได้มาในแต่ละรอบการคำนวณ จะใช้เงื่อนไขการหารัศมีในการสร้างชุดค่าตอบรอบข้าง มีรายละเอียดดังนี้

- ถ้า g_{best} บรรลุวัตถุประสงค์ของปัญหาแล้ว รัศมีที่ใช้สร้างชุดคำตอบรอบข้างจะมีขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มความละเอียดของการค้นหา
- ถ้า g_{best} ยังไม่บรรลุวัตถุประสงค์ของปัญหา รัศมีที่ใช้สร้างชุดคำตอบรอบข้างจะมีขนาดใหญ่ เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการค้นหาคำตอบรอบๆ g_{best}

เมื่อสร้างชุดคำตอบรอบข้าง g_{best} แล้ว ให้นำชุดคำตอบรอบข้างไปวิเคราะห์หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้นนำชุดคำตอบมาเปรียบเทียบกับคุณภาพกับ g_{best} ถ้าอนุภาคใดใน $S_{neighbor}$ มีคุณภาพคำตอบที่ดีกว่า g_{best} ให้ปรับ g_{best} เป็นอนุภาคนั้นของ $S_{neighbor}$

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบว่า g_{best} บรรลุวัตถุประสงค์ตามจำนวนครั้งที่กำหนดหรือไม่ (obj_count) ถ้าครบแล้วถือว่าจบการทำงาน แต่ถ้ายังไม่ครบให้ตรวจสอบจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดว่าครบหรือไม่ ถ้าครบแล้วให้จบการทำงานเช่นกัน แต่ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 5 ถึง 10 จนกว่าจะครบตามจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด หรือคำตอบที่ได้บรรลุวัตถุประสงค์โดยมีค่าจำนวนครั้งของการลู่เข้าครบตามจำนวนที่ตั้งไว้

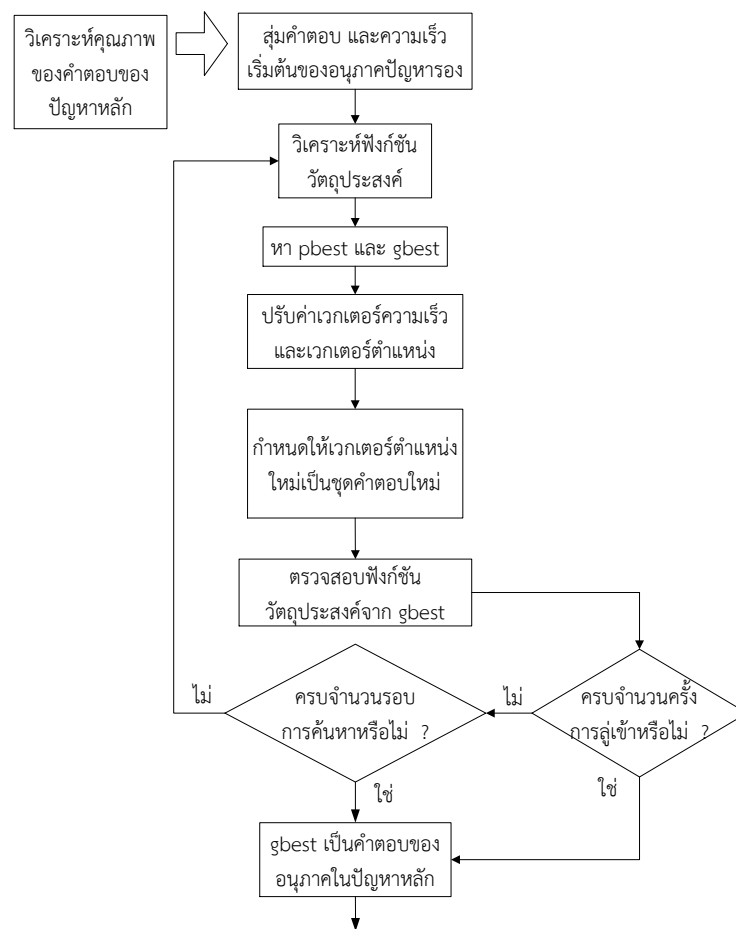
ขั้นตอนที่ 11 ได้คำตอบที่ดีที่สุดจาก g_{best}

สำหรับปัญหาอนุภาคหนึ่งอนุภาคสามารถนำไปหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้หลายค่า ซึ่งถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นไปได้ต่อหนึ่งอนุภาคมีจำนวนที่มากเกินไป จะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอให้แบ่งปัญหาออกเป็น 2 ปัญหาคือ ปัญหาหลักใช้หาอนุภาคที่เหมาะสม ส่วนปัญหารองใช้หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมของแต่ละอนุภาคในปัญหาหลัก และใช้วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเข้ามาช่วยแก้ปัญหาของทั้งสองปัญหานี้ ดังนั้นกระบวนการแก้ปัญหาจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นการแก้ปัญหาของปัญหาหลัก ส่วนที่สองเป็นการแก้ปัญหารอง

กระบวนการแก้ปัญหารองจะเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์คุณภาพของอนุภาคในปัญหาหลัก แต่ละอนุภาคของปัญหาหลักจะต้องนำมาวิเคราะห์ในปัญหารองก่อนเพื่อหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมของอนุภาคนั้นๆ แล้วนำฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้ไปวิเคราะห์ในปัญหาหลักต่อไป โดยรายละเอียดการแก้ปัญหามีดังต่อไปนี้

1. แต่ละอนุภาคของปัญหาหลักจะนำไปสู่คำตอบเริ่มต้นของปัญหารอง (F_0) จนครบจำนวนอนุภาคของปัญหารอง (sub_par) และกำหนดให้เป็นชุดคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหารอง (F_{best}) จากนั้นประเมินหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังภาพที่ 4.3

2. เมื่อได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละอนุภาคของปัญหาจริงมาจนครบทุกอนุภาคแล้ว ทำการหาค่า $pbest$ และ $gbest$ จากนั้นปรับค่าเวกเตอร์ความเร็ว และเวกเตอร์ตำแหน่งตามสมการที่ 4.17 และ 4.18
3. กำหนดให้เวกเตอร์ตำแหน่งเป็นชุดคำตอบของปัญหาจริงใหม่ (F_{new})
4. ตรวจสอบค่า $gbest$ ของอนุภาคในปัญหาจริงว่าบรรลุวัตถุประสงค์แล้วหรือไม่
5. เมื่อครบตามจำนวนรอบการคำนวณของปัญหาจริงแล้ว จะได้ว่า $gbest$ สุดท้ายเป็นคำตอบของปัญหาจริง และถือเป็นคำตอบที่มีคุณภาพดีที่สุดในปัญหาหลักนั้นๆ



ภาพที่ 4.7 กระบวนการแก้ปัญหาของปัญหาจริง

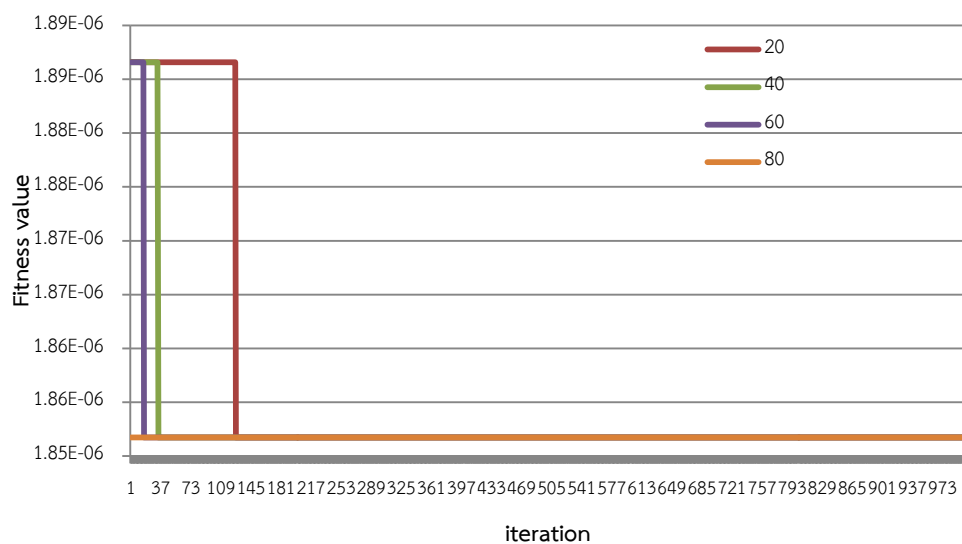
4.4 การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึมจะต้องทำการปรับค่าที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปใช้แก้ปัญหา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ ซึ่งแต่ละอัลกอริทึมจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ต้องปรับต่างกัน

ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการค้นหาของวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) ประกอบด้วย 4 พารามิเตอร์คือ จำนวนอนุภาคที่ใช้ค้นหา จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด และค่าคงที่ความเร่ง (c_p, c_g) การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะเริ่มจากการคงค่าคำตอบไว้หนึ่งค่าในการปรับพารามิเตอร์ทุกตัว โดยการปรับพารามิเตอร์จะเริ่มจากหาจำนวนอนุภาคที่เหมาะสมก่อน จากนั้นปรับจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด และค่า c_p, c_g ตามลำดับ

ตัวอย่างแสดงการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

เริ่มจากการปรับค่าจำนวนอนุภาคที่เหมาะสมนั้นจะทำการคงค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ไว้ โดยจะกำหนดให้ค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดเท่ากับ 1,000 รอบ และ $c_p, c_g = 1$ ในรอบแรกจะปรับค่าจำนวนอนุภาคเป็น 4 ค่าคือ 20, 40, 60 และ 80 อนุภาค ผลการลู่เข้าหาคำตอบเป็นดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 การลู่เข้าหาคำตอบเมื่อปรับจำนวนอนุภาค

ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อปรับจำนวนอนุภาคของตัวอย่าง

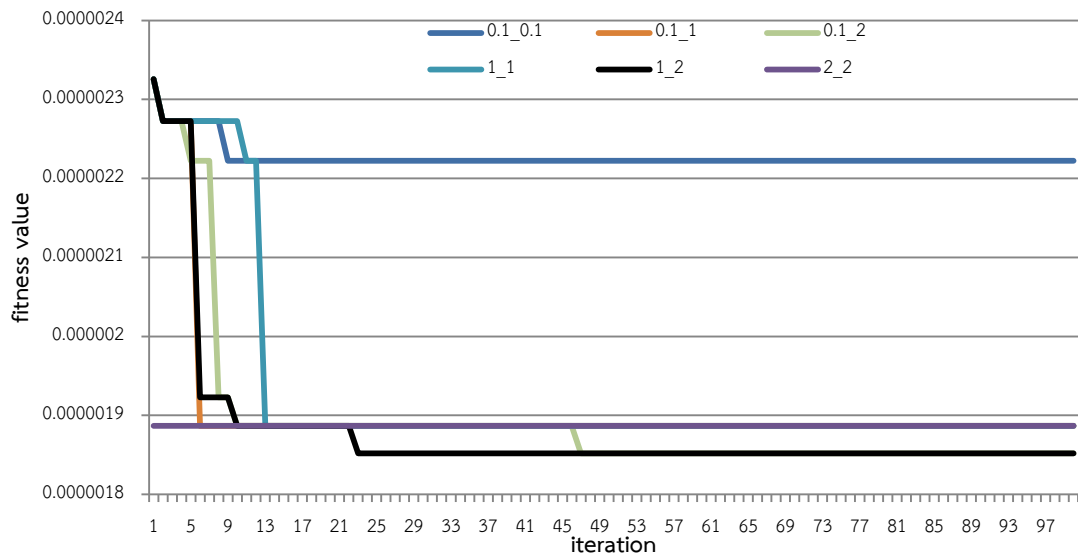
จำนวนอนุภาค	เวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ย (นาที)
20	24.57
40	70.74
60	94.07
80	121.5

จากรูปจะเห็นได้ว่าที่จำนวนอนุภาค 80 อนุภาคจะให้ค่าตอบที่ดีที่สุดทุกค่า แต่ถ้าพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณแล้วมีค่าค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับจำนวนอนุภาค 20 อนุภาค ในขณะที่ให้ค่าตอบสุดท้ายเดียวกัน ดังนั้นจำนวนอนุภาคที่ใช้ในการคำนวณนี้จึงเลือกใช้ 20 อนุภาค และรอบการคำนวณจะเลือกจากการสุ่มเข้าโดยที่จำนวนอนุภาค 20 อนุภาคเป็นการสุ่มเข้าที่แย่ที่สุดคือ สุ่มเข้าประมาณรอบที่ 120 แต่เงื่อนไขการหยุดจะหยุดก็ต่อเมื่อค่าสุ่มเข้าที่ค่าเดียวกันเกิน 50 รอบ จำนวนรอบการคำนวณสูงสุดจะเผื่อออกไปอีกประมาณ 50 รอบ ดังนั้นจึงเลือกเป็น 220 รอบ

หลังจากที่ได้ค่าจำนวนอนุภาคที่ใช้และจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดที่เหมาะสมแล้วจะทำปรับค่าพารามิเตอร์ c_p, c_g เริ่มจากคงค่าจำนวนอนุภาค และรอบการคำนวณสูงสุดไว้คือ 20 อนุภาค และ 220 รอบ จากนั้นเลือกค่า c_p และ c_g มาอย่างละ 3 ค่าคือ 0.1, 1 และ 2 ซึ่งจะได้กรณีทดสอบทั้งหมด 6 กรณี โดยกำหนดให้ c_p มีค่าน้อยกว่า c_g ดังตารางที่ 4.4 และได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 4.9

ตารางที่ 4.4 กรณีของค่าคงที่ความเร่งของตัวอย่าง

กรณีที่	c_p	c_g
1	0.1	0.1
2	0.1	1
3	0.1	2
4	1	1
5	1	2
6	2	2



ภาพที่ 4.9 การลู่เข้าหาคำตอบเมื่อปรับค่าคงที่ความเร่ง

จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ $c_p = 1, c_g = 2$ เป็นค่าที่มีการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นจะได้ว่าจำนวนอนุภาคที่เหมาะสมคือ 20 อนุภาค จำนวนรอบการคำนวณสูงสุดคือ 220 รอบ และค่าคงที่ความเร่ง $c_p = 1, c_g = 2$

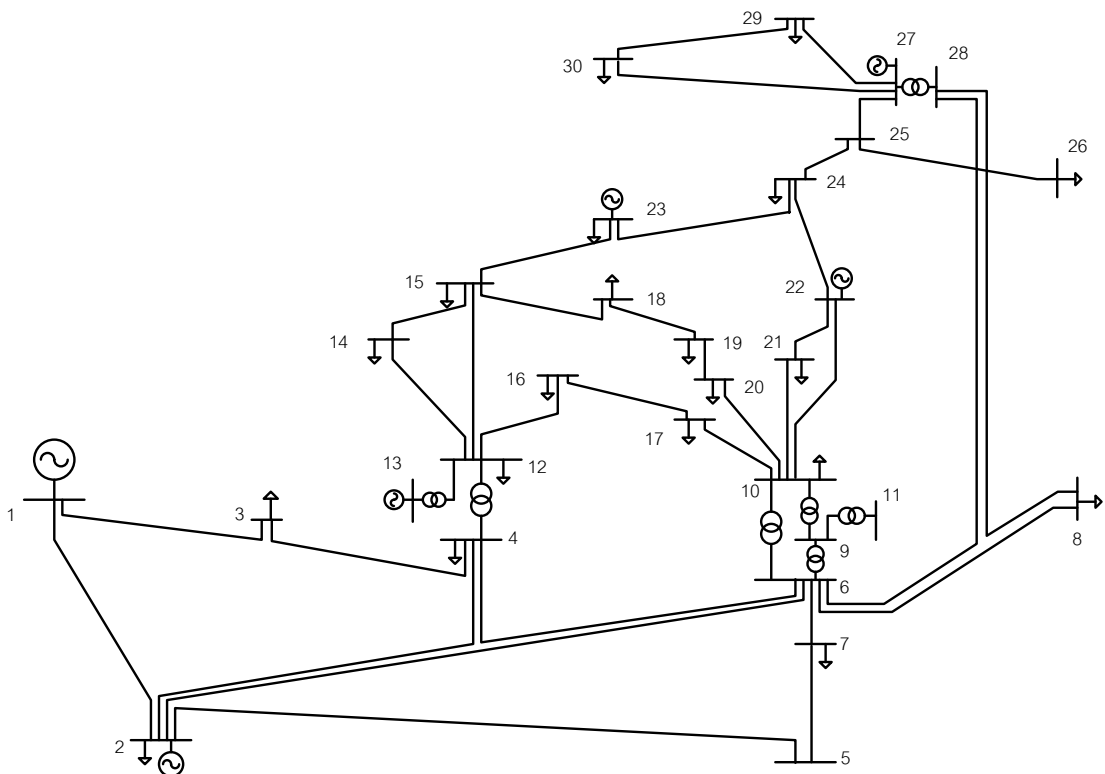
บทที่ 5

การทดสอบสมรรถนะ

บทนี้กล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะของโปรแกรมค้นหาคำตอบด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคซึ่งนำมาใช้แก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ากับระบบต่างๆ เนื้อหาหลักจะประกอบด้วยระบบทดสอบ ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบในแต่ละกรณีศึกษาซึ่งมีรูปแบบปัญหาที่แตกต่างกัน โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

5.1 ระบบทดสอบ

ประสิทธิภาพของวิธีการแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เบื้องต้นนำไปทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส [30] ซึ่งมีความซับซ้อนในการเชื่อมต่อแบบลูปซ้อนกันหลายลูปคล้ายกับระบบไฟฟ้าในเขตเมืองใหญ่ มีรายละเอียดที่สำคัญประกอบไปด้วย บัสไฟฟ้า 30 บัส วงจรสายส่ง 34 วงจร หม้อแปลงไฟฟ้า 7 ตัว โหลดกำลังคงที่ 20 จุดจ่ายโหลด และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 เครื่อง ดังแสดงในภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

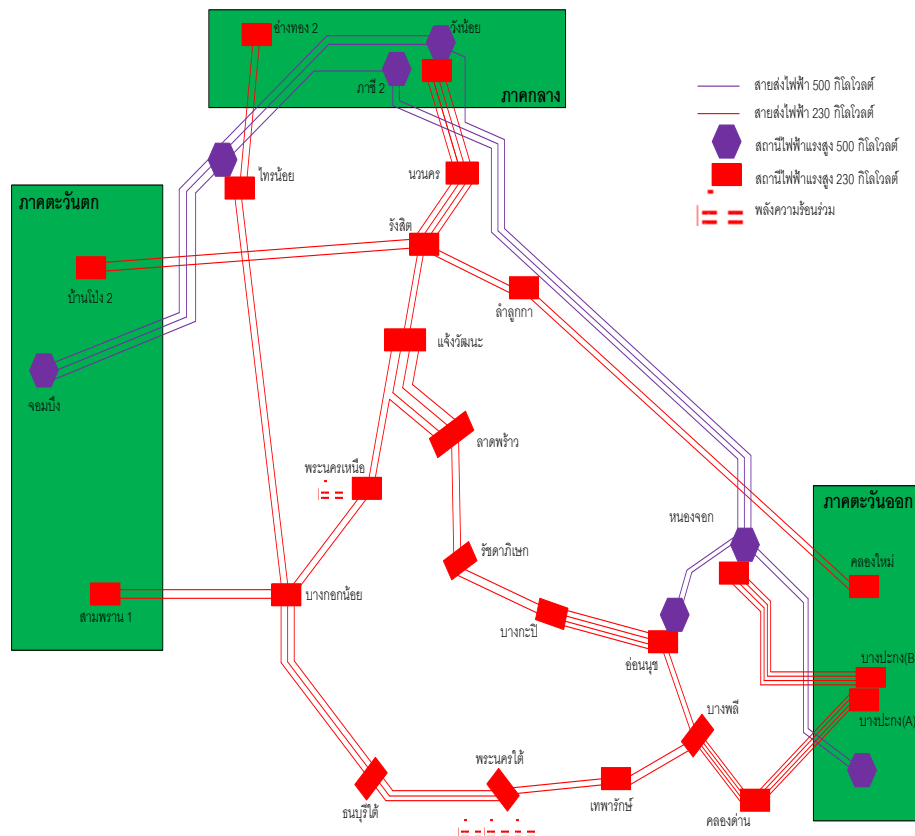
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวมีสัมประสิทธิ์ราคาการผลิตไฟฟ้าดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สัมประสิทธิ์ราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบ IEEE 30 บัส

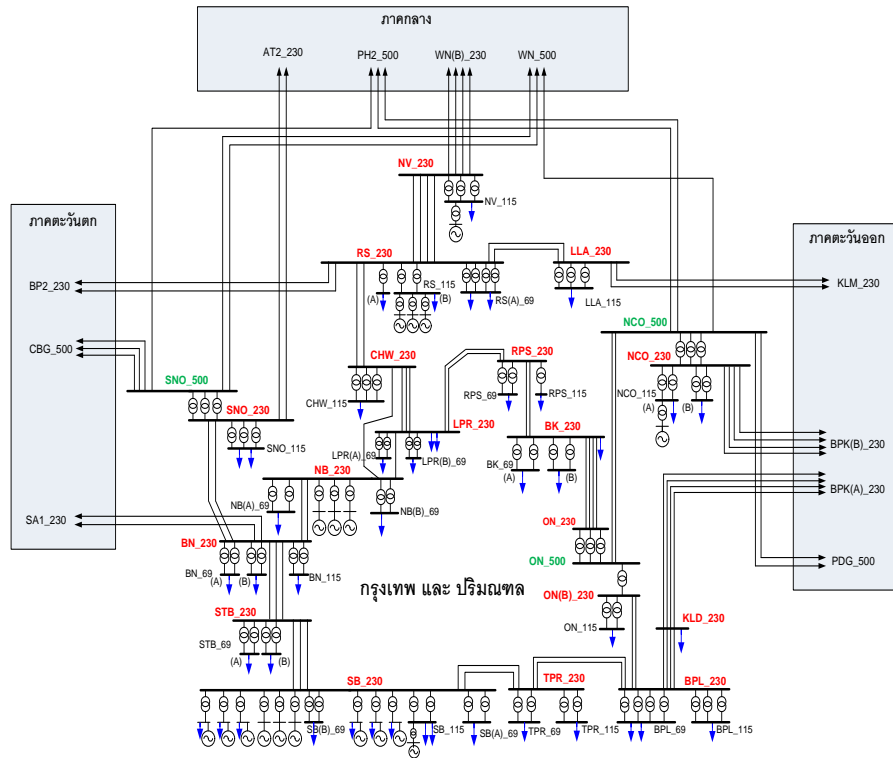
	Gen1	Gen2	Gen5	Gen8	Gen11	Gen13
a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
b	200	175	100	325	300	300
c	37.5	175	625	83.4	250	250

นอกจากระบบทดสอบขนาดเล็กแล้ว ยังได้นำไปทดสอบกับระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงของ กฟผ. โดยระบบที่นำมาใช้ทดสอบจะถูกลดรูปเพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลของ กฟผ. เท่านั้น

ระบบส่งไฟฟ้ากำลังที่นำมาวิเคราะห์นี้เป็นระบบที่ถูกจำลองการเกิดปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดของเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟาระดับแรงดัน 230 และ 500 kV ในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล รายละเอียดที่สำคัญของระบบได้แก่ ขนาดกำลังการผลิตรวม 17,520 MW ขนาดของโหลดรวมเท่ากับ 17,402 MW มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 108 เครื่อง จำนวนบัสในระบบรวม 254 บัส วงจรสายส่ง 215 วงจร หม้อแปลงไฟฟ้า 214 ตัว และพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำหนดให้อยู่ที่ 50 kA โดยการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแสดงได้ดังภาพที่ 5.2 และรูปแผนภาพเส้นเดียวแสดงได้ดังภาพที่ 5.3

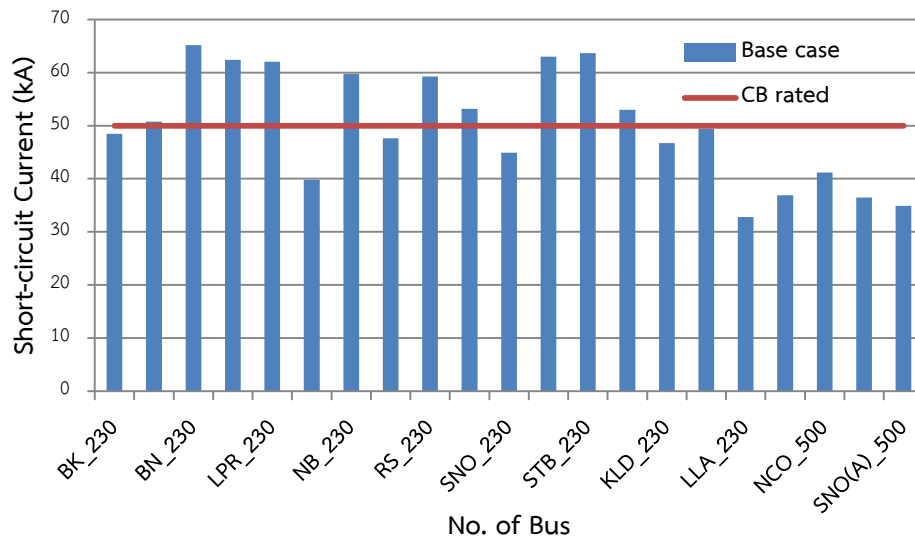


ภาพที่ 5.2 การเชื่อมต่อสายส่งของแต่ละสถานีไฟฟ้าแรงสูงในกรุงเทพฯ และปริมณฑล



ภาพที่ 5.3 รูปแผนภาพเส้นเดี่ยวของวงจรไฟฟ้าในกรุงเทพฯ และปริมณฑล

กรณีฐาน หรือกรณีที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบนั้น จากการทดสอบการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าพบว่า ไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับต่างๆ ยกเว้นเงื่อนไขของกระแสลัดวงจร ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5.4 และตารางที่ 5.2



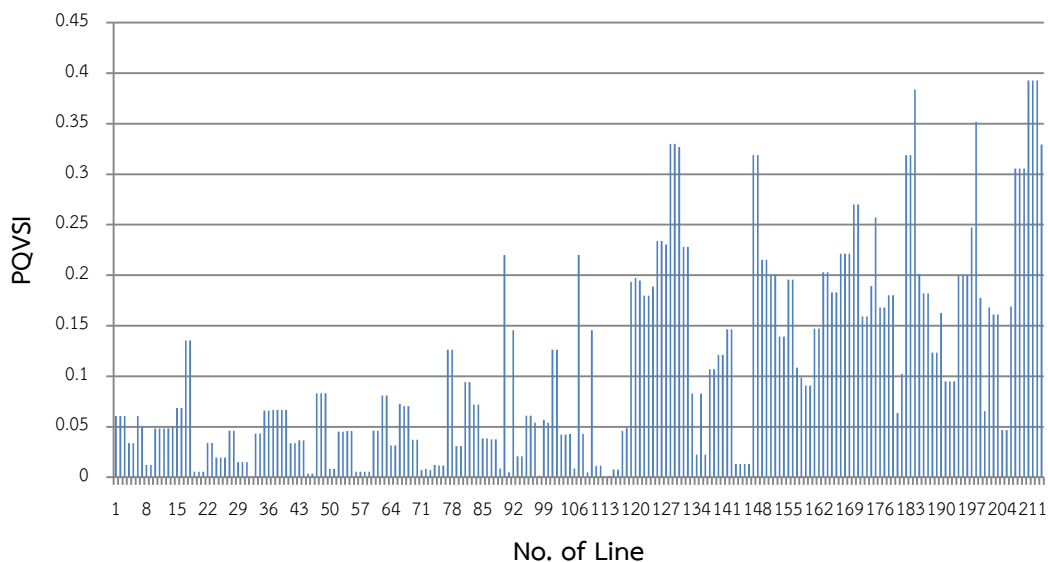
ภาพที่ 5.4 ขนาดกระแสลัดวงจรในกรณีฐานที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล

ตารางที่ 5.2 แสดงค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสของแต่ละสถานีในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล

ชื่อสถานีไฟฟ้า	ระดับแรงดันบัส (kV)	กระแสลัดวงจร (kA)	รูปแบบการลัดวงจร
บางกะปิ	230	48.92	3 เฟส
บางพลี	230	52.08	3 เฟส
บางกอกน้อย	230	65.69	3 เฟส
แจ้งวัฒนะ	230	61.36	3 เฟส
ลาดพร้าว	230	60.80	3 เฟส
หนองจอก	230	37.76	3 เฟส
พระนครเหนือ	230	60.42	3 เฟส
อ่อนนุชA	230	48.07	3 เฟส
รังสิต	230	60.20	3 เฟส
รัชดาภิเษก	230	51.72	3 เฟส
ไทรม้า	230	43.83	3 เฟส
พระนครใต้	230	62.60	1 เฟส
ธนบุรีใต้	230	61.51	3 เฟส
เทพารักษ์	230	52.58	3 เฟส
คลองด่าน	230	46.60	3 เฟส
นวนคร	230	48.49	3 เฟส
ลำลูกกา	230	32.76	3 เฟส
อ่อนนุชB	230	36.31	3 เฟส
หนองจอก	500	40.29	3 เฟส
อ่อนนุช	500	34.63	3 เฟส
ไทรม้า	500	34.77	3 เฟส

เนื่องจากระบบไฟฟ้าในเขตนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อน และมีการเชื่อมต่อแบบลูปอยู่มาก ค่ากระแสลัดวงจรที่บัสจึงมีค่าเกินกว่า 50 kA ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งบัสที่กระแสลัดวงจรมีค่าสูงเกินพิกัดของเบรกเกอร์ ที่ระดับแรงดัน 230 kV ได้แก่ สถานีไฟฟ้าบางพลี บางกอกน้อย แจ้งวัฒนะ ลาดพร้าว พระนครเหนือ รังสิต รัชดาภิเษก พระนครใต้ ธนบุรีใต้ เทพารักษ์ ซึ่งเป็นสถานีที่เชื่อมต่อกับจุดโหลดที่สำคัญในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล และเมื่อประเมินเรื่องของเสถียรภาพเชิงแรงดัน

แบบ PQ ตามภาพที่ 5.5 แล้วพบว่า ค่า PQVSI สูงสุดที่วัดได้คือ 0.3929 ดังนั้นค่า *PQVSI_margin* ในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้เป็น 0.5 ของทุกสายส่ง



ภาพที่ 5.5 ค่า PQVSI ของสายส่งกรณีฐานในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล

5.2 ผลการทดสอบสมรรถนะ

การทดสอบสมรรถนะในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณี โดยแต่ละกรณีจะมีวัตถุประสงค์ของการทดสอบดังนี้

กรณีศึกษาที่ 1 เพื่อตรวจทานความถูกต้องของโปรแกรม จึงนำไปประยุกต์หาค่าราคาเชื้อเพลิงต่ำสุดในการผลิตไฟฟ้า ตามบทความที่ [30]

กรณีศึกษาที่ 2 เพื่อหาดำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งเพื่อจำกัดค่ากระแสลัดวงจร ซึ่งรูปแบบปัญหาถือเป็นรูปแบบปัญหาที่ 1

กรณีศึกษาที่ 3 เพื่อหาดำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมของการแบ่งแยกบัสเพื่อจำกัดค่ากระแสลัดวงจร ซึ่งรูปแบบปัญหาถือเป็นรูปแบบปัญหาที่ 2

กรณีศึกษาที่ 4 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม จึงนำไปประยุกต์หาดำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมของการประยุกต์ใช้รีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัส

5.2.1 กรณีศึกษาที่ 1 การหาค่าราคาเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดกับระบบ IEEE 30 บัส

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่ากรณีศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อตรวจทานความถูกต้องของโปรแกรม ดังนั้นจะทำการทดสอบกับบทความที่ [30] ซึ่งต้องการหาค่าราคาเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุด สมการที่ 5.1 ถึงสมการที่ 5.9 แสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขบังคับที่พิจารณา

$$\text{Minimize } F_{total} = \sum_{i=1}^{ngen} F_i(P_i) \quad 5.1$$

$$\text{โดยที่ } F_i(P_i) = c_i P_i^2 + b_i P_i + a_i \quad i = 1, 2, \dots, ngen \quad 5.2$$

F_{total} คือ ค่าราคาเชื้อเพลิงทั้งหมด

$F_i(P_i)$ คือ ค่าราคาเชื้อเพลิงของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เงื่อนไขการทำงานของระบบ

1. เงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วย P_G , V_G และ Q_G

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \quad 5.3$$

$$V_{G_i}^{\min} \leq V_{G_i} \leq V_{G_i}^{\max} \quad 5.4$$

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max} \quad 5.5$$

2. เงื่อนไขของการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลง

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad 5.6$$

3. เงื่อนไขของ shunt reactive power

$$Q_{C_i}^{\min} \leq Q_{C_i} \leq Q_{C_i}^{\max} \quad 5.7$$

เงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

1. เงื่อนไขความมั่นคงนี้จะพิจารณาแรงดันที่บัสโหลด และกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายของโหลด

$$V_{L_i}^{\min} \leq V_{L_i} \leq V_{L_i}^{\max} \quad 5.8$$

$$S_{L_i} \leq S_{L_i}^{\max} \quad 5.9$$

ส่วนตัวแปรสถานะ (X^T) และตัวแปรควบคุม (Y^T) มีดังต่อไปนี้

$$X^T = [P_{G1}, V_{L,1} \dots V_{L,N_L}, Q_{G,1} \dots Q_{G,N_G}, S_{L,1} \dots S_{L,N_L}] \quad 5.10$$

$$Y^T = [V_{G1} \dots V_{G,N_G}, P_{G,2} \dots P_{G,N_G}, T_1 \dots T_{N_T}, Q_{C,1} \dots Q_{C,N_C}] \quad 5.11$$

จากสมการที่ 5.11 ประกอบด้วยตัวแปรควบคุม 25 ตัวแปรคือ กำลังผลิตไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 ค่า แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 ค่า ยกเว้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง แต่ที่หม้อแปลง 4 ตัว และ shunt reactive power อีก 9 ตัว

โดยหากนำวิธีค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคมาช่วยแก้ปัญหาจะกำหนดให้อนุภาคแทนตัวแปรควบคุมทั้งหมด นั่นหมายความว่า อนุภาค 1 อนุภาคคือเมตริกซ์ขนาด 1×25 (1 คือจำนวนอนุภาค และ 25 คือจำนวนตัวแปรควบคุม) ดังนั้นถ้ากำหนดให้ใช้ 100 อนุภาค ชุดคำตอบเริ่มต้น (S_0) ที่จะสุ่มจะเป็นเมตริกซ์ขนาด 100×25 นั่นเอง

ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคนั้น ในกรณีศึกษาที่ใช้ค่าตามบทความที่ [30] คือ จำนวนอนุภาคที่ใช้ในการค้นหา 100 อนุภาค จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด 400 รอบ และค่าคงที่ความเร่ง (c_p, c_g) มีค่าเท่ากับ 2 หลังจากทำการทดสอบอัลกอริทึมพบว่า ค่าราคาเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดที่หาได้คือ 820.2569 ดอลลาร์ต่อชั่วโมง

ตารางที่ 5.3 ราคาเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดจากการค้นหาแต่ละอัลกอริทึม

คำตอบ	PSO [30]	IPSO [30]	วิธีที่นำเสนอ
ราคาเชื้อเพลิง (ดอลลาร์ต่อชั่วโมง)	820.4114	820.2950	820.2569

ซึ่งเมื่อเทียบคำตอบกับบทความ [30] ค่าที่ได้นั้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของคำตอบจากวิธีที่นำเสนอกับวิธีการค้นหาคำตอบในบทความแสดงได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เปอร์เซนต์ความแตกต่างของคำตอบ

วิธีการค้นหาคำตอบ	เปอร์เซนต์ความแตกต่างของคำตอบ เทียบกับวิธีที่นำเสนอ (%)
PSO [30]	0.0188
IPSO [30]	0.004645

จะเห็นได้ว่าเปอร์เซนต์ความแตกต่างของคำตอบนั้นมีค่าน้อยมาก จึงถือว่าโปรแกรมมีการตรวจทานอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

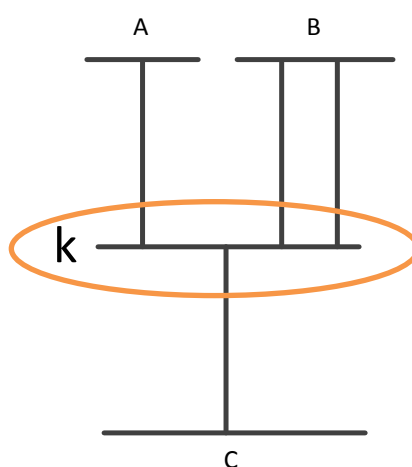
5.2.2 กรณีศึกษาที่ 2 การจำกัดกระแสลัดวงจรด้วยการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งกับระบบส่งไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพฯ.

กรณีศึกษาที่ 2 นี้ก่อนที่จะหาตำแหน่ง และจำนวนที่เหมาะสมของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณหารูปแบบที่เป็นไปได้ของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง [31]

รูปแบบของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งจะพิจารณาสายส่งครั้งละ 2 เส้น และบัสที่สามารถทำการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งต้องมีสายส่งเชื่อมต่ออย่างน้อย 3 เส้นและบัสที่เชื่อมต่ออย่างน้อย 2 บัสกับบัสที่พิจารณา เพื่อไม่ให้เกิดการแยกตัวของระบบหลังจากการเปลี่ยนแปลงโครงข่าย โดยรูปแบบที่เป็นไปได้ของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งที่บัสสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5.12 [31]

$$\text{Forms of Line-bypassing} = \frac{n!}{2!(n-2)!}; n = 2, 3, 4, \dots \quad 5.12$$

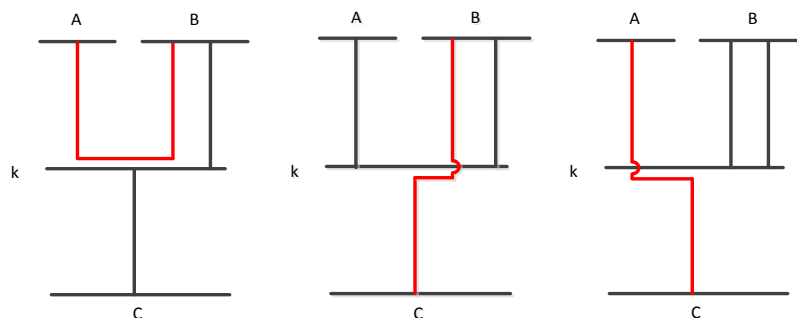
ตัวอย่าง การเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งที่บัส k [31]



ภาพที่ 5.6 การเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งที่บัส k

เมื่อพิจารณาบัสที่จะทำการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งคือ บัส k ดังภาพที่ 5.6 พบว่ามีบัสเชื่อมต่อกับบัส k ทั้งหมด 3 บัส ($n=3$) มีสายส่งเชื่อมต่อ 4 เส้น ภาพที่ 5.7 แสดงรูปแบบการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง โดยจะสามารถคำนวณรูปแบบของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Forms of Line-bypassing} &= \frac{3!}{2!(3-2)!} \\ &= 3 \text{ รูปแบบ} \end{aligned}$$



ภาพที่ 5.7 แสดงการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งของตัวอย่าง

ภายหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งในระบบเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรนั้น จะพิจารณาเงื่อนไขการทำงานของระบบ จำนวนของบัสที่ทำการเปลี่ยนการเชื่อมต่อ และความมั่นคงของระบบ เพื่อกำหนดให้การพิจารณาอยู่บนฐานเดียวกัน จะใช้เกณฑ์การให้คะแนนเข้ามาช่วยซึ่งประกอบด้วยคะแนนที่มาจากจำนวนของบัสที่เปลี่ยนการเชื่อมต่อสายส่ง (*Bus_score*) คะแนนจากค่าสูงสุดของเสถียรภาพแรงดันแบบ PQ ของระบบ (*PQVSI_score*) และคะแนนจากการวิเคราะห์ $N-1$ (*N-1_score*) จะนำคะแนนทั้งสามส่วนนี้มารวมกันเป็นคะแนนรวมของระบบ (*System_score*) ดังสมการที่ 5.13 โดยคะแนนรวมของระบบยิ่งมากเท่าไร คุณภาพค่าตอบที่ได้ก็ถือว่ายิ่งดีเท่านั้น ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจะทำการหาค่าสูงสุดของคะแนนรวมของระบบ ซึ่งแสดงไว้ดังสมการที่ 5.14

$$\text{System_score} = \text{Bus_score} + \text{PQVSI_score} + \text{N-1_score} \quad 5.13$$

$$\text{Maximize System_score} \quad 5.14$$

ส่วนเงื่อนไขบังคับที่พิจารณาแบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไขหลักๆคือ เงื่อนไขของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อ เงื่อนไขการทำงานของระบบ และเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ โดยแต่ละเงื่อนไขมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เงื่อนไขของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง

1. บัสที่จะทำการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งจะต้องมีสายส่งเชื่อมต่ออย่างน้อย 3 เส้น และมีบัสเชื่อมต่ออย่างน้อย 2 บัส
2. การเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งจะต้องไม่เกิดลูปการไหลวนกลับของไฟฟ้าสู่บัสเดิม

3. การเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งจะทำให้สายส่งที่ละ 2 เส้นเท่านั้น
4. สายส่งที่จะทำการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งจะต้องเป็นสายส่งที่ระดับแรงดันเดียวกัน หรือเมื่อเปลี่ยนเส้นทางการไหลของไฟฟ้าแล้วค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏไม่เกินพิกัดของสายส่งที่มีค่าพิกัดต่ำกว่า
5. ไม่พิจารณาสายส่งที่มีหม้อแปลง หรือนำหม้อแปลงมาพิจารณาในการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง

เงื่อนไขการทำงานของระบบ

1. เงื่อนไขการแยกตัวของระบบ

$$islanding = 1 \quad 5.15$$

โดยถ้า *islanding* เป็น 1 แสดงว่าไม่มีการแยกตัวของระบบ และถ้าเป็น 0 แสดงว่ามีการแยกตัวของระบบเกิดขึ้น

2. ความสมดุลของกำลังไฟฟ้าที่บัส (Power balance) ต้องเป็นไปตามสมการ

$$P_i = P_{G_i} - P_{D_i} = \sum_{j=1}^{nbus} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad i = 2, \dots, nbus \quad 5.16$$

$$Q_i = Q_{G_i} - Q_{D_i} = - \sum_{j=1}^{nbus} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad i = 2, \dots, nbus \quad 5.17$$

3. ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส *i* ต้องอยู่ระหว่างค่าพิกัดต่ำสุดและสูงสุด

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \quad 5.18$$

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max} \quad 5.19$$

4. แรงดันแต่ละบัสต้องอยู่ระหว่างค่าพิกัดต่ำสุดและค่าสูงสุด

$$V_i^{\min} \leq |V_i| \leq V_i^{\max} \quad 5.20$$

5. ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจรต้องไม่เกินค่าพิกัดสูงสุดที่สายส่งทนได้

$$|S_{ij}| \leq S_{ij}^{\max} \quad 5.21$$

เงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

1. ค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสต้องไม่เกินค่าพิกัดของเบรกเกอร์คือ 50 kA

$$|I_{sc_i}| \leq CB_i^{rate} \quad 5.22$$

2. เงื่อนไขเสถียรภาพเชิงแรงดันแบบ PQ ในแต่ละสายส่ง

$$PQVSI_i < PQVSI_margin \quad 5.23$$

โดยที่ค่า $PQVSI_margin$ จะถูกกำหนดในกรณีฐานของระบบปกติ

3. เงื่อนไขความมั่นคงเมื่อมีสายส่งหลุดออก 1 วงจร

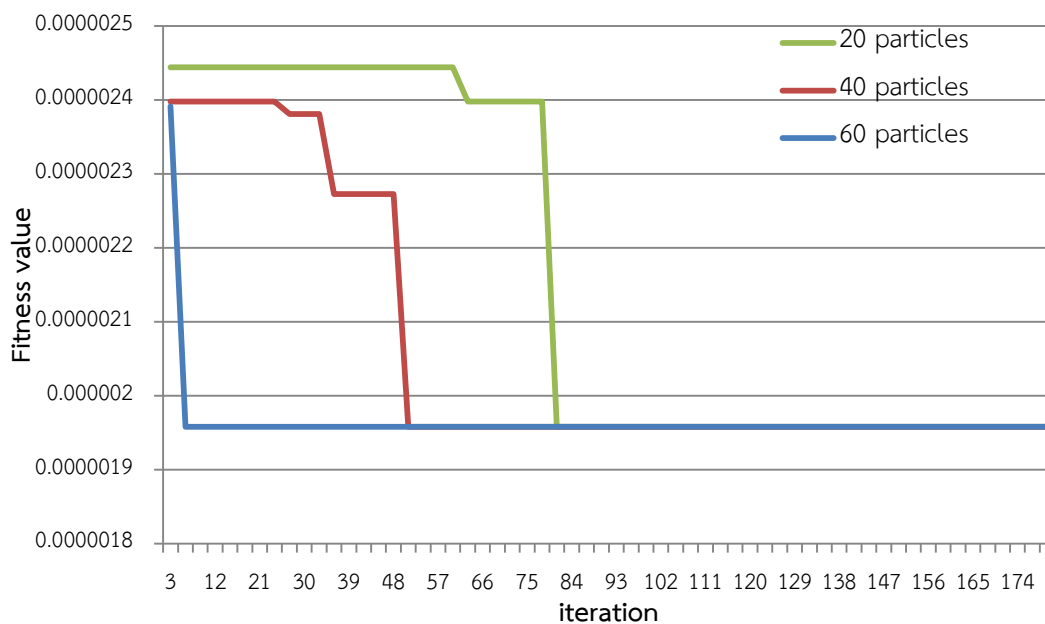
$$N_1 = 1 \quad 5.24$$

โดยถ้า N_1 เป็น 1 แสดงว่าผ่านเงื่อนไข และถ้าเป็น 0 แสดงว่าไม่มีผ่านเงื่อนไข

เมื่อนำวิธีค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคมาช่วยค้นหาตำแหน่ง และจำนวนของบัสที่เหมาะสมของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งแล้วนั้น จะกำหนดให้อนุภาคแทนตำแหน่งบัสที่ทำการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง และกำหนดให้อนุภาคหนึ่งมีตำแหน่งบัสที่เปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งได้สูงสุดเพียง 3 บัสเท่านั้น

ก่อนค้นหาคำตอบของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง จะทำการทดสอบอัลกอริทึมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมในการประยุกต์กับรูปแบบปัญหานี้ และเพื่อหาจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดและจำนวนอนุภาคที่ใช้ในการคำนวณที่เหมาะสมตามหลักการที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.4

เริ่มจากการปรับค่าจำนวนอนุภาคที่ใช้ จะทำการคงค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ไว้ โดยจะกำหนดให้ค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดเท่ากับ 1,000 รอบ และ $c_p, c_g = 1$ ในรอบแรกจะปรับค่าจำนวนอนุภาคเป็น 3 ค่าคือ 20, 40 และ 60 อนุภาค ผลการลู่เข้าหาคำตอบเป็นดังแสดงดังภาพที่ 5.8



ภาพที่ 5.8 การลู่เข้าหาคำตอบเมื่อปรับจำนวนอนุภาคของกรณีศึกษาที่ 2

ตารางที่ 5.5 เวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อปรับจำนวนอนุภาคของกรณีศึกษาที่ 2

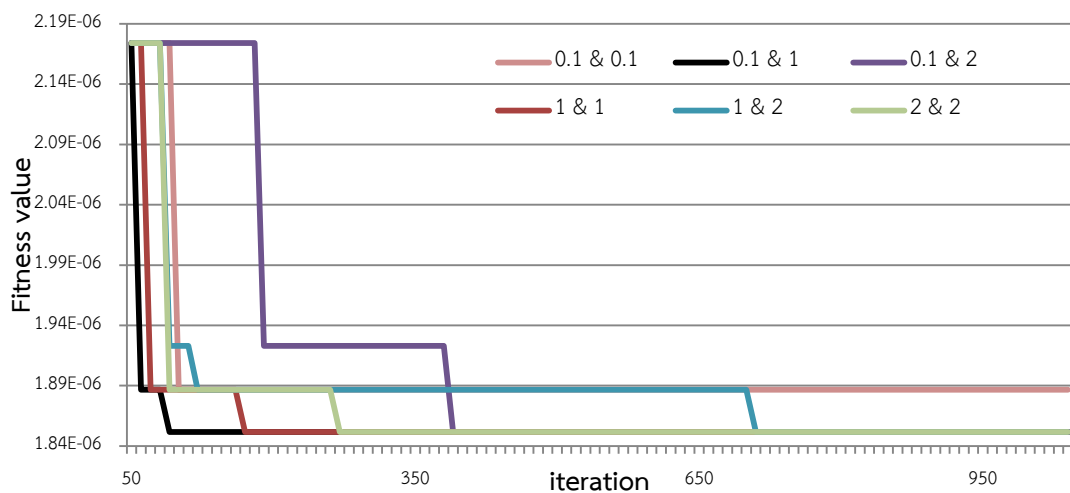
จำนวนอนุภาค	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (ชั่วโมง)
20	49.779
40	60.125
60	92.018

จากภาพที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าที่จำนวนอนุภาค 60 อนุภาคมีการลู่เข้าหาคำตอบเร็วที่สุด แต่ถ้าพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณแล้วมีค่าค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับจำนวนอนุภาค 20 อนุภาค ในขณะที่ให้คำตอบสุดท้ายเดียวกัน ดังนั้นจำนวนอนุภาคที่ใช้ในการคำนวณนี้จึงเลือกใช้ 20 อนุภาค และรอบการคำนวณจะเลือกจากการลู่เข้าโดยที่จำนวนอนุภาค 20 อนุภาคเป็นการลู่เข้าที่แย่ที่สุดคือ ลู่เข้าประมาณรอบที่ 90 แต่เงื่อนไขการหยุดจะหยุดก็ต่อเมื่อค่าลู่เข้าที่ค่าเดียวกันเกิน 50 รอบ และเมื่อออกไปอีก 60 รอบ ดังนั้นจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดจึงเลือกเป็น 200 รอบ

เมื่อได้จำนวนรอบของการคำนวณและจำนวนอนุภาคที่ใช้ในการคำนวณแล้ว จากนั้นคงค่าจำนวนอนุภาค และรอบการคำนวณสูงสุดไว้คือ 20 อนุภาคและ 200 รอบ เพื่อหาค่าคงที่ความเร่ง (c_p, c_g) เลือกค่า c_p และ c_g มาอย่างละ 3 ค่าคือ 0.1, 1 และ 2 ซึ่งจะได้กรณีทดสอบทั้งหมด 6 กรณีดังตารางที่ 5.6 และได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 5.9

ตารางที่ 5.6 กรณีค่าคงที่ความเร่งของกรณีศึกษาที่ 2

กรณีที่	c_p	c_g
1	0.1	0.1
2	0.1	1
3	0.1	2
4	1	1
5	1	2
6	2	2



ภาพที่ 5.9 การลู่เข้าหาคำตอบเมื่อปรับค่าคงที่ความเร่งของกรณีศึกษาที่ 2

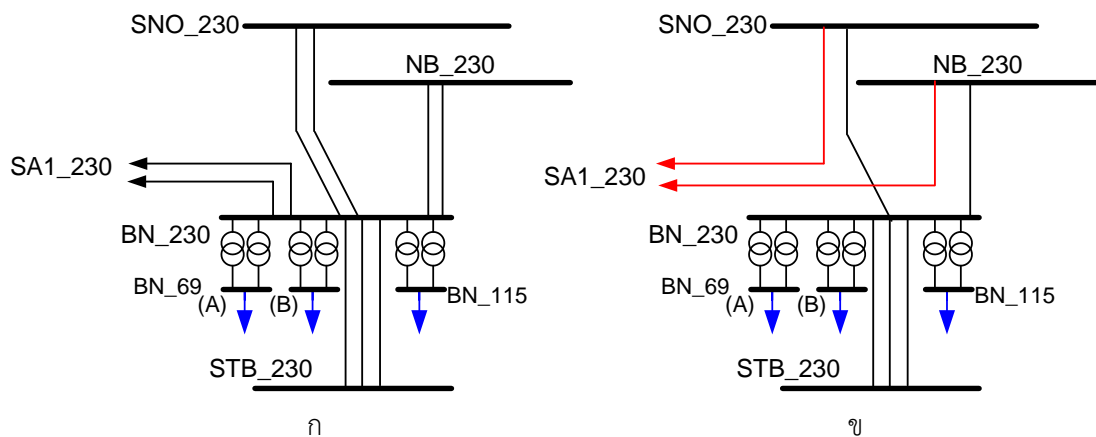
จะเห็นว่าที่ $c_p = 0.1, c_g = 1$ เป็นค่าที่มีการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นจะได้ว่าจำนวนอนุภาคที่เหมาะสมคือ 20 อนุภาค จำนวนรอบการคำนวณสูงสุดคือ 200 รอบ และค่าคงที่ความเร่ง $c_p = 0.1, c_g = 1$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาที่เหมาะสมแล้ว ทำการค้นหาตำแหน่ง และจำนวนบัสที่เหมาะสมของการเปลี่ยนเส้นทาง การเชื่อมต่อสายส่งพบว่า เมื่อพิจารณาจากค่า *gbest* ของทุกรอบการคำนวณ วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแบบวงกว้างได้ โดยเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งของบัสที่เป็นชุดคำตอบพบว่ามี 3 ชุดคำตอบที่เป็นคำตอบแบบวงแคบ แสดงในตารางที่ 5.7

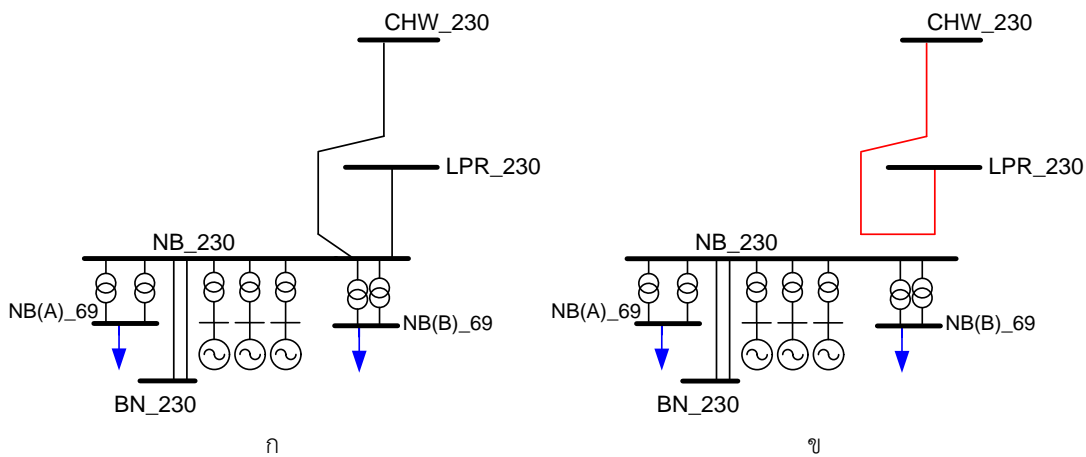
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

ชุดคำตอบ	ตำแหน่ง บัส	ตำแหน่ง บัส	ตำแหน่ง บัส	เงื่อนไขการทำงาน	PQVSI สูงสุด	เงื่อนไข N-1	คะแนนรวม ของระบบ
1	BPL_230	SB_230	TPR_230	ผ่าน	0.4881	ไม่ผ่าน	3,333.0237
2	NB_230	SB_230	TPR_230	ผ่าน	0.4393	ไม่ผ่าน	3,333.1213
3	NB_230	SB_230	BN_230	ผ่าน	0.3991	ไม่ผ่าน	3,333.2018

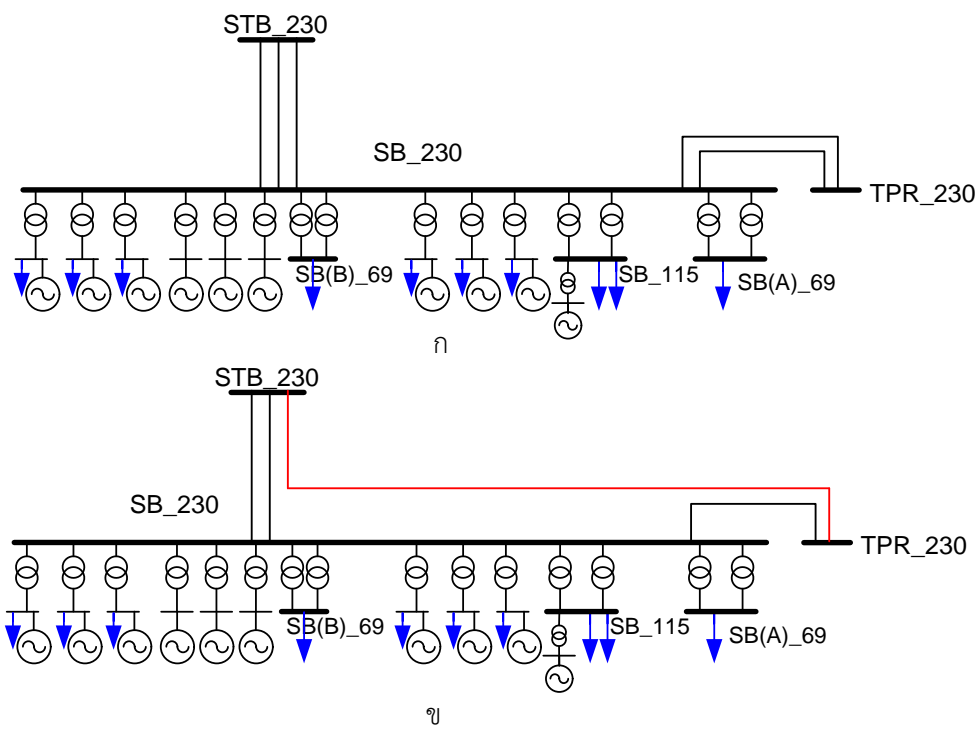
จากตารางจะเห็นได้ว่า คะแนนรวมของชุดคำตอบที่ 3 มีคะแนนสูงสุด โดยชุดคำตอบจะทำการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งจะทำให้บัสพระนครเหนือ บัสพระนครใต้ และบัสบางกอกน้อย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายจะแสดงดังภาพที่ 5.10 และภาพที่ 5.11 ส่วนเงื่อนไขการทำงานของระบบจะแสดงดังภาพที่ 5.13 ถึงภาพที่ 5.17 เทียบกับกรณีฐาน



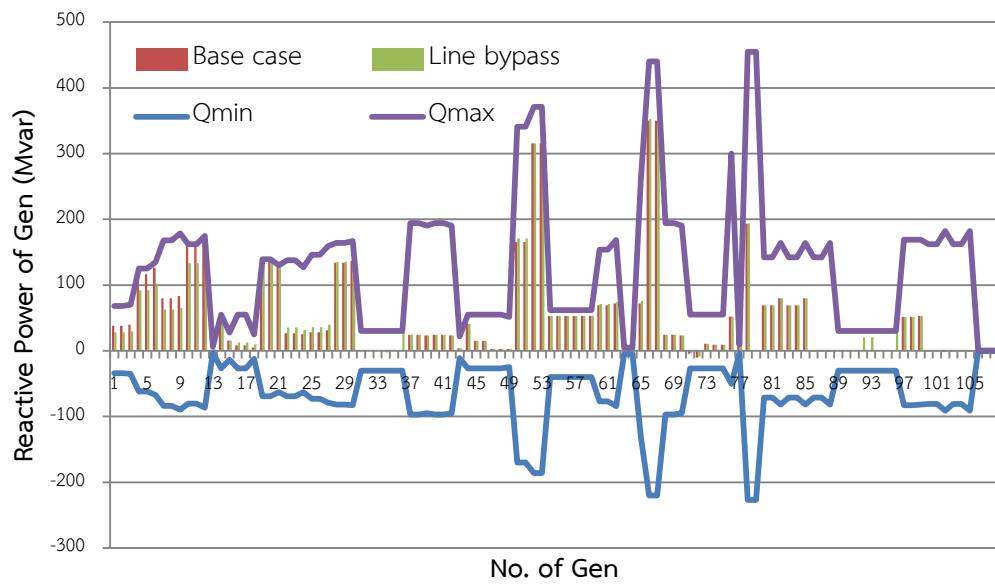
ภาพที่ 5.10 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งที่บัสบางกอกน้อย



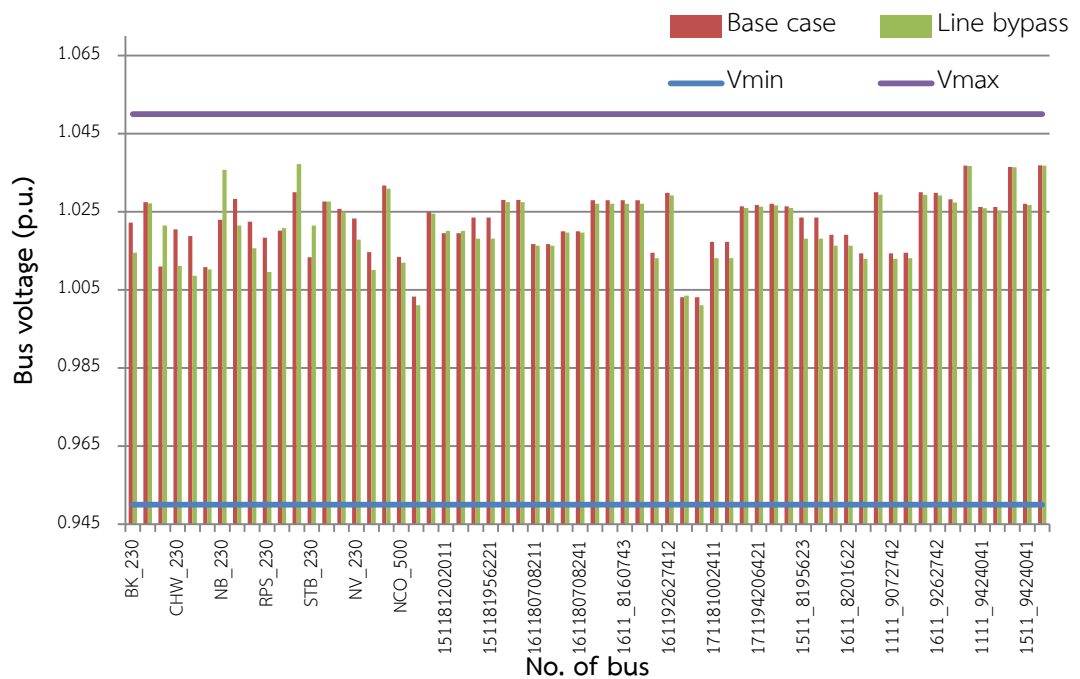
ภาพที่ 5.11 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งที่บัสพระนครเหนือ



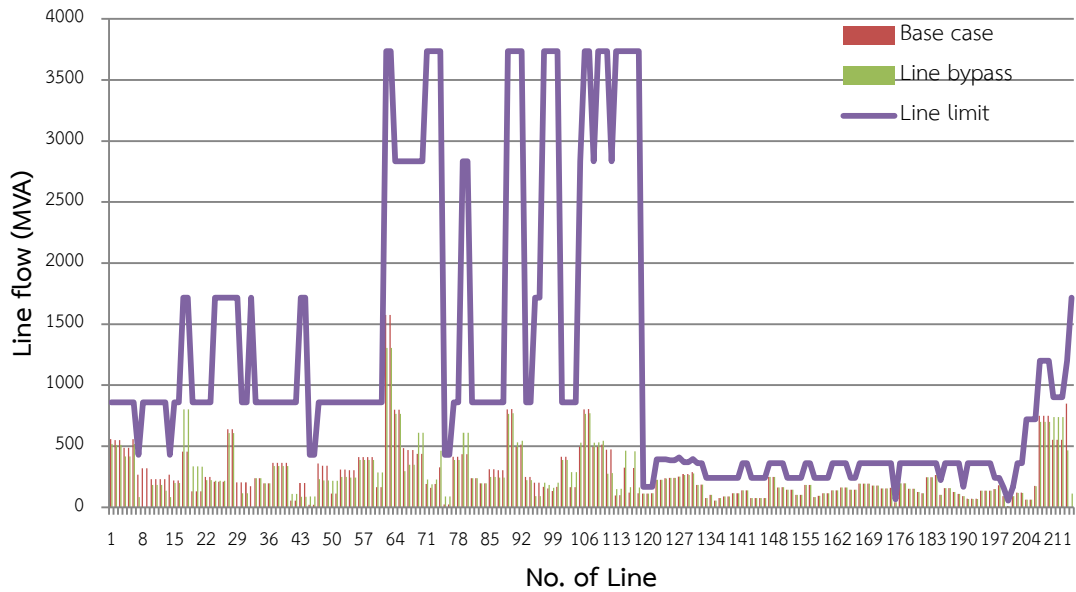
ภาพที่ 5.12 ก่อนและหลังการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งที่บัสพระนครใต้



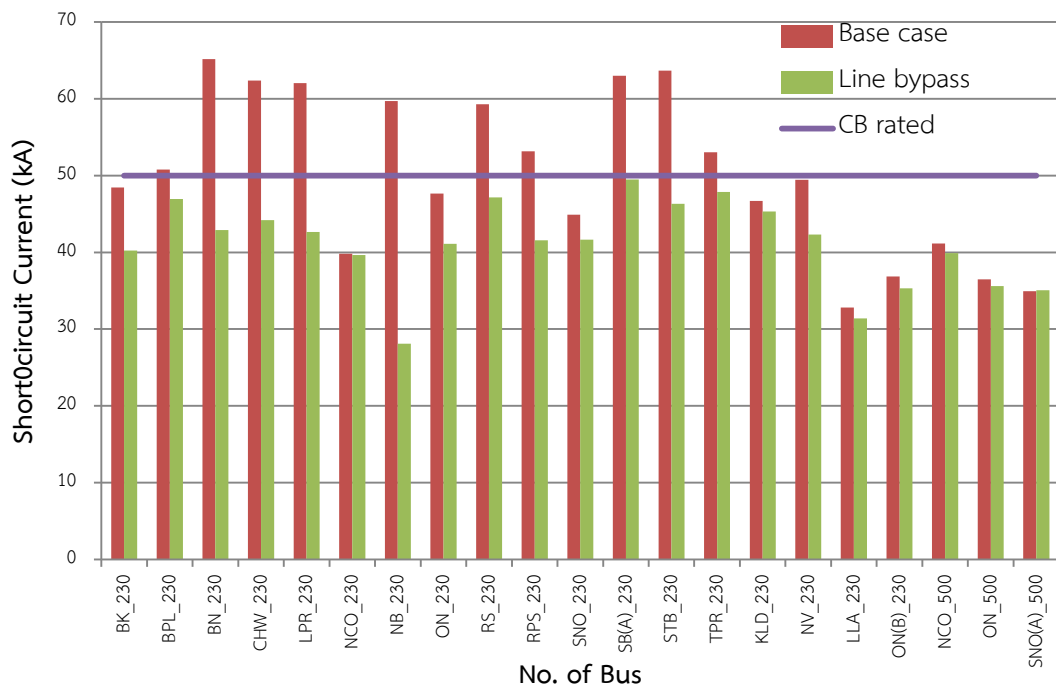
ภาพที่ 5.13 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล



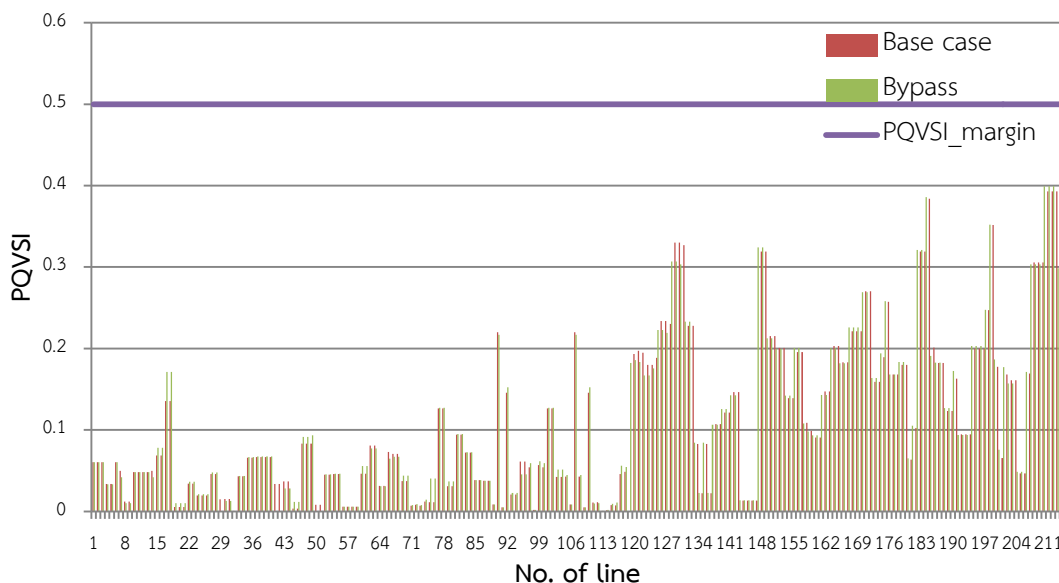
ภาพที่ 5.14 ขนาดแรงดันของบัสหลังเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล



ภาพที่ 5.15 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลงหลังเปลี่ยนเส้นทาง การเชื่อมต่อสายส่งในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล



ภาพที่ 5.16 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหลังเปลี่ยนเส้นทาง การเชื่อมต่อสายส่งในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล



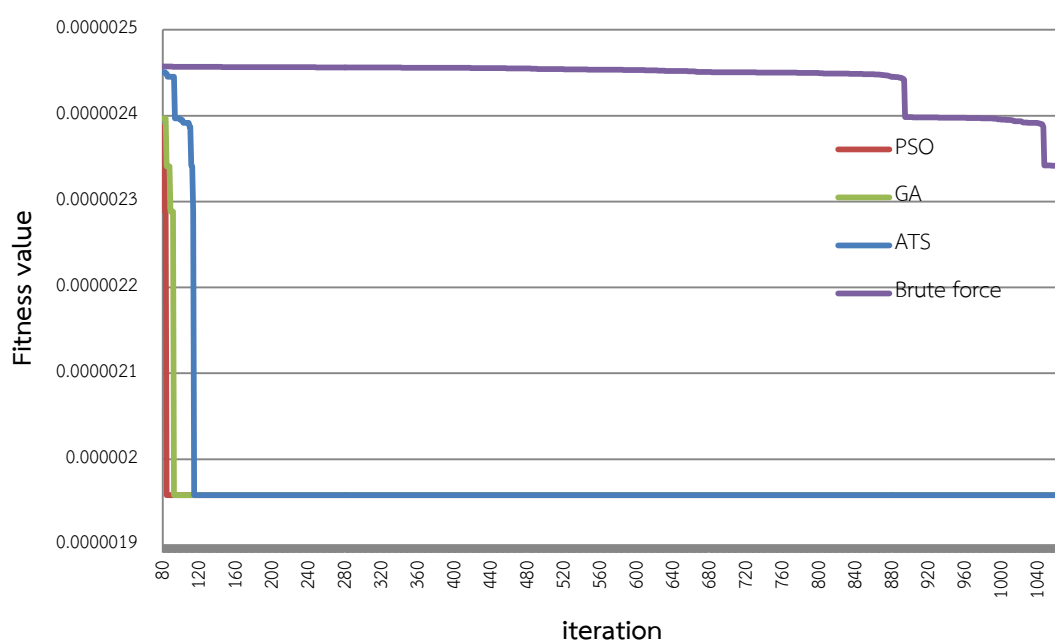
ภาพที่ 5.17 ค่า PQVSI ของสายส่งหลังเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล

ภายหลังระบบมีการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง การค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค สามารถหาตำแหน่งและจำนวนของบัสที่เปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งได้อย่างเหมาะสม ซึ่งส่งผลให้ขนาดของกระแสลัดวงจรลดลงอยู่ภายใต้พิกัดที่กำหนด มีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด 49.477 kA ที่บัสพระนครใต้ โดยระบบยังคงมีเสถียรภาพเชิงแรงดันอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่า PQVSI สูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.3991 แต่อย่างไรก็ดีระบบยังไม่สามารถผ่านการวิเคราะห์ N-1 ได้เนื่องจากภายหลังที่ระบบมีการเปลี่ยนการเชื่อมต่อสายส่งแล้ว จำนวนสายส่งของระบบจะลดลง ทำให้เมื่อวิเคราะห์ N-1 สายส่งที่ถูกเปลี่ยนการเชื่อมต่อขึ้นอาจทำให้ระบบอ่อนแอ หรือไม่สามารถส่งกำลังได้เต็มที่ และหากถูกปลดออกจากระบบ ทำให้สายส่งเส้นอื่นหรือบัสอื่นมีการทำงานที่เกินพิกัด ดังนั้นระบบหลังการเปลี่ยนแปลงจึงไม่สามารถผ่านการวิเคราะห์ N-1 ได้ จึงนิยมนำไปเป็นการแก้ปัญหาจำกัดกระแสลัดวงจรเพียงชั่วคราวเท่านั้น

เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้ไปเทียบกับวิธีการค้นหาเชิงพันธุกรรมที่ใช้ข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียวและการผ่าเหล่าแบบสมำเสมอ และวิธีการค้นหาแบบตาบุงชนิดปรับตัวได้พบว่า วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถหาคำตอบได้คุณภาพเดียวกันกับทั้งสองวิธี ดังนั้นวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคจึงถือเป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบ เช่นเดียวกับวิธีการค้นหาเชิงพันธุกรรมและวิธีการค้นหาแบบตาบุง แต่หากมาพิจารณาเรื่องการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้างแล้วจะเห็นได้ว่า การลู่เข้าหาคำตอบของวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคจะสามารถลู่เข้าหาคำตอบได้เร็วที่สุด นั้นหมายความว่า เวลาการคำนวณที่ใช้ก็น้อยลงตามไปด้วยดังแสดงในตารางที่ 5.8 และภาพที่ 5.18

ตารางที่ 5.8 แสดงเวลาการคำนวณที่ใช้ของแต่ละอัลกอริทึมในกรณีศึกษาที่ 2

อัลกอริทึม	จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด	จำนวนสมาชิก	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (ชั่วโมง)
PSO	200	20	49.779
GA	200	20	95.087
ATS	200	20	80.954
Brute force	-	-	118.419



ภาพที่ 5.18 แสดงการลู่เข้าหาคำตอบของทั้งสามอัลกอริทึมในกรณีศึกษาที่ 2

สำหรับการวางแผนระยะยาว เรื่องของเวลาที่ใช้ในการคำนวณนั้นอาจจะไม่มีนัยสำคัญมากเท่ากับคุณภาพคำตอบที่ได้ ดังนั้นหากพิจารณาเป็นการวางแผนระยะยาวแล้ว ทั้งสามอัลกอริทึมสามารถนำไปประยุกต์แก้ปัญหาได้หมด แต่หากต้องการความเร็วในการค้นหาคำตอบ สำหรับปัญหานี้วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคก็จะมีความเร็วของการค้นหาที่ดีกว่าวิธีการค้นหาเชิงพันธุกรรมและวิธีการค้นหาแบบตาบูนิดปรับตัวได้

อย่างไรก็ตาม เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคนั้นยังใช้เวลาค่อนข้างมากอยู่ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาให้เร็วยิ่งขึ้นโดยจะแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาหลัก และปัญหารอง ปัญหาหลักจะกำหนดให้ค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมที่สุดของบัสที่ทำการเปลี่ยนเส้นทาง การเชื่อมต่อสายส่ง และปัญหารองจะกำหนดให้หา

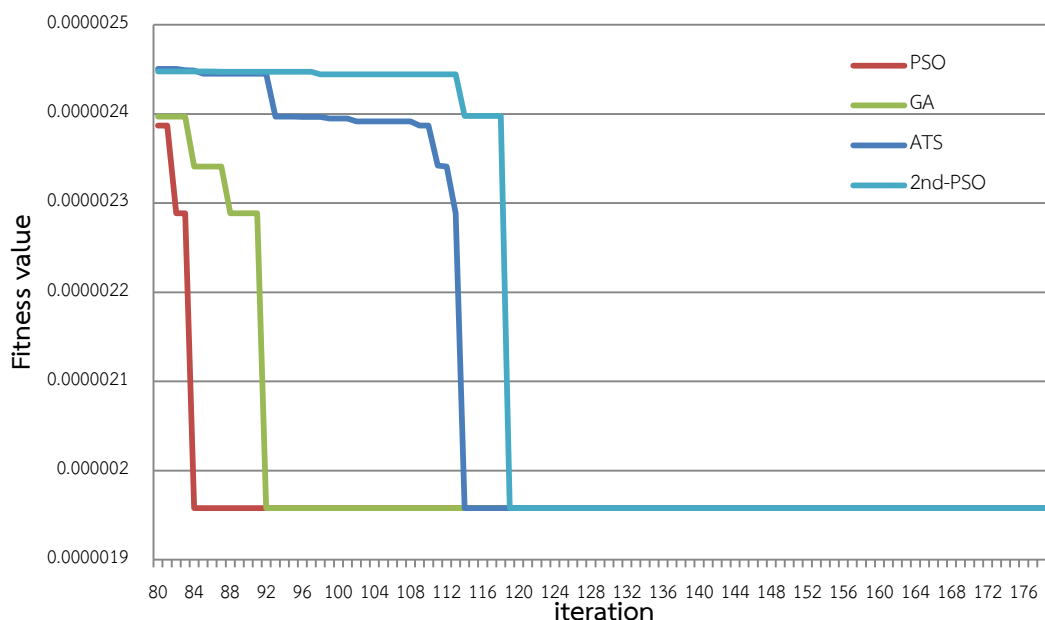
รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของการเปลี่ยนเส้นทางเชื่อมต่อสายส่ง การค้นหาที่ใช้แก้ปัญหาลักษณะนี้ จะเรียกว่า การค้นหาแบบ 2-stage PSO โดยตัวแปรที่ใช้จะกำหนดดังนี้

อนุภาคของปัญหาหลัก แทน ตำแหน่งและจำนวนของบัสที่เปลี่ยน
เส้นทางเชื่อมต่อสายส่ง
อนุภาคของปัญหารอง แทน รูปแบบของการเปลี่ยนเส้นทาง
เชื่อมต่อสายส่ง

ผลจากการค้นหาแบบ 2-stage PSO พบว่า คำตอบที่ได้ยังคงมีคุณภาพที่ดีที่สุดอยู่คือ เปลี่ยนเส้นทางเชื่อมต่อสายส่งที่บัสพระนครเหนือ บัสพระนครใต้ และบัสบางกอกน้อย โดยมี รูปแบบของการเปลี่ยนเส้นทางเชื่อมต่อสายส่งเป็นรูปแบบเดียวกันกับที่พิจารณาทุกรูปแบบที่เป็นไปได้ ในขณะที่ใช้เวลาการคำนวณลดลงดังตารางที่ 5.9 และภาพที่ 5.19 แสดงการลู่เข้าหาคำตอบของการค้นหาแบบ 2-stage PSO

ตารางที่ 5.9 ตารางเปรียบเทียบเวลาการค้นหารูปแบบปัญหากรณีศึกษาที่ 2

วิธีการค้นหาคำตอบ	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (ชั่วโมง)
1-stage PSO	49.779
2-stage PSO	16.922



ภาพที่ 5.19 แสดงการลู่เข้าหาคำตอบของ 2-stage PSO

การค้นหาแบบ 2-stage PSO ใช้เวลาในการคำนวณลดลงประมาณเกือบ 3 เท่าของการค้นหาแบบ 1-stage PSO เนื่องจากในบางบัสมีจำนวนสายส่งที่เชื่อมต่ออยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้รูปแบบของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งที่บัสนั้นเป็นไปได้หลายรูปแบบ ซึ่งบางครั้งหากพิจารณาทุกรูปแบบก็อาจจะทำให้สิ้นเปลืองเวลาการคำนวณ ดังนั้นเมื่อนำวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเข้ามาประยุกต์ต่อการหารูปแบบของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งแล้ว ก็อาจจะช่วยลดเวลาคำนวณลงได้ในขณะที่ยังคงคุณภาพของคำตอบที่ดีไว้

5.2.3 กรณีศึกษาที่ 3 การจำกัดกระแสลัดวงจรด้วยการแบ่งแยกบัสกับระบบส่งไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพฯ

กรณีศึกษาที่ 3 เป็นการจำกัดกระแสลัดวงจรด้วยวิธีการแบ่งแยกบัส โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการแบ่งแยกบัสที่เป็นแบบถาวรเท่านั้น และพิจารณารูปแบบของการแบ่งแยกบัสจากจำนวนของสายส่งที่เชื่อมต่ออยู่กับบัส รวมถึงการนำหม้อแปลงที่เชื่อมต่อกับบัสมาพิจารณาให้เปรียบเสมือนเป็นสายส่งที่เชื่อมต่ออยู่ด้วย และหากบัสที่ถูกแบ่งแยกมีโหลดเชื่อมต่ออยู่จะทำกาแบ่งโหลดตามอัตราส่วนของหม้อแปลงที่เชื่อมต่อกับโหลดที่บัสเก่าและบัสที่เกิดขึ้นใหม่

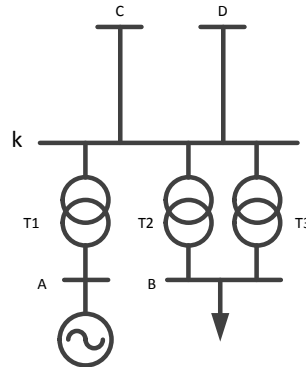
บัสที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยกบัสคือ บัสที่มีสายส่งเชื่อมต่ออย่างน้อย 2 เส้น สำหรับบัสที่มีสายส่งเชื่อมต่ออยู่เพียงอย่างเดียวจะสามารถคำนวณรูปแบบที่สามารถแบ่งแยกบัสได้ดังสมการที่ 5.26 และสำหรับบัสที่มีทั้งสายส่งและหม้อแปลงเชื่อมต่ออยู่จะสามารถคำนวณรูปแบบที่แบ่งแยกได้ดังสมการที่ 5.27 [31]

$$\text{Forms of Bus Splitting} = \text{Forms of Line} \times \text{Forms of Tr.} \quad 5.25$$

$$\text{Forms of Line} = \frac{\prod_{i=1}^j (l_i + 1) - 2}{2} \quad 5.26$$

$$\text{Forms of Tr.} = \prod_{n=1}^m (tr_n + 1) \quad 5.27$$

ตัวอย่าง การแบ่งแยกบัสที่บัส k [31]



ภาพที่ 5.20 การแบ่งแยกบัสที่บัส k

เมื่อพิจารณาการแบ่งแยกบัสที่บัส k ดังภาพที่ 5.20 พบว่า มีบัสที่เชื่อมต่อกับบัส k จำนวน 4 บัส เป็นบัสที่เชื่อมต่อด้วยสายส่งจำนวน 2 บัส ($j=2$) มีสายส่งเชื่อมต่ออยู่ 2 เส้น และมีบัสที่เชื่อมต่อด้วยหม้อแปลงอยู่จำนวน 2 บัส ($m=2$) มีหม้อแปลงเชื่อมต่ออยู่ 3 ตัว ภาพที่ 5.21 แสดงรูปแบบของการแบ่งแยกบัส โดยจะสามารถคำนวณรูปแบบของการแบ่งแยกบัสได้ ดังนี้

1. คำนวณรูปแบบของสายส่ง

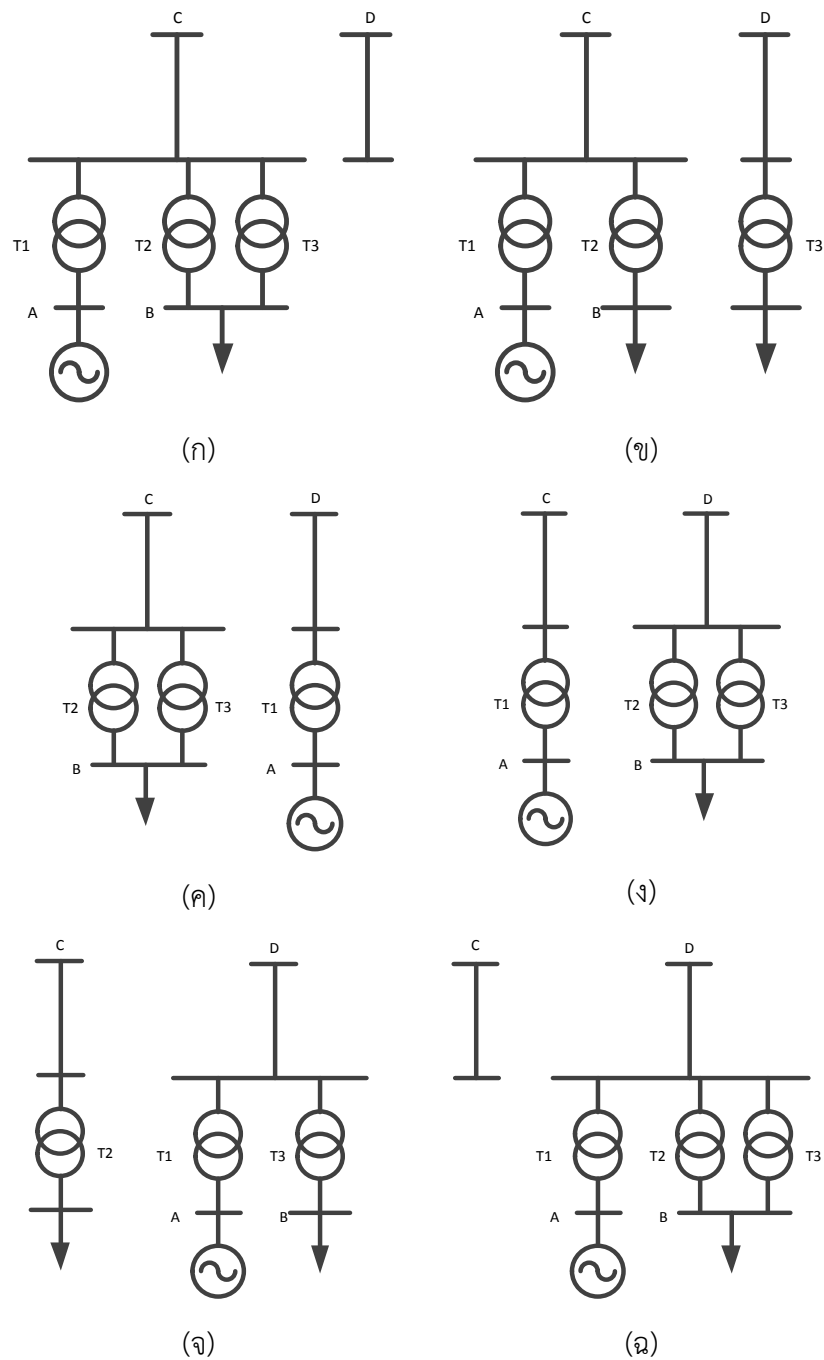
$$\begin{aligned} \text{Forms of Line} &= \frac{(l_C + 1)(l_D + 1) - 2}{2} \\ &= \frac{(1+1)(1+1) - 2}{2} = 1 \text{ รูปแบบ} \end{aligned}$$

2. คำนวณรูปแบบของสายส่งหม้อแปลง

$$\begin{aligned} \text{Forms of Tr.} &= (tr_A + 1)(tr_B + 1) \\ &= (1+1)(2+1) = 2 \times 3 = 6 \text{ รูปแบบ} \end{aligned}$$

3. คำนวณรูปแบบการแบ่งแยกบัส

$$\begin{aligned} \text{Forms of Bus Splitting} &= 1 \times 6 \\ &= 6 \text{ รูปแบบ} \end{aligned}$$



ภาพที่ 5.21 รูปแบบการแบ่งแยกบัสของตัวอย่าง

จากการคำนวณรูปแบบที่เป็นไปได้ของการแบ่งแยกบัสนั้น สำหรับกรณีศึกษาที่ต้องแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาคือ ต้องการหาตำแหน่ง และจำนวนที่เหมาะสมของการแบ่งแยกบัส และปัญหารองคือ ต้องการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของการแบ่งแยกบัส จึงถือเป็นปัญหารูปแบบที่ 2 เนื่องจากรูปแบบของบัสที่แบ่งแยกมีจำนวนมากเกินไป ซึ่งการพิจารณาทุกรูปแบบของการแบ่งแยกบัสอาจจะเป็นไปได้ จึงจำเป็นต้องแบ่งออกเป็นปัญหาคือหลักและปัญหารองตามที่ได้กล่าวไป ส่วน

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้งปัญหาหลักและปัญหารองจะเหมือนกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งดังสมการที่ 5.28

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$\text{Maximize System_score} \quad 5.28$$

$$\text{System score} = \text{Network score} + \text{PQVSI score} + \text{N-I score} \quad 5.29$$

โดยที่ *Network score* เป็นคะแนนที่มาจากจำนวนบัสที่ทำการแบ่งแยก ส่วนเงื่อนไขบังคับที่พิจารณาจะเหมือนกับกรณีศึกษาที่ 2 ยกเว้นเงื่อนไขเฉพาะ จะเปลี่ยนจากเงื่อนไขการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งไปเป็นเงื่อนไขของการแบ่งแยกบัส ดังต่อไปนี้

เงื่อนไขของการแบ่งแยกบัส

1. พิจารณาการแบ่งแยกบัสแบบถาวรเท่านั้น
2. บัสที่ถูกแบ่งแยกจะสามารถแบ่งแยกได้เพียง 1 จุดเท่านั้น
3. บัสที่นำมาพิจารณาการแบ่งแยกบัส ต้องมีสายส่งเชื่อมต่ออย่างน้อย 2 เส้น
4. บัสเก่าและบัสที่เกิดขึ้นใหม่ จะต้องมีสายส่งเชื่อมต่ออย่างน้อย 1 เส้น
5. การแบ่งโหลด เมื่อบัสโหลดถูกแบ่งแยก จะแบ่งโหลดตามอัตราส่วนของหม้อแปลงที่ต่อกับบัสเก่าและบัสใหม่ ตามสมการที่ 5.30 และ 5.31

$$\text{Load}_{at_oldbus} = \frac{\text{Tr}_{at_oldbus}}{\text{Tr}_{before}} \quad 5.30$$

$$\text{Load}_{at_newbus} = \frac{\text{Tr}_{at_newbus}}{\text{Tr}_{before}} \quad 5.31$$

เมื่อนำวิธีค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคมาช่วยแก้ปัญหาแล้วนั้น จะทำการกำหนดตัวแปรที่ใช้สำหรับการค้นหาเป็นดังนี้

อนุภาคของปัญหาหลัก แทน ตำแหน่งและจำนวนของบัสที่แบ่งแยก

อนุภาคของปัญหารอง แทน รูปแบบของการแบ่งแยกบัส

โดยแต่ละอนุภาค จะกำหนดให้แบ่งแยกบัสได้สูงสุดเพียง 3 บัสเท่านั้น และก่อนทำการค้นหาคำตอบของการแบ่งแยกบัส จะทำการทดสอบอัลกอริทึมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมในการประยุกต์กับรูปแบบปัญหานี้ และเพื่อหาจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด จำนวนอนุภาคที่ใช้ในการคำนวณที่เหมาะสมเช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 2 จะได้ว่า สำหรับปัญหาหลักใช้จำนวนรอบการคำนวณสูงสุดคือ 300 รอบ จำนวนอนุภาคที่ใช้ค้นหาคือ 20 อนุภาค และค่า c_p และ c_g ที่เหมาะสมคือ 1

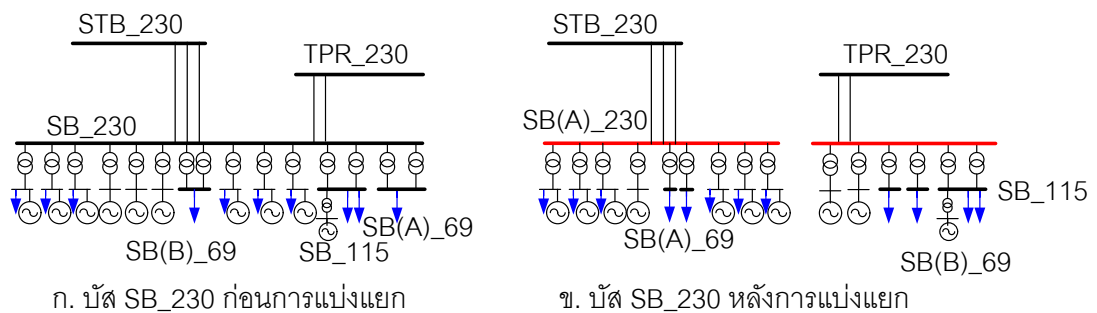
และ 2 ตามลำดับ ส่วนปัญหาการใช้จำนวนรอบการคำนวณสูงสุดคือ 200 รอบ จำนวนอนุภาคที่ใช้ค้นหาคือ 100 อนุภาค และค่า c_p และ c_g ที่เหมาะสมคือ 1 และ 2 ตามลำดับ

ภายหลังการทดสอบ เมื่อพิจารณาจาก *gbest* ของทุกรอบการคำนวณ พบว่าวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแบบวงกว้างได้ โดยหากพิจารณาจากชุดคำตอบพบว่ามี 3 ชุดคำตอบที่เป็นคำตอบแบบวงแคบ ดังแสดงในตารางที่ 5.10

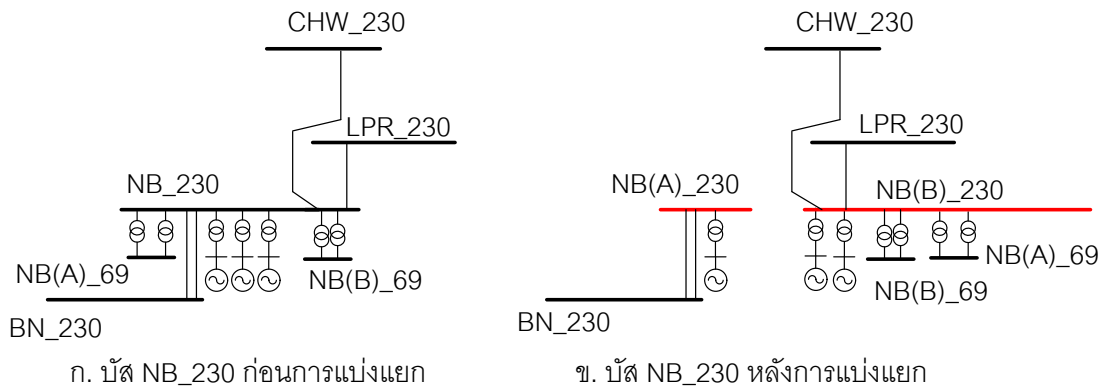
ตารางที่ 5.10 แสดงรายละเอียดของคำตอบของการแบ่งแยกบัส

ชุดคำตอบ	ตำแหน่งบัส	ตำแหน่งบัส	ตำแหน่งบัส	เงื่อนไขการทำงาน	PQVSI สูงสุด	เงื่อนไข N-1	คะแนนรวมของระบบ
1	LPR_230	NB_230	SB_230	ผ่าน	0.4239	ผ่าน	103,333.1522
2	-	BPL_230	NB_230	ผ่าน	0.4144	ผ่าน	105,000.1712
3	-	NB_230	SB_230	ผ่าน	0.4071	ผ่าน	105,000.1859

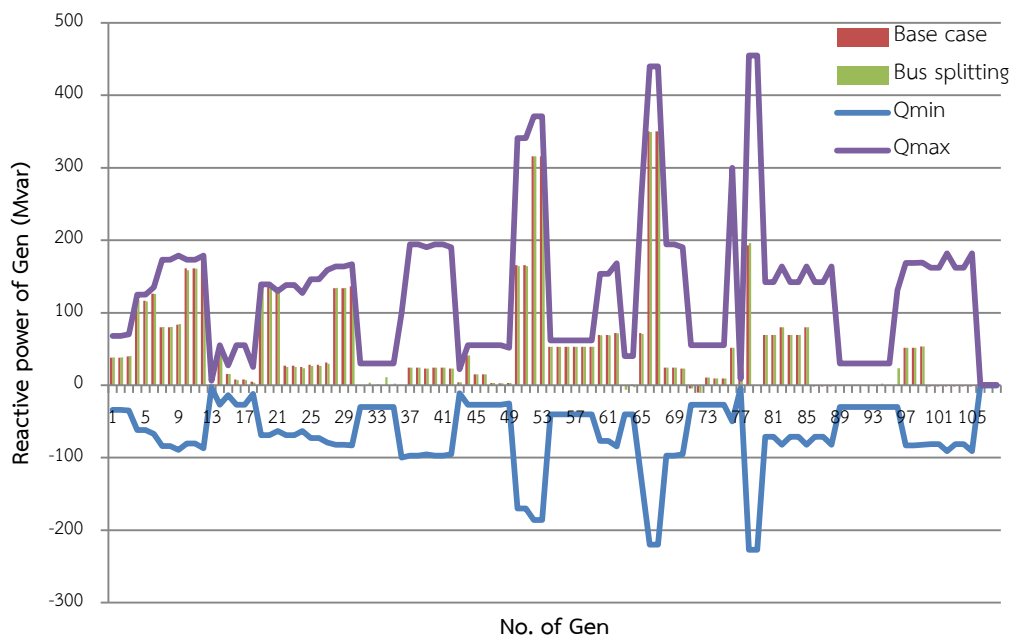
จากตารางจะเห็นได้ว่า คะแนนรวมของชุดคำตอบที่ 5 มีคะแนนมากที่สุด โดยชุดคำตอบจะทำการแบ่งแยกบัสที่บัสพระนครเหนือ และบัสพระนครใต้ ภาพที่ 5.22 และภาพที่ 5.23 ภายแสดงก่อนและหลังการแบ่งแยกบัสพระนครใต้และเหนือ ตามลำดับ และจะแสดงผลการทำงานของระบบดังภาพที่ 5.24 ถึงภาพที่ 5.28 เทียบกับกรณีฐาน



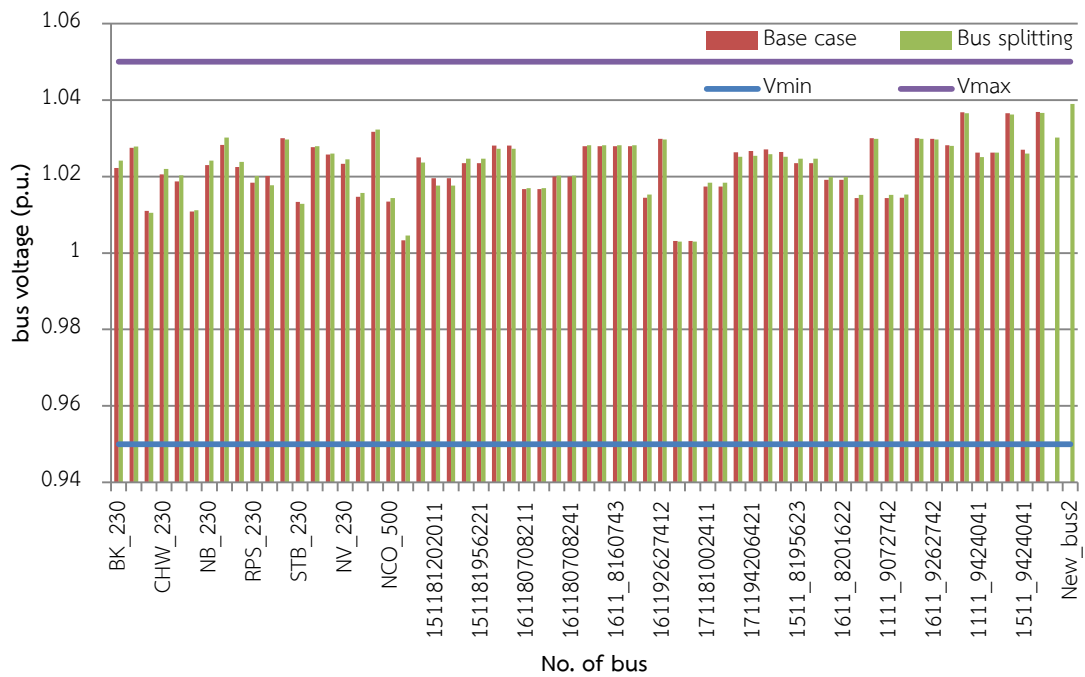
ภาพที่ 5.22 ก่อนและหลังการแบ่งแยกบัสพระนครใต้



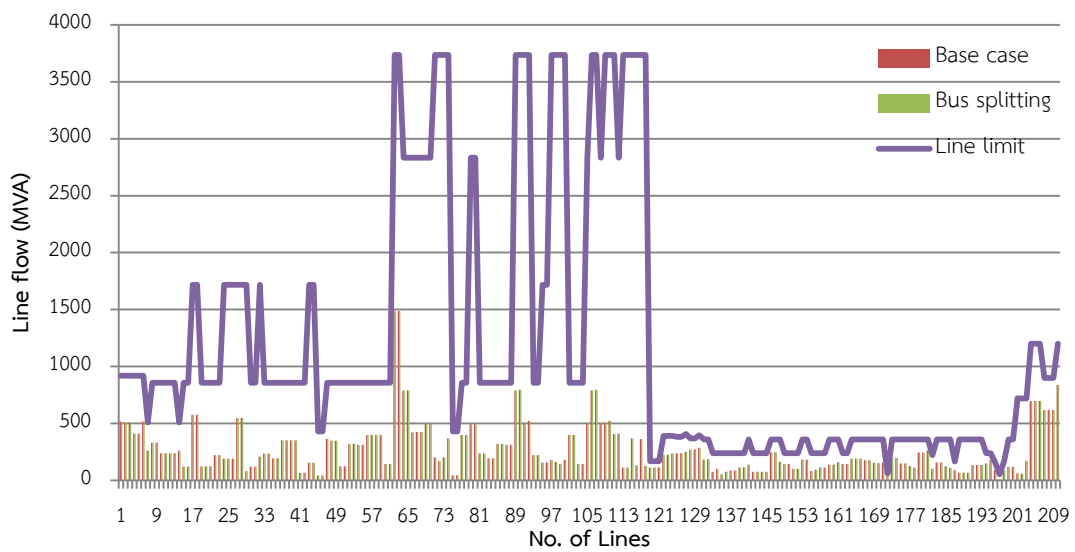
ภาพที่ 5.23 ก่อนและหลังการแบ่งแยกบัสพระนครเหนือ



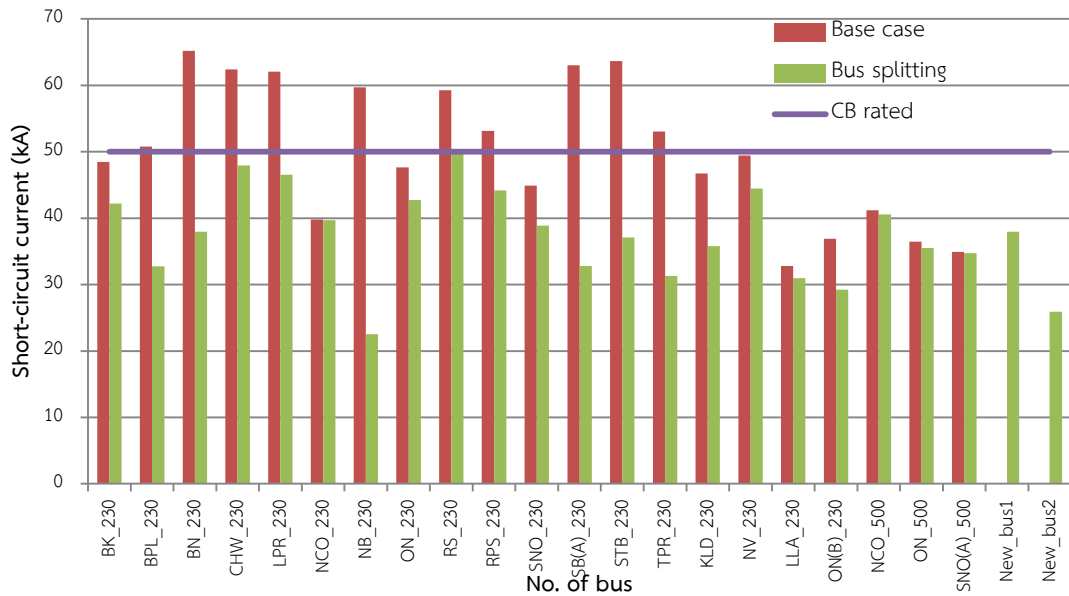
ภาพที่ 5.24 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล



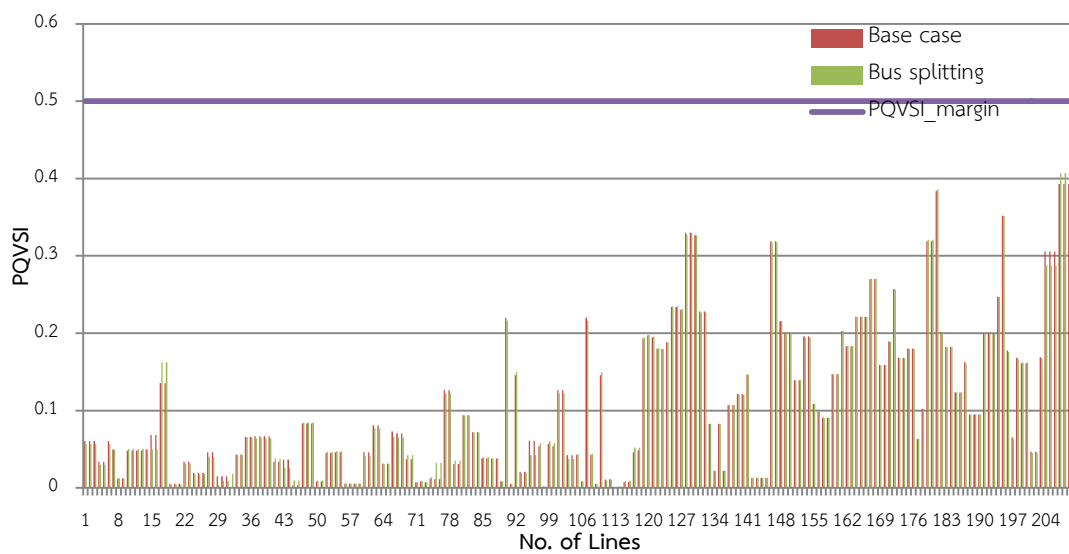
ภาพที่ 5.25 ขนาดแรงดันของบัสหลังแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล



ภาพที่ 5.26 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลงหลังแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล



ภาพที่ 5.27 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหลังแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล



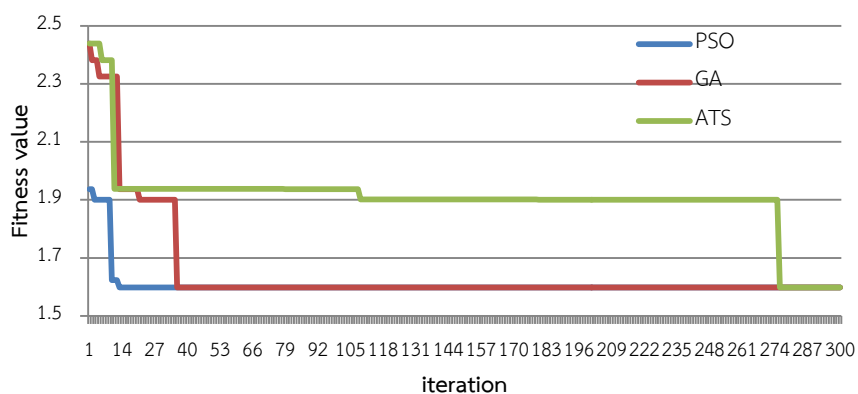
ภาพที่ 5.28 ค่า PQVSI ของสายส่งหลังแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล

จะเห็นว่าภายหลังระบบทำการแบ่งแยกบัส การค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถหาตำแหน่งและจำนวนของบัสที่แบ่งแยกได้อย่างเหมาะสมได้ ซึ่งส่งผลให้ขนาดของกระแสลัดวงจรลดลงอยู่ภายใต้พิกัดที่กำหนด มีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด 49.905 kA ที่บัสสร้างสิต ในขณะที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพเชิงแรงดันอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่า PQVSI สูงสุดมีค่า 0.4071 และระบบยังผ่านการวิเคราะห์เงื่อนไข N-1 ได้อีกด้วย นั่นหมายความว่าระบบสามารถคงการทำงานได้ หากมีสายส่งหลุดออกจากระบบ 1 เส้น

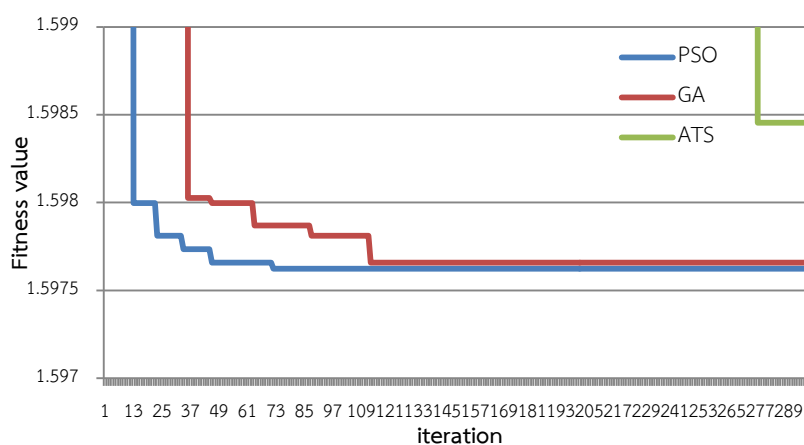
เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้ไปเทียบกับวิธีการค้นหาเชิงพันธุกรรมและวิธีการค้นหาแบบตาบอดชนิดปรับพบว่า วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถหาคำตอบได้คุณภาพดีกว่า อีกทั้งยังใช้เวลาคำนวณน้อยกว่า ค่าคะแนนรวมของระบบที่แต่ละอัลกอริทึมค้นหามาเป็นคำตอบและเวลาการที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตารางที่ 5.11 และภาพที่ 5.29 (ก) และ (ข)

ตารางที่ 5.11 แสดงเวลาการคำนวณที่ใช้ของแต่ละอัลกอริทึมในกรณีศึกษาที่ 3

อัลกอริทึม	จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด	จำนวนสมาชิก	ค่าคะแนนรวมของระบบ	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (ชั่วโมง)
2-stage PSO	200	20	105,000.1858	65.174
2-stage GA	200	20	105,000.1831	75.334
2-stage ATS	200	20	105,000.1208	70.639



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5.29 แสดงการลู่เข้าหาคำตอบของทั้งสามอัลกอริทึม

สำหรับการวางแผนระยะยาว เรื่องของเวลาที่ใช้ในการคำนวณนั้นอาจจะไม่มีความสำคัญมากเท่ากับคุณภาพคำตอบที่ได้ ดังนั้นหากพิจารณาเป็นการวางแผนระยะยาวแล้ว วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์แก้ปัญหา และยังถ้าหากต้องการความเร็วในการค้นหาคำตอบด้วยแล้ว สำหรับปัญหานี้วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคก็ยังมีเหมาะสมมากขึ้นสำหรับการแก้ปัญหา

5.2.4 กรณีศึกษาที่ 4 การจำกัดกระแสลัดวงจรด้วยการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสกับระบบส่งไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพฯ

กรณีศึกษาที่ 4 จะนำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสเข้ามาประยุกต์ร่วมกับการแบ่งแยกบัสเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรเหมือนกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งรูปแบบของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสจะมีรูปแบบปัญหาคล้ายกับวิธีการแบ่งแยกบัสที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่จะมีการพิจารณาตัวรีแอกเตอร์จำกัดกระแสเพิ่มขึ้นมา โดยจะพิจารณาเฉพาะการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสระหว่างบัสที่ถูกแบ่งแยกเท่านั้น เนื่องจากรีแอกเตอร์จำกัดกระแสมีหลายขนาดขึ้นอยู่กับผู้ผลิต โดยมีการผลิตรีแอกเตอร์ออกมาสำหรับการใช้งานที่ระดับแรงดันที่แตกต่างกัน ดังนั้นจำนวนที่ติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงขึ้นกับจำนวนของบัสที่แบ่งแยก และระดับแรงดันของบัสที่ทำการติดตั้งเข้าไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบให้ผู้ใช้งานเป็นผู้กำหนดหรือเลือกคุณสมบัติของรีแอกเตอร์จำกัดกระแสก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการค้นหาคำตอบ และหากมีรีแอกเตอร์จำกัดกระแสหลายตัวจะพิจารณาให้การติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสที่มีขนาดน้อยที่สุดเป็นคำตอบที่มีคุณภาพที่ดีกว่า เพื่อลดจำนวนเงินลงทุนสำหรับการซื้อรีแอกเตอร์จำกัดกระแสมาติดตั้งซึ่งแปรผันตามขนาดของรีแอกเตอร์จำกัดกระแส ภายหลังจากทราบตำแหน่งบัสที่แบ่งแยกแล้วจะทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสที่ละตัวระหว่างบัสที่แบ่งแยก โดยเรียงจากรีแอกเตอร์จำกัดกระแสขนาดเล็กที่สุดไปใหญ่ที่สุดจนครบทุกตัว และพิจารณาให้คำตอบที่ผ่านเงื่อนไขบังคับทั้งหมดที่มีค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแสขนาดเล็กที่สุดเป็นคำตอบที่ดีที่สุด

กรณีศึกษานี้ต้องแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาหลักและปัญหารองเช่นเดียวกันกับกรณีศึกษาที่ 3 โดยปัญหาหลักคือ หาดำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัส และปัญหารองคือ หารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัส จึงจัดเป็นปัญหาแบบที่ 2 เช่นเดียวกัน ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้งปัญหาหลักและปัญหารองคือหาคะแนนรวมของระบบให้มากที่สุดเหมือนกรณีศึกษาที่ 2 และ 3 สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์แสดงได้ดังสมการที่ 5.32

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหา

$$\text{Maximize System_score} \quad 5.32$$

$$\text{System score} = \text{Network score} + \text{PQVSI score} + \text{N-I score} + \text{CLR score} \quad 5.33$$

โดยที่ *Network score* เป็นคะแนนที่มาจากจำนวนบัสที่ทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัส และมีการเพิ่มคะแนนในส่วนของคุณค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแสเข้ามา ด้วย ค่าคะแนนของรีแอกเตอร์จำกัดกระแสจะมีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 1,000 คะแนน และสามารถคำนวณคะแนนของคุณค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแสได้ดังสมการที่ 5.34

$$\text{CLR score} = \text{int} \left[10 \times \left(\frac{1}{\text{total CLR size}} \right) \right] \quad 5.34$$

ส่วนเงื่อนไขบังคับที่พิจารณาสำหรับการแบ่งแยกบัสจะเหมือนกับกรณีศึกษาที่ 3 และพิจารณาเงื่อนไขการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสเพิ่มขึ้นมา ดังต่อไปนี้

1. พิจารณารูปแบบการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสแบบเชื่อมโยงระหว่างบัสเท่านั้น
2. บัสที่จะติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสต้องมาจากกระบวนการแบ่งแยกบัสที่พิจารณาเงื่อนไขของการแบ่งแยกบัสด้วย
3. บัสที่ถูกติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแส จะสามารถติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสได้เพียง 1 ตัวเท่านั้น
4. ขนาดของรีแอกเตอร์จำกัดกระแสที่จะนำมาติดตั้ง ควรมีขนาดอยู่ในช่วง 0.001 pu. ถึง 0.1 pu. [4,31] ขนาดของรีแอกเตอร์จำกัดกระแสจะถูกกำหนดโดยผู้ใช้งานที่เลือกขนาดของรีแอกเตอร์จำกัดกระแสมาจากขนาดที่มีการผลิตอยู่จริงเท่านั้น
5. พิกัดแรงดันของรีแอกเตอร์จะต้องมีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับพิกัดแรงดันของบัสที่พิจารณา

เมื่อนำวิธีค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคมาช่วยค้นหาตำแหน่ง และจำนวนที่เหมาะสมของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสแล้วนั้น จะทำการกำหนดตัวแปรที่ใช้สำหรับการค้นหาเป็นดังนี้

อนุภาคของปัญหาหลัก แทน ตำแหน่งและจำนวนของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัส

อนุภาคของปัญหา รอง แทน รูปแบบของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัส

โดยแต่ละอนุภาคจะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงได้สูงสุดเพียง 3 บัสเท่านั้น และก่อนทำการค้นหาคำตอบของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัส จะทำการทดสอบ

อัลกอริทึมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมในการประยุกต์กับรูปแบบปัญหานี้ และเพื่อหาจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด สำหรับปัญหาหลักใช้จำนวนรอบการคำนวณสูงสุดคือ 200 รอบ จำนวนอนุภาคที่ใช้ค้นหาคือ 20 อนุภาค และค่า c_p และ c_g ที่เหมาะสมคือ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนปัญหารองใช้จำนวนรอบการคำนวณสูงสุดคือ 200 รอบ จำนวนอนุภาคที่ใช้ค้นหาคือ 200 อนุภาค และค่า c_p และ c_g ที่เหมาะสมคือ 1 เท่ากัน

การทดสอบในกรณีศึกษาที่ 4 นี้จะแบ่งออกเป็น 3 กรณีย่อยดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแส 2 ค่าเท่านั้น [31] คือ 0.0143 p.u. ที่ระดับแรงดัน 345 kV และ 0.0067 p.u. ที่ระดับแรงดัน 550 kV และไม่อนุญาตให้มีการแบ่งแยกบัสถาวร

กรณีที่ 2 พิจารณาค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแส 2 ค่าดังกรณีที่ 1 [31] แต่อนุญาตให้มีการแบ่งแยกบัสถาวรได้

กรณีที่ 3 พิจารณาค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแส 6 ค่า [31] และไม่อนุญาตให้มีการแบ่งแยกบัสถาวร

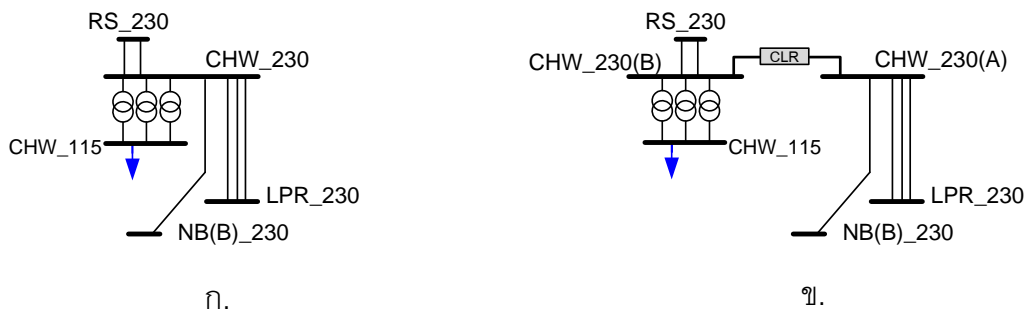
5.2.4.1 กรณีที่ 1 พิจารณาค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแส 2 ค่า และไม่อนุญาตให้มีการแบ่งแยกบัสถาวร

จากการค้นหาตำแหน่ง และจำนวนที่เหมาะสมของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสนั้น เมื่อพิจารณาจากค่า g_{best} ของทุกรอบการคำนวณ พบว่าวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแบบวงกว้างได้ โดยเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งของบัสที่เป็นชุดคำตอบพบว่ามี 5 ชุดคำตอบที่เป็นคำตอบแบบวงแคบ ดังแสดงในตารางที่ 5.12

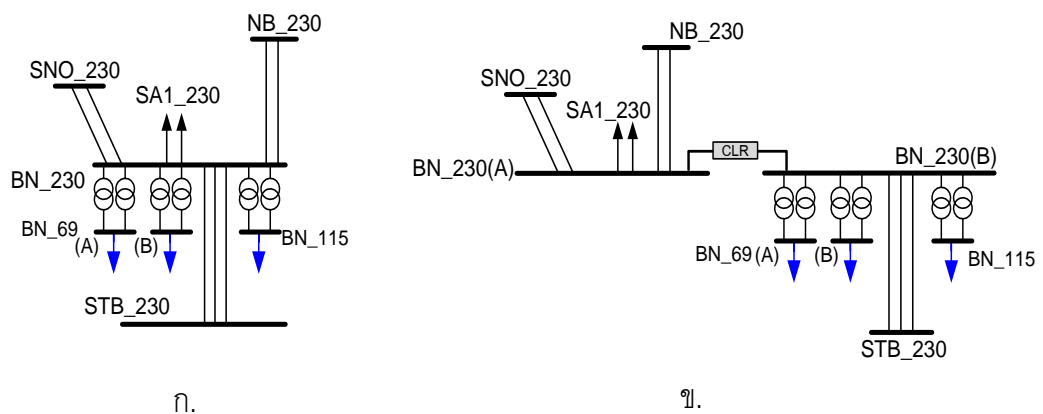
ตารางที่ 5.12 แสดงรายละเอียดของคำตอบของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสกรณีที่ 1

ชุดคำตอบ	ตำแหน่งบัส	ตำแหน่งบัส	ตำแหน่งบัส	PQVSI สูงสุด	เงื่อนไข N-1	ขนาดรวมของ CLR	คะแนนรวมของระบบ
1	NB_230	SB_230	CHW_230	0.4724	ไม่ผ่าน	0.0429	3,566.055105
2	BN_230	CHW_230	BPL_230	0.4634	ไม่ผ่าน		3,566.072145
3	SB_230	BN_230	CHW_230	0.4524	ไม่ผ่าน		3,566.095325
4	-	NB_230	STB_230	0.4966	ไม่ผ่าน		5,233.00679
5	-	BN_230	CHW_230	0.3867	ไม่ผ่าน		5,233.61330

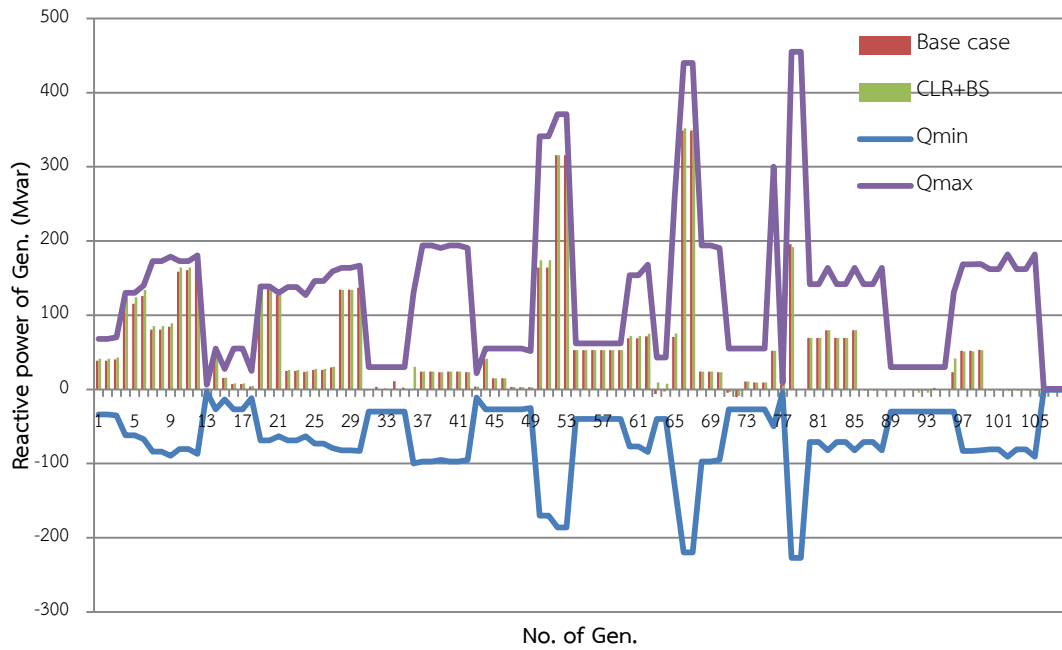
จากตารางจะเห็นได้ว่า คะแนนรวมของชุดคำตอบที่ 7 มีคะแนนมากที่สุด โดยชุดคำตอบจะทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสที่บัสบางกอกน้อย และบัสแจ้งวัฒนะ ซึ่งภาพที่ 5.30 และภาพที่ 5.31 แสดงส่วนของระบบก่อนและหลังที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงข่าย และสามารถแสดงผลเงื่อนไขบังคับตามภาพที่ 5.32 ถึงภาพที่ 5.36 เทียบกับกรณีฐาน



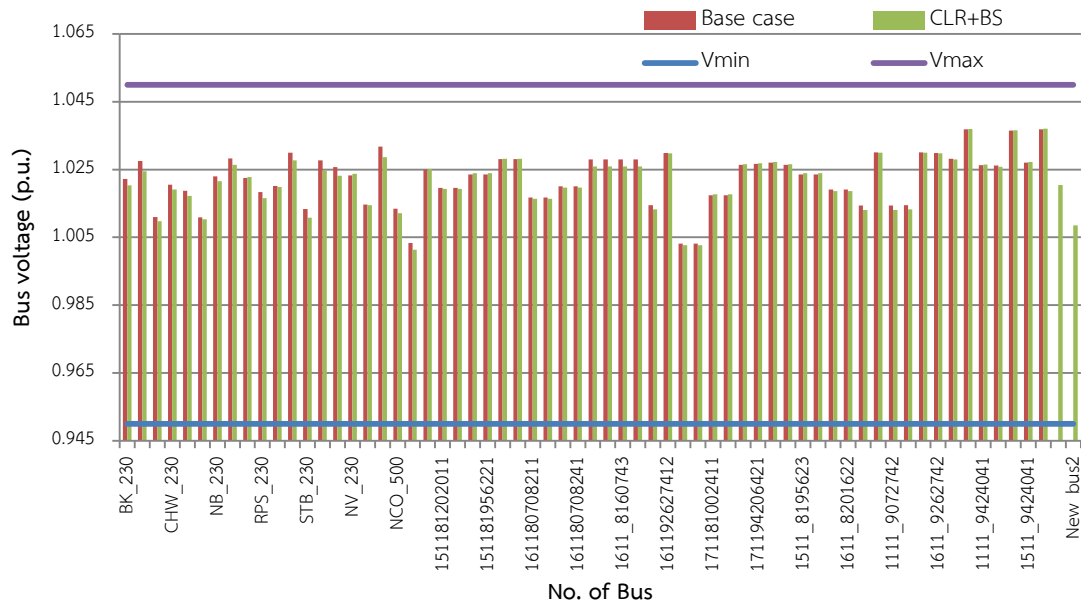
ภาพที่ 5.30 ก่อนและหลังทำการติดตั้ง CLR ร่วมกับการแบ่งแยกบัสที่บัสแจ้งวัฒนะ



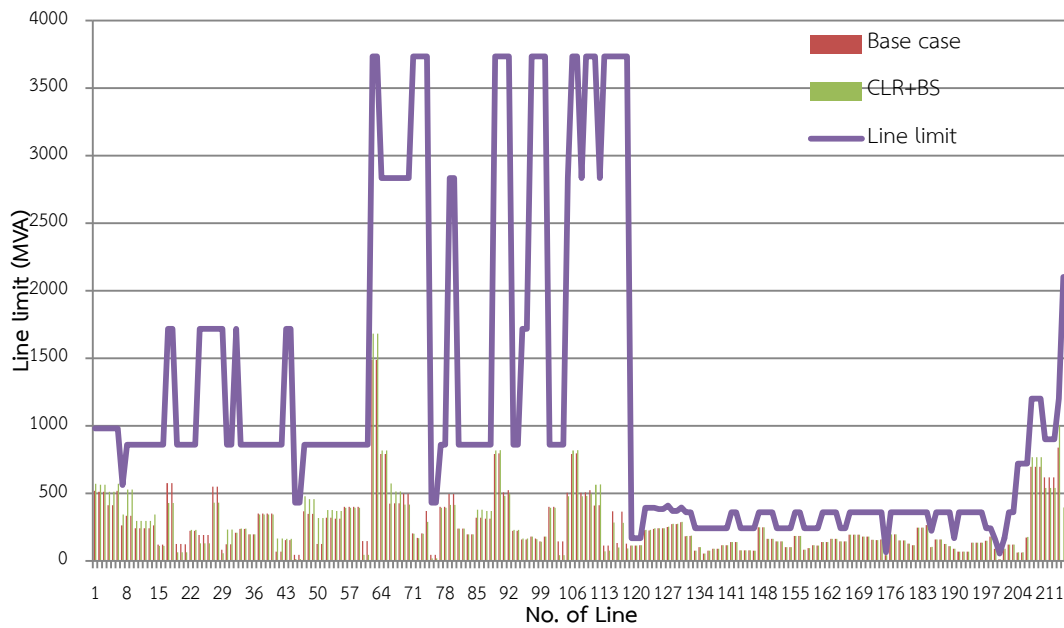
ภาพที่ 5.31 ก่อนและหลังทำการติดตั้ง CLR ร่วมกับการแบ่งแยกบัสที่บัสบางกอกน้อย



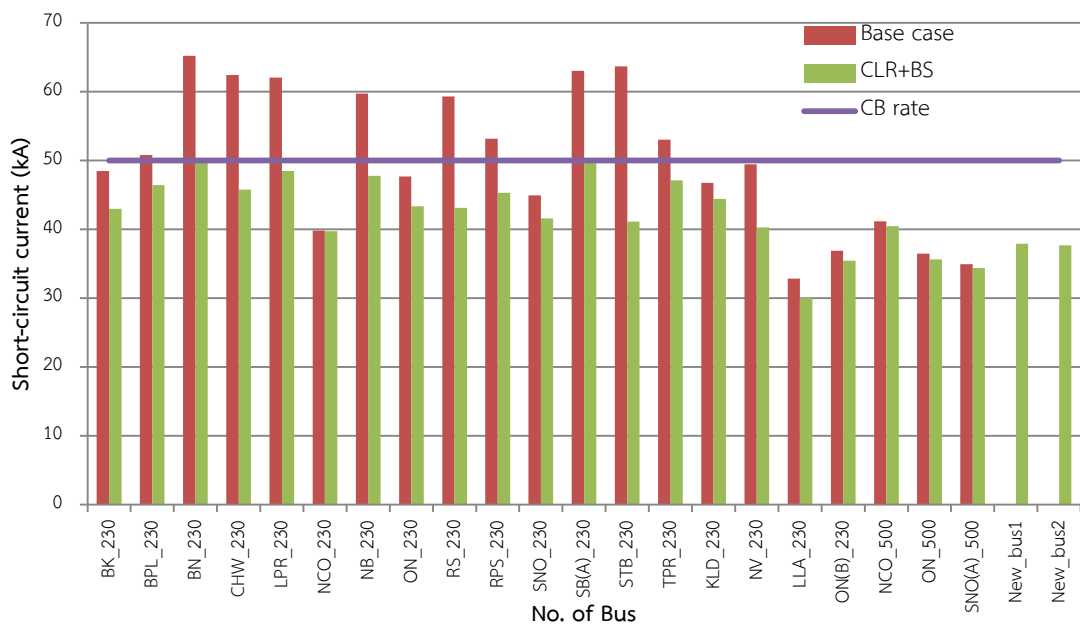
ภาพที่ 5.32 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังทำการติดตั้งรีแอคเตอร์จำกัดกระแส ร่วมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 1



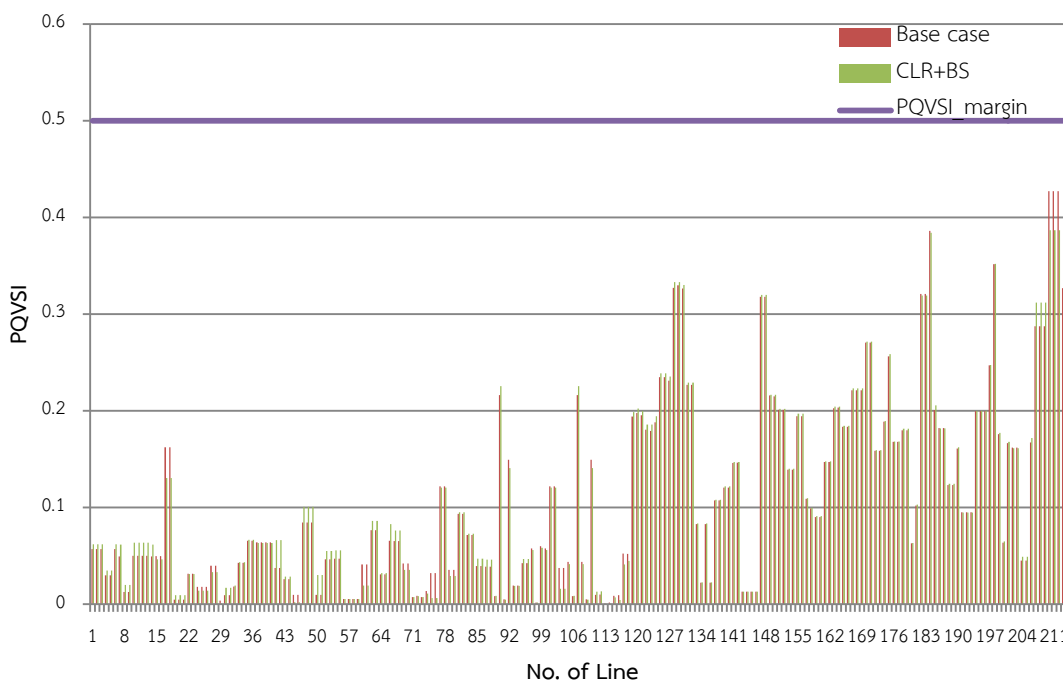
ภาพที่ 5.33 ขนาดแรงดันของบัสหลังทำการติดตั้งรีแอคเตอร์จำกัดกระแส ร่วมกับการแบ่งแยกบัสใน เขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 1



ภาพที่ 5.34 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลงหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 1



ภาพที่ 5.35 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 1



ภาพที่ 5.36 ค่า PQVSI ของสายส่งหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกบัส
ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 1

จะเห็นได้ว่าภายหลังระบบทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกบัส การค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถหาค่าตำแหน่งและจำนวนของบัสที่แบ่งแยกได้อย่างเหมาะสมได้ ซึ่งส่งผลให้ขนาดของกระแสลัดวงจรลดลงอยู่ภายใต้พิกัดที่กำหนด มีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด 49.6302 kA ที่บัสพระนครใต้ ในขณะที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพเชิงแรงดันอยู่ในขอบเขตที่กำหนด แต่อย่างไรก็ดีระบบยังไม่สามารถผ่านการวิเคราะห์ N-1 เนื่องจากขนาดของรีแอกเตอร์จำกัดกระแสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีเพียง 2 ขนาดเท่านั้น ซึ่งอาจจะยังมีขนาดไม่เหมาะสมกับระบบที่เปลี่ยนแปลงไป

5.2.4.2 กรณีที่ 2 พิจารณาค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแส 2 ค่า และอนุญาตให้มีการแบ่งแยกบัสถาวรได้

จากการทดสอบในกรณีที่ 1 เปลี่ยนให้สามารถมีการแบ่งแยกบัสแบบถาวรได้ จากการค้นหาตำแหน่ง และจำนวนที่เหมาะสมของกรณีที่ 2 นี้ เมื่อพิจารณาจากค่า *gbest* ของทุกรอบการคำนวณพบว่าวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแบบวงกว้างได้ โดยเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งของบัสที่เป็นชุดคำตอบพบว่ามี 2 ชุดคำตอบที่เป็นคำตอบแบบวงแคบ ดังแสดงในตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 แสดงรายละเอียดของคำตอบของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสกรณีสี่ 2

ชุดคำตอบ	ตำแหน่งบัส	ตำแหน่งบัส	ตำแหน่งบัส	เงื่อนไขการทำงาน	PQVSI สูงสุด	เงื่อนไข N-1	ขนาด CLR (p.u.)	คะแนนรวมของระบบ
1	BPL_230	CHW_230	NB_230	ผ่าน	0.4634	ผ่าน	0	103,333.0255
2	SB_230	NB_230	-	ผ่าน	0.4071	ผ่าน	0	105,000.1859

จากตารางพบว่า คะแนนรวมของชุดคำตอบที่ 2 มีคะแนนมากที่สุด โดยชุดคำตอบจะเป็นการแบ่งแยกบัสถาวร ไม่มีการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแส ดังนั้นตำแหน่งบัสที่แบ่งแยกจึงเป็นตำแหน่งเดียวกับคำตอบของกรณีศึกษาที่ 3 คือแบ่งแยกที่บัสพระนครเหนือ และบัสพระนครใต้

5.2.4.3 กรณีที่ 3 พิจารณาค่ารีแอกเตอร์จำกัดกระแส 6 ค่า และไม่อนุญาตให้มีการแบ่งแยกบัสถาวร

จากผลการทดสอบในกรณีที่ 1 ระบบหลังการเปลี่ยนแปลงยังไม่ผ่านการวิเคราะห์ N-1 เนื่องจากขนาดของ CLR ที่ใช้มีจำกัด ดังนั้นในกรณีที่ 2 นี้ จึงสมมติขนาดของ CLR เพิ่มขึ้นมาอีก 4 ค่าโดยที่ค่าความต้านทานต้องอยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดคืออยู่ระหว่าง 0.001 ถึง 0.1 [4] ดังนี้

ตารางที่ 5.14 ขนาดของ CLR ที่สมมติขึ้นมา

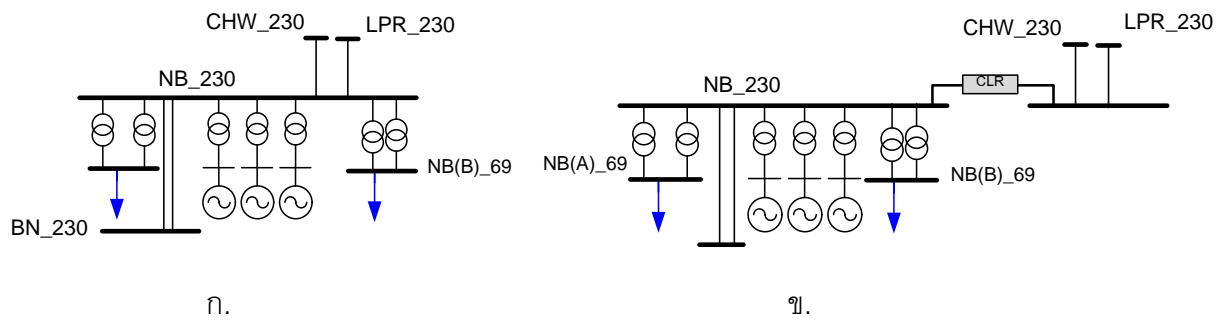
V_{rated} (kV)	F (Hz)	L (μH / phase)	I_{rated} (kA)	S_{rated} (MVA)	X_{CLR} (p.u.)
345	50	36,000	2,100	40	0.0214
345	50	48,000	2,100	40	0.0285
345	50	60,000	2,100	40	0.0356
345	50	72,000	2,100	40	0.0428

จากการค้นหาตำแหน่ง และจำนวนที่เหมาะสมของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสนั้น เมื่อพิจารณาจากค่า g_{best} ของทุกรอบการคำนวณ พบว่าวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแบบวงกว้างได้ โดยเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งของบัสที่เป็นชุดคำตอบพบว่ามี 2 ชุดคำตอบที่เป็นคำตอบแบบวงแคบ ดังแสดงในตารางที่ 5.15

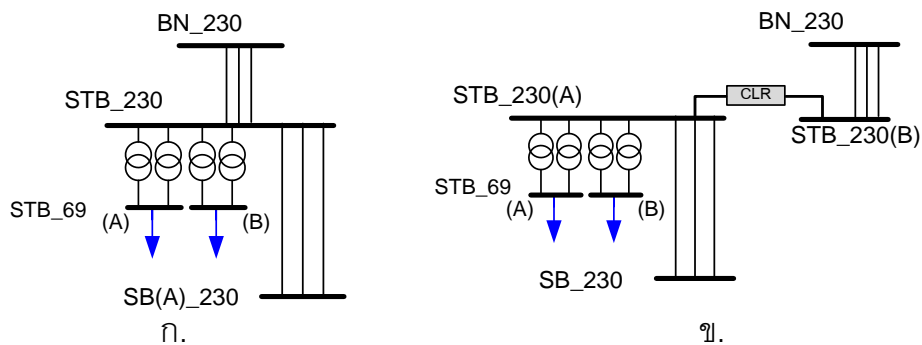
ตารางที่ 5.15 แสดงรายละเอียดของคำตอบของการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกบัสกรณีสี่ 2

คำตอบ	ตำแหน่งบัส			เงื่อนไขการทำงาน	ค่า PQVSI สูงสุด	เงื่อนไข N-1	ขนาดรวมของ CLR	คะแนนรวมของระบบ
1	NB_230	STB_230	RPS_230	ผ่าน	0.4117	ผ่าน	0.0713	103,473.588
2	-	NB_230	STB_230	ผ่าน	0.3972	ผ่าน	0.0571	105,175.206

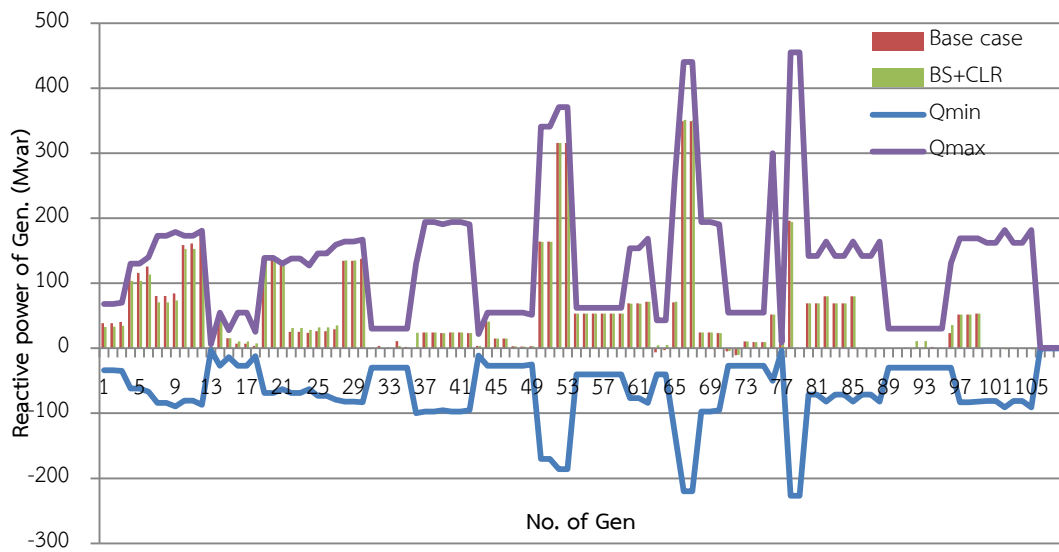
ภายหลังการทดสอบพบว่า ระบบทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกบัสที่บัสพระนครเหนือ และบัสธนบุรีใต้ โดยใช้รีแอกเตอร์จำกัดกระแสขนาด 0.0428 และ 0.0143 p.u. ตามลำดับ ภาพที่ 5.37 และภาพที่ 5.38 แสดงการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกบัส ส่วนภาพที่ 5.39 และภาพที่ 5.43 แสดงเงื่อนไขการทำงานของระบบ



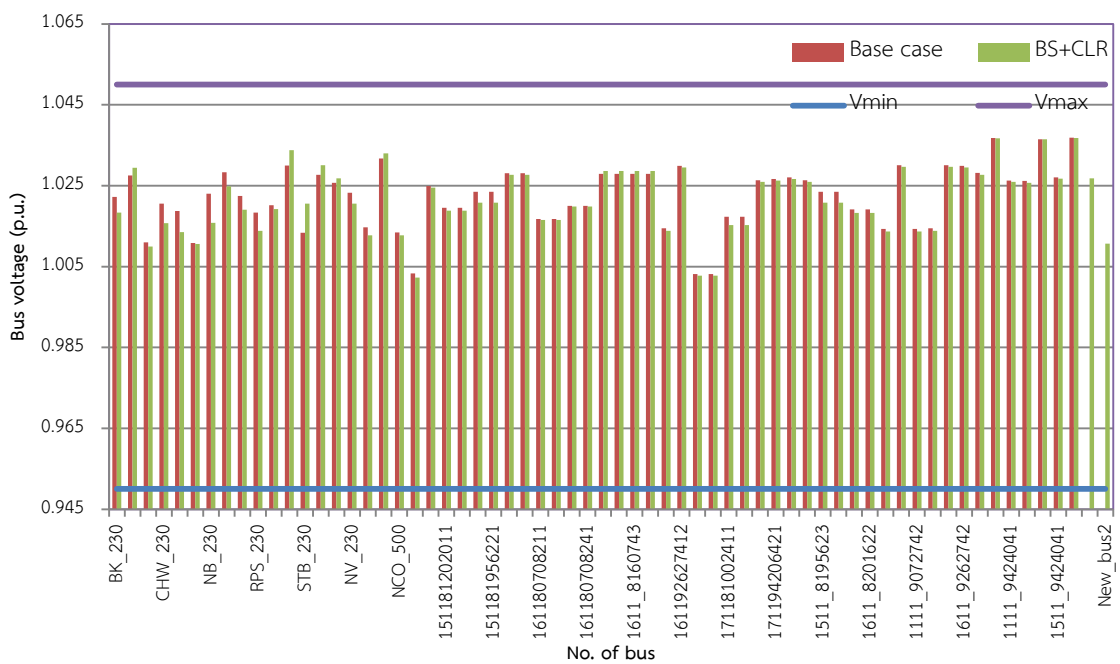
ภาพที่ 5.37 ก่อนและหลังการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกที่บัสพระนครเหนือ



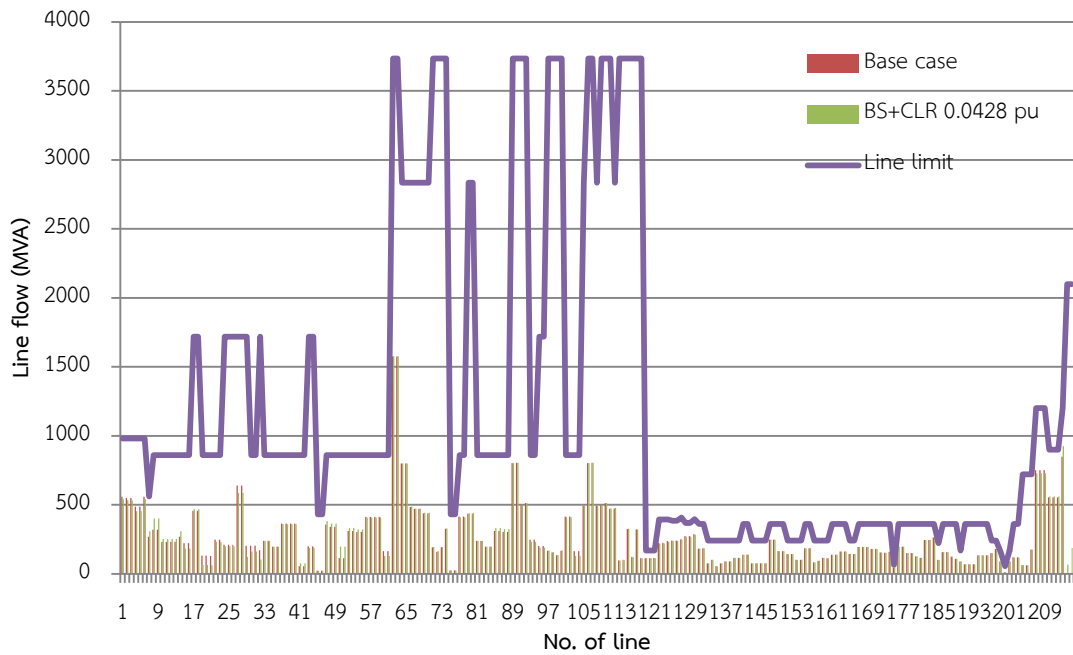
ภาพที่ 5.38 ก่อนและหลังการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกที่บัสธนบุรีใต้



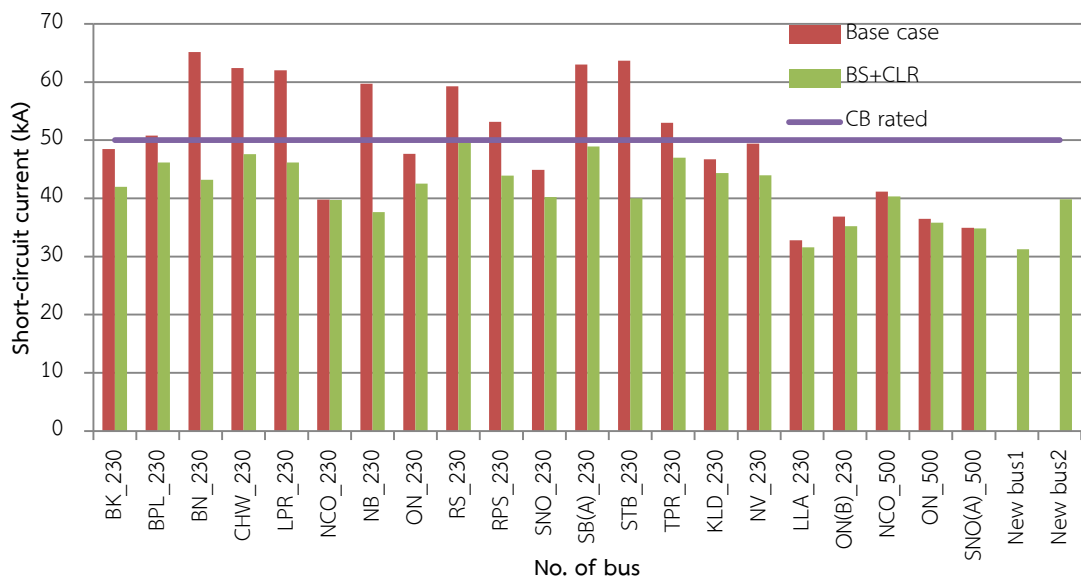
ภาพที่ 5.39 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแส ร่วมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลกรณีที่ 2



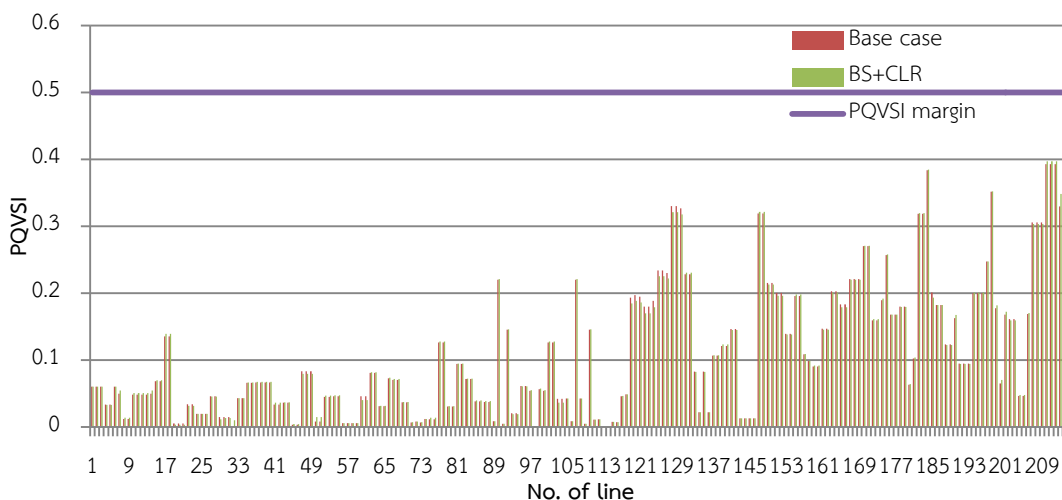
ภาพที่ 5.40 ขนาดแรงดันของบัสหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสใน เขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 2



ภาพที่ 5.41 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลงหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 2



ภาพที่ 5.42 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกบัสในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 2



ภาพที่ 5.43 ค่า PQVSI ของสายส่งหลังทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกบัส
ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กรณีที่ 2

จะเห็นได้ว่าภายหลังระบบทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกบัส การค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถหาตำแหน่งและจำนวนของบัสที่แบ่งแยกได้อย่างเหมาะสมได้ ซึ่งส่งผลให้ขนาดของกระแสลัดวงจรลดลงอยู่ภายใต้พิกัดที่กำหนด มีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด 49.661 kA ที่บัสรังสิต ในขณะที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพเชิงแรงดันอยู่ในขอบเขตที่กำหนด และสามารถผ่านการวิเคราะห์ N-1 ได้ เนื่องจากขนาดของรีแอกเตอร์จำกัดกระแสที่ใช้ช่วยเพิ่มความต้านทานโดยรวมของระบบ กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ดีขนาดรีแอกเตอร์จำกัดกระแสที่ใช้อาจจะมีจำหน่ายในท้องตลาด ดังนั้นผู้วิจัยจึงควรทดสอบกับขนาดของรีแอกเตอร์จำกัดกระแสที่มีอยู่จริง เพื่อทดสอบหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดต่อไป ตารางที่ 5.16 แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณของทั้งสามกรณี

ตารางที่ 5.16 แสดงเวลาการคำนวณที่ใช้ของแต่ละอัลกอริทึมในกรณีศึกษาที่ 4

กรณี	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (ชั่วโมง)	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วัน)
1	85.157	3.55
2	94.182	3.92
3	95.024	3.96

5.3 แนวทางการประยุกต์ใช้งาน

สำหรับแนวทางการนำไปใช้งานแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุดที่พิจารณาเงื่อนไขกระแสลัดวงจรด้วยวิธีที่ได้กล่าวมานั้น พบเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่นานอยู่ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอแนวทางเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณลงคือ ให้ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดตำแหน่งที่อนุญาตให้เปลี่ยนแปลงระบบ ยกตัวอย่างเวลาที่ใช้ในการคำนวณในตารางที่ 5.16 พบว่าการทดสอบใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก ดังนั้นหากทำการทดสอบในกรณีที่ 4 ใหม่ โดยกำหนดจำนวนบัสที่อนุญาตให้ติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกเข้าไปในระบบ เพื่อตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบว่ามีใช้เวลาการค้นหาคำตอบที่ลดลงหรือมากขึ้นอย่างไร โดยการทดสอบจะกำหนดให้มีคำตอบที่ดีที่สุดเพียง 1 คำตอบเท่านั้น และแบ่งจำนวนบัสที่อนุญาตให้แบ่งแยกออกเป็น 3 ค่าคือ 5, 10 และ 15 บัส ดังนี้

- จำนวนบัสที่อนุญาตให้แบ่งแยก 5 บัสคือบัสหมายเลข 1 ถึง 5 ตามตารางที่ 5.17
- จำนวนบัสที่อนุญาตให้แบ่งแยก 8 บัสคือบัสหมายเลข 1 ถึง 8 ตามตารางที่ 5.17
- จำนวนบัสที่อนุญาตให้แบ่งแยก 10 บัสคือบัสหมายเลข 1 ถึง 10 ตามตารางที่ 5.17
- จำนวนบัสที่อนุญาตให้แบ่งแยก 13 บัสคือบัสหมายเลข 1 ถึง 13 ตามตารางที่ 5.17
- จำนวนบัสที่อนุญาตให้แบ่งแยก 15 บัสคือบัสหมายเลข 1 ถึง 15 ตามตารางที่ 5.17
- จำนวนบัสที่อนุญาตให้แบ่งแยก 18 บัสคือบัสหมายเลข 1 ถึง 18 ตามตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 บัสที่อนุญาตให้แบ่งแยก

บัสที่	บัสที่อนุญาตให้แบ่งแยก	อักษรย่อ
1	พระนครเหนือ	NB_230
2	พระนครใต้	SB_230
3	บางพลี	BPL_230
4	บางกอกน้อย	BN_230
5	ธนบุรีใต้	STB_230
6	แจ้งวัฒนะ	CHW_230
7	ลาดพร้าว	LPR_230
8	หนองจอก	NCO_230
9	อ่อนนุชA	ON(A)_230
10	รังสิต	RS_230
11	รัชดาภิเษก	RPS_230

ตารางที่ 5.17 บัสที่อนุญาตให้แบ่งแยก (ต่อ)

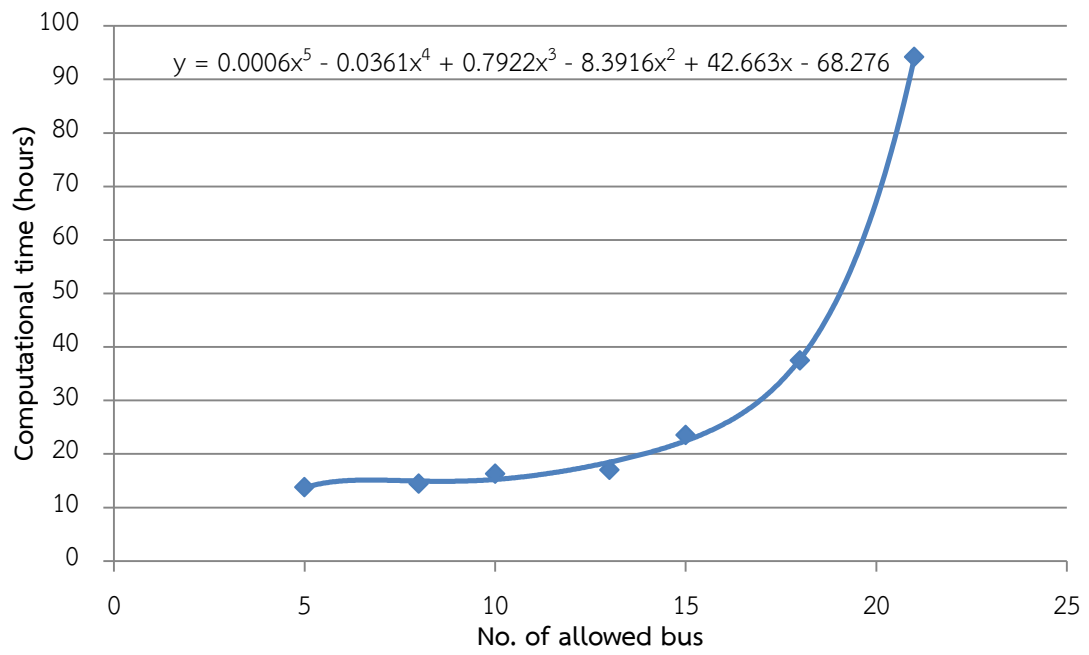
บัสที่	บัสที่อนุญาตให้แบ่งแยก	อักษรย่อ
12	ไทรน้อย	SNO_230
13	เทพารักษ์	TPR_230
14	คลองด่าน	KLD_230
15	นวนคร	NV_230
16	ลำลูกกา	LLA_230
17	อ่อนนุช	ON(B)_230
18	บางกะปิ	BK_230

จากการทดสอบพบว่า วิธีแก้ปัญหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคยังคงสามารถค้นหาคำตอบแบบวงกว้างที่ดีที่สุดเป็นคำตอบเดียวกับกรณีที่ 2 ในหัวข้อที่ 5.2.4.3 รวมไปถึงรูปแบบของระบบที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสรวมกับการแบ่งแยกบัสก็ยังคงเป็นรูปแบบเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณพบว่า การจำกัดจำนวนบัสที่อนุญาตให้เปลี่ยนแปลงได้ลดลงนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ อีกทั้งยังช่วยลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณให้ลดน้อยลงตามตารางที่ 5.18 อีกด้วย

ตารางที่ 5.18 เวลาที่ใช้ในการคำนวณของการจำกัดจำนวนบัสที่อนุญาตให้เปลี่ยนแปลง

จำนวนบัสที่อนุญาตให้เปลี่ยนแปลง	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (ชั่วโมง)
5	13.791
8	14.438
10	16.297
13	17.012
15	23.550
18	37.439
ทุกบัสที่เป็นไปได้	94.182

จากตารางที่ 5.18 จะเห็นได้ว่า เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะแปรผันตามจำนวนบัสที่อนุญาตให้เปลี่ยนแปลง เมื่อจำนวนบัสที่อนุญาตให้เปลี่ยนแปลงมีจำนวนมากขึ้นนั้นหมายความว่า ขอบเขตที่เป็นไปได้ของชุดคำตอบที่ใช้ในการค้นหาก็มากขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวาดกราฟจะแสดงได้ดังภาพที่ 5.44



ภาพที่ 5.44 เวลาที่ใช้ในการคำนวณของการจำกัดจำนวนบัสที่อนุญาตให้เปลี่ยนแปลง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค โดยปัญหาหลักๆ ที่สนใจคือการค้นหาคำตอบของวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรด้วยการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง การแบ่งแยกบัส และการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัส การหาตำแหน่งและจำนวนบัสที่เปลี่ยนแปลงในระบบจะต้องมีวิธีการหาที่เหมาะสม เพราะนอกจากจะพิจารณาตำแหน่งและจำนวนของบัสที่เปลี่ยนแปลงให้มีความเหมาะสมแล้ว ยังต้องพิจารณาการไหลของไฟฟ้าในระบบให้อยู่ในพิสัยอีกด้วย และการพิจารณาจำนวนของบัสที่เปลี่ยนแปลงจะพิจารณาให้มีการเปลี่ยนแปลงบัสในระบบน้อยๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแปรผันตรงกับผลกระทบต่อการทำงานของระบบ และจำนวนเงินลงทุนที่ใช้ในแก้ปัญหา สำหรับการพิจารณาเงื่อนไขบังคับของระบบจะแบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไขหลักดังนี้

1. เงื่อนไขเฉพาะของแต่ละรูปแบบปัญหาได้แก่ เงื่อนไขการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง เงื่อนไขการแบ่งแยกบัส และเงื่อนไขการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัส
2. เงื่อนไขการทำงานของระบบได้แก่ การแยกตัวของระบบหลังระบบมีการเปลี่ยนแปลง พิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พิกัดแรงดันในแต่ละบัส และพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง
3. เงื่อนไขความมั่นคงของระบบได้แก่ พิกัดกระแสลัดวงจร พิกัดดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบ PQ และความมั่นคงของระบบ N-1

สมรรถนะของวิธีการค้นหาคำตอบถูกนำมาทดสอบกับระบบทดสอบระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริงในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล เพื่อให้รองรับกับการนำไปใช้แก้ปัญหาในทางปฏิบัติ จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าวิธีการแก้ปัญหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคนั้นสามารถหาตำแหน่งและจำนวนของบัสที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวิธีการจำกัดกระแสได้คำตอบที่มีคุณภาพ แต่ละคำตอบที่ได้สามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดได้ทั้งหมด โดยจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เหมาะสำหรับการทำงานที่เป็นแบบวางแผนในระยะยาว เนื่องจากต้องทดสอบอัลกอริทึมหลายครั้ง จึงทำให้ใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมากจากการปรับค่า

2) เมื่อใช้วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคมาแก้ปัญหา ในบางครั้งรูปแบบปัญหาที่พิจารณาอาจจำเป็นต้องแบ่งออกเป็น 2 ปัญหาคือ ปัญหาหลักและปัญหารอง เนื่องจากแต่ละอนุภาคที่ใช้ของปัญหาหลักอาจจะยังไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาหลักได้โดยตรง ต้องนำแต่ละอนุภาคของปัญหาหลักไปวิเคราะห์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหารองก่อน และนำผลการวิเคราะห์ของปัญหารองกลับมาวิเคราะห์ในปัญหาหลักต่อไป

3) สำหรับปัญหาหลักที่วิทยานิพนธ์นี้สนใจคือ การค้นหาคำตอบของวิธีจำกัดกระแสลัดวงจรด้วยการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง การแบ่งแยกบัส และการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแส ร่วมกับการแบ่งแยกบัส โดยใช้วิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคมาเป็นวิธีการแก้ปัญหา คำตอบจากการค้นหาพบว่า

3.1 กรณีประยุกต์การเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่งในการจำกัดกระแสลัดวงจรจะทำให้บัสพระนครเหนือ บัสพระนครใต้ และบัสบางกอกน้อย โดยจะสามารถจำกัดกระแสลัดวงจรให้อยู่ต่ำกว่าพิกัดของเบรกเกอร์ได้และมีเสถียรภาพเชิงแรงดันแบบ PQ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ระบบหลังการเปลี่ยนแปลงไม่สามารถผ่านการวิเคราะห์ N-1 ได้ เนื่องจากภายหลังที่ระบบมีการเปลี่ยนการเชื่อมต่อสายส่งแล้ว จำนวนสายส่งของระบบจะลดลง ทำให้เมื่อวิเคราะห์ N-1 สายส่งที่ถูกเปลี่ยนการเชื่อมต่อนั้นอาจจะทำให้ระบบอ่อนแอหรือไม่สามารถส่งกำลังได้เต็มที่ และหากถูกปลดออกจากระบบ ทำให้สายส่งเส้นอื่นหรือบัสอื่นมีภาระงานที่เกินพิกัด ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหานี้อาจจะไม่เหมาะสมสำหรับการทำงานในระยะยาว

3.2 กรณีประยุกต์การแบ่งแยกบัสในการจำกัดกระแสลัดวงจรจะทำให้บัสพระนครเหนือ และบัสพระนครใต้ เพียง 2 บัสเท่านั้น ระบบหลังการเปลี่ยนแปลงสามารถลดกระแสลัดวงจรให้อยู่ในพิกัดของเบรกเกอร์ได้ มีเสถียรภาพเชิงแรงดันแบบ PQ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และสามารถผ่านการวิเคราะห์ N-1 ได้เช่นกัน ดังนั้นการแบ่งแยกบัสจึงถือเป็นวิธีการจำกัดกระแสที่ใช่วงแผนระยะยาวได้ดีกว่าการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง

3.3 กรณีประยุกต์การติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสทั้ง 4 กรณีพบว่า ตำแหน่งที่เหมาะสมที่ทำการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสคือบัสพระนครเหนือ และบัสธนบุรีใต้เพียง 2 บัส การเปลี่ยนแปลงระบบนี้สามารถจำกัดกระแสลัดวงจรลงได้ มีค่าดัชนีความมีเสถียรภาพเชิงแรงดันแบบ PQ อยู่ในขอบเขตที่กำหนด อีกทั้งระบบยังสามารถผ่านการวิเคราะห์ N-1 ได้ แต่การจำกัดกระแสด้วยวิธีนี้อาจจำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายเรื่องของอุปกรณ์ที่ติดตั้งไปในระบบ ซึ่งหากเปรียบกับการแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวแล้ว อาจจะทำให้มีความเหมาะสมน้อยกว่า

4) การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยรวมของระบบที่มีขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนด้วยค่าดัชนี PQVSI ของสายส่งที่มีค่ามากที่สุด อาจไม่สามารถสะท้อนความมีเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ ภายหลังมีการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายในกรณีตำแหน่งที่นำค่าดัชนีมาชี้วัดอยู่ห่างไกลจากจุดที่ทำการปรับเปลี่ยนโครงข่ายของระบบ

5) การจำกัดขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้ให้แคบลง ช่วยให้การแก้ปัญหาใช้เวลาการคำนวณน้อยลง ในขณะที่ยังคงคำตอบที่มีคุณภาพที่ดีอยู่ แต่ในบางครั้งถ้าจำกัดขอบเขตให้น้อยเกินไป อาจจะทำให้ได้คำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังนั้นจึงต้องจำกัดคำตอบที่เป็นไปได้ให้อยู่ในขอบเขตที่เหมาะสม

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับบางปัญหาวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์นี้อาจจะไม่มี ความเหมาะสม เนื่องจากอาจจะต้องใช้เวลาการคำนวณที่จำกัด ดังนั้นควรจะหาวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมกับการทำงานทั้งสองแบบ

2. ในทางปฏิบัติค่ากระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้นจริงอาจเป็นไปได้ทั้งชนิด 3 เฟสสมดุล หรือ 1 เฟสลงดิน ดังนั้นในการพิจารณาเงื่อนไขกระแสลัดวงจรควรพิจารณากระแสลัดวงจรแบบ 1 เฟสลงดินร่วมด้วย

3. ในวิทยานิพนธ์นี้จำนวนสูงสุดของบัสที่เปลี่ยนแปลงในระบบ จะแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดยจำนวนของบัสที่อนุญาตให้แบ่งแยกเพิ่มขึ้น เปรียบเสมือนพื้นที่ทั้งหมดในการหาคำตอบมากขึ้นด้วย ดังนั้นในการนำไปแก้ปัญหาควรกำหนดจำนวนตำแหน่งสูงสุดของการแบ่งแยกให้เหมาะสมกับระยะเวลาที่มีในการแก้ปัญหา

4. สำหรับการติดตั้งรีแอกเตอร์จำกัดกระแสร่วมกับการแบ่งแยกบัสนั้น ค่ารีแอกเตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีเพียงแค่ 1 ค่าเท่านั้นซึ่งเป็นค่าจริงที่มีขายในท้องตลาด ดังนั้นคำตอบที่ได้ อาจจะยังไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นหากต้องการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดอาจต้องหาข้อมูลของรีแอกเตอร์จำกัดกระแสที่มีขายจริงในท้องตลาดมากกว่านี้ เพื่อเพิ่มความหลากหลายของคำตอบที่ค้นหา ทำให้มีโอกาสเจอคำตอบที่มีความเหมาะสมในการแก้ปัญหามากขึ้น และในส่วนของเงินลงทุนที่ใช้ในการแก้ปัญหา ควรพิจารณาเงินลงทุนของการติดตั้ง CLR ในทางปฏิบัติจริง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการพิจารณาเลือกวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

5. สำหรับการนำไปพัฒนาต่อ อาจจะผนวกวิธีการค้นหาอื่นๆ เข้ากับวิธีการค้นหาด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้มากยิ่งขึ้น และอาจจะช่วยลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณลงได้

รายการอ้างอิง

- [1] พรสุตา อรัญวงศ์ และ ศุภลักษณ์ กมลเลิศวรา. ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง. ปรินูญานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยบูรพา, 2551.
- [2] Bhaskar, M.M., Srinivas, M., and Maheswarapu, S. SECURITY CONSTRAINTS OPTIMAL POWER FLOW- A COMPREHENSIVE SURVEY. Transaction on Power System, protection and distribution 2 (June 2011)
- [3] ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง. โครงการการศึกษาการปรับปรุงโครงข่ายเพื่อจำกัดค่ากระแสลัดวงจรสำหรับระบบส่งไฟฟ้า กฟผ. ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล โดยวิธีการออปติไมเซชัน. 2554. (อัดสำเนา)
- [4] ศรีณยู ตรียะโชติ. การแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมเพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธีค้นหาตามขั้นตอนปรับตัวได้. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2010.
- [5] สุขชัยรัตน์ ต้องศิริ. การติดตั้งสายส่งกระแสตรงแรงดันสูงเพื่อจำกัดขนาดกระแสลัดวงจรของระบบส่งในเขตเมืองใหญ่โดยพิจารณาดัชนีเสถียรภาพเชิงแรงดัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2010.
- [6] Pandya, K.S., and Joshi, S.K. A SURVEY OF OPTIMAL POWER FLOW METHODS. Journal of Theoretical and Applied Information Technique
- [7] อาทิตย์ ศรีแก้ว. ปัญหาเชิงคำนวณ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2009.
- [8] Yang, B., Chen, Y., Zhao, Z., and Han, Q. Solving Optimal Power Flow Problems with Improved Particle Swarm Optimization. Proceeding of 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006, pp. 7457-7461.
- [9] Roa-Sepulveda, C.A., and Pavez-Lazo, B.J. A SOLUTION TO THE OPTIMAL POWER FLOW USING SIMULATED ANNEALING., IEEE Porto Power Tech Conference 10th, 2001
- [10] Smita, P. Optimal Power Flow by Particle Swarm Optimization for Reactive Loss Minimization. ISSN2277-8816 1(February 2012)

- [11] Capitanescu, F., and et al. Applications of Security Constrained Optimal Power Flows, Electrical Engineering and Computer Science.
- [12] Sharma, B., and Pandit, M. Security Constrained Optimal Power Flow Employing Particle Swarm Optimization, SCEECs, 2012.
- [13] Yumbla, P.E., Ramirez, J.M., and Coello, C.A. Optimal Power Flow Subject to Security Constraints Solved With a Particle Swarm Optimizer. IEEE Transactions on power systems 23 (February 2008) : 33-40
- [14] Somasundaram, P., Kuppusamy, K., and Kumudini Devi, R.P. Evolutionary programming based security constrained optimal power flow, Electric Power Systems Research, 2004
- [15] Onate, P.E., and Ramirez, J.M. Optimal Power Flow Solution with Security Constraints by a Modified PSO. ECTI Conference, 2013
- [16] Song, Y. H. and Irving, M. R. Optimization techniques for electrical power systems part 2 Heuristic optimization methods. Power Engineering journal (June 2001): 151-160.
- [17] Muthuselvan, N.B. and Somasundaram, P. APPLICATION OF TABU SEARCH ALGORITHM TO SECURITY CONSTRAINED ECONOMIC DISPATCH. Journal of Theoretical and Applied Information Technology (2005-2009).
- [18] Sujitjorn, S., Kluabwang, J., Puangdownreong, D. and Sarasiri, N. Adaptive Tabu Search and Management Agent. Transactions of ECTI vol. 8 (February 2010).
- [19] สุกกิจ นุตยะสกุล. การค้นหาเชิงวิวัฒนาการระหว่างเจเนติกอัลกอริทึม กับ พาทิคอลสวอม ออปติมิซเซชัน. Journal of Information Science and Technology 2 (December 2011).
- [20] Davis, L. Genetic Algorithms and Simulated Annealing. Morgan Kaufmann, 1997.
- [21] Jiraporn, S. and Anulark, T. Power generation expansion planning with emission control: a nonlinear model and a GA-based heuristic approach. International Journal of Energy Research (June 2005).

- [22] Leeton, U., Uthisunthorn, D., Kwannetr, U., Sinsuphun, N., and Kulworawanichpong, T. Power Loss Minimization Using Optimal Power Flow Based on Particle Swarm Optimization., IEEE Conference, 2012
- [23] Ravi, K., Rajaram, M., and Belwin Edward, J. Hybrid Particle Swarm Optimization Technique for Optimal Location of FACTS devices using Optimal Power Flow. ISSN 1450-216X 53 (2011) : 142-153
- [24] Sutha, S., and Kamaraj, N. Optimal location of Multi Type Facts Devices for Multiple Contingencies Using Particle Swarm Optimization. World Academy of Science, Engineering and Technology 46, 2008.
- [25] Van der Bergh, F. An Analysis of Particle Swarm Optimizers. Ph.D. Thesis, Department of Computer Science, University of Pretoria, 2002.
- [26] Prasert, C., and Komsan, H. PSO Based Approach for Optimum Fault Current Limiter Placement in Power System. IEEE Con. 2012
- [27] พรเทพ เทียบรัตน์, วัชรินทร์ ยกย่อง, กุลยศ อุดมวงศ์เสรี.ดัชนีเสถียรภาพแรงดัน PQ (PQVSI) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดัน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31, 2008.
- [28] Pittawat, K., and Naebboon, H. Combined Bus splitting and Line Bypassing for Short-circuit Current Limitation., ECTI-Conference, 2013
- [29] ข้อมูลจากฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2011.
- [30] Tohid, G., and Ebrahim, B. Optimal Power Flow Using Iteration Particle Swarm Optimization., IEEE Conference, 2012
- [31] พิทวัส กัลยา. การจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้าด้วยวิธีผสมผสานระหว่างการแบ่งแยกบัส การใช้รีแอกเตอร์จำกัดกระแส และการเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมต่อสายส่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2013.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลระบบทดสอบ

ภาคผนวก ก จะกล่าวถึงข้อมูลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วยข้อมูลระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส และข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ก.1 ข้อมูลระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส ที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้รับการดัดแปลงระบบเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลโดยรวมลดลง ในหัวข้อนี้ได้เสนอข้อมูลบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข้อมูลวงจรสายส่งและหม้อแปลง และ ข้อมูลเครื่องจักรกล แสดงในรูปแบบตาราง ซึ่งให้ค่าเป็นหน่วย p.u. โดยมีค่าฐานกำลังไฟฟ้าเป็น 100 MVA

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

Id	Type	Pd	Qd	Bs	Gs	basekV	Vmax	Vmin
1	3	0	0	0	0	345	1.05	0.95
2	2	21.7	12.7	0	0	345	1.1	0.95
3	1	2.4	1.2	0	0	345	1.05	0.95
4	1	7.6	1.6	0	0	345	1.05	0.95
5	1	0	0	0	0.19	345	1.05	0.95
6	1	0	0	0	0	345	1.05	0.95
7	1	22.8	10.9	0	0	345	1.05	0.95
8	1	30	30	0	0	345	1.05	0.95
9	1	0	0	0	0	230	1.05	0.95
10	1	5.8	2	0	0	135	1.05	0.95
11	1	0	0	0	0	135	1.05	0.95
12	1	11.2	7.5	0	0	135	1.05	0.95
13	2	0	0	0	0	115	1.1	0.95
14	1	6.2	1.6	0	0	135	1.05	0.95
15	1	8.2	2.5	0	0	135	1.05	0.95
16	1	3.5	1.8	0	0	135	1.05	0.95
17	1	9	5.8	0	0	135	1.05	0.95

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส (ต่อ)

Id	Type	Pd	Qd	Bs	Gs	basekV	Vmax	Vmin
18	1	3.2	0.9	0	0	135	1.05	0.95
19	1	9.5	3.4	0	0	135	1.05	0.95
20	1	2.2	0.7	0	0	135	1.05	0.95
21	1	17.5	11.2	0	0	135	1.05	0.95
22	2	0	0	0	0	135	1.1	0.95
23	2	3.2	1.6	0	0	135	1.1	0.95
24	1	8.7	6.7	0	0.04	135	1.05	0.95
25	1	0	0	0	0	135	1.05	0.95
26	1	3.5	2.3	0	0	135	1.05	0.95
27	2	0	0	0	0	135	1.1	0.95
28	1	0	0	0	0	345	1.05	0.95
29	1	2.4	0.9	0	0	135	1.05	0.95
30	1	10.6	1.9	0	0	135	1.05	0.95

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

Bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mbase	Pmax	Pmin
1	24.19	0	150	-20	1	345	1.05	0.95
2	60.97	0	60	-20	1	345	1.1	0.95
22	21.59	0	62.5	-15	1	345	1.05	0.95
27	26.91	0	48.7	-15	1	345	1.05	0.95
23	19.2	0	40	-10	1	345	1.05	0.95
13	37	0	44.7	-15	1	345	1.05	0.95

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

Fbus	Tbus	r	x	b	Ratio	Angle	Rated
1	2	0.0057	0.0171	0.03	0	0	130
1	3	0.0143	0.0543	0.02	0	0	130
2	4	0.0171	0.0486	0.02	0	0	65
3	4	0.0029	0.0114	0	0	0	130

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส (ต่อ)

Fbus	Tbus	r	x	b	Ratio	Angle	Rated
2	5	0.0143	0.0571	0.02	0	0	130
2	6	0.0171	0.0514	0.02	0	0	65
4	6	0.0029	0.0114	0	0	0	90
5	7	0.0143	0.0343	0.01	0	0	70
6	7	0.0086	0.0229	0.01	0	0	130
6	8	0.0029	0.0114	0	0	0	32
6	9	0.0000	0.0600	0	1	0	65
6	10	0.0000	0.1600	0	1	0	32
9	11	0.0000	0.0600	0	1	0	65
9	10	0.0000	0.0314	0	1	0	65
4	12	0.0000	0.0743	0	1	0	65
12	13	0.0000	0.0400	0	1	0	65
12	14	0.0343	0.0743	0	0	0	32
12	15	0.0200	0.0371	0	0	0	32
12	16	0.0257	0.0571	0	0	0	32
14	15	0.0629	0.0571	0	0	0	16
16	17	0.0229	0.0543	0	0	0	16
15	18	0.0314	0.0629	0	0	0	16
18	19	0.0171	0.0371	0	0	0	16
19	20	0.0086	0.0200	0	0	0	32
10	20	0.0257	0.0600	0	0	0	32
10	17	0.0086	0.0229	0	0	0	32
10	21	0.0086	0.0200	0	0	0	32
10	22	0.0200	0.0429	0	0	0	32
21	22	0.0029	0.0057	0	0	0	32
15	23	0.0286	0.0571	0	0	0	16
22	24	0.0343	0.0514	0	0	0	16
23	24	0.0371	0.0771	0	0	0	16

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส (ต่อ)

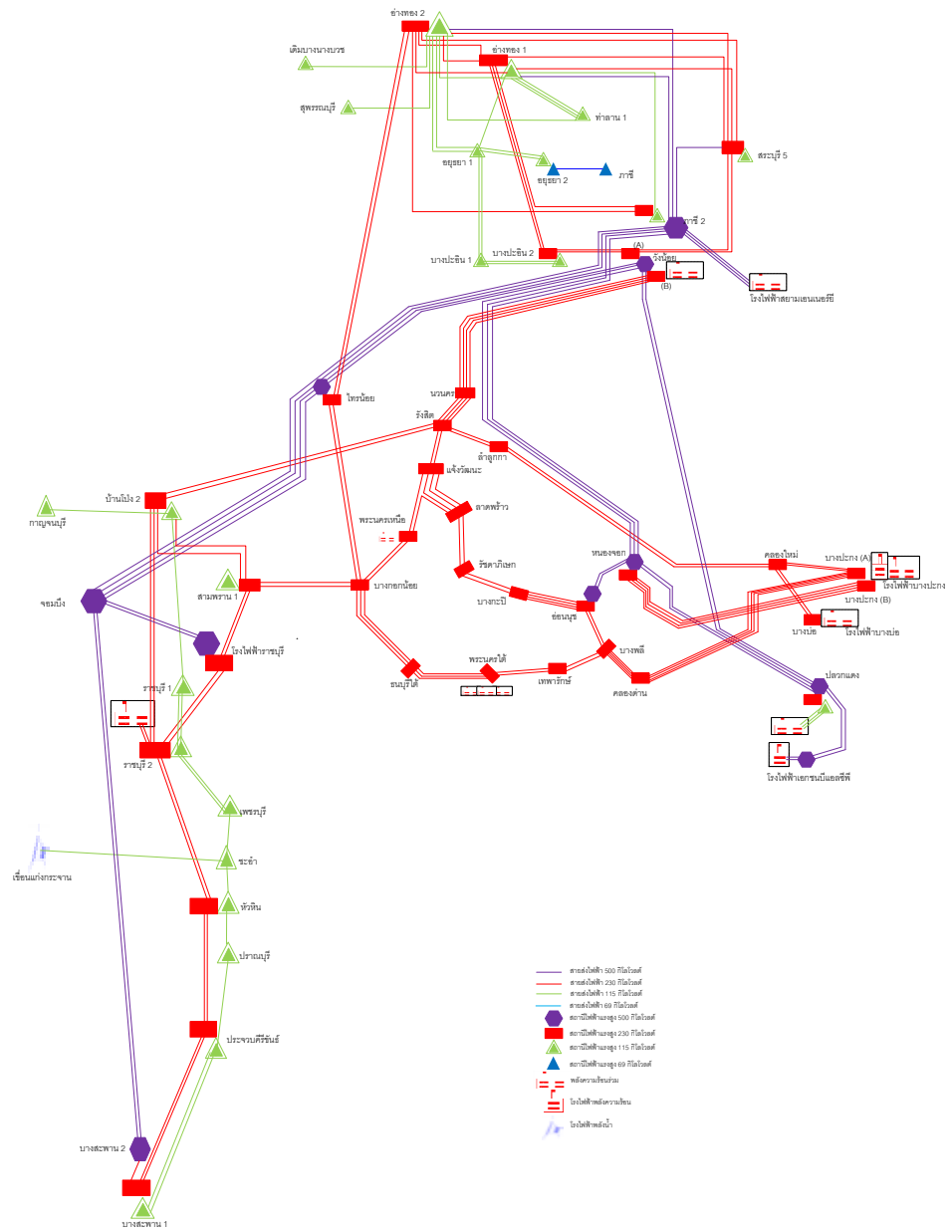
Fbus	Tbus	r	x	b	Ratio	Angle	Rated
24	25	0.0543	0.0943	0	0	0	16
25	26	0.0714	0.1086	0	0	0	16
25	27	0.0314	0.0600	0	0	0	16
28	27	0.0000	0.1143	0	1	0	65
27	29	0.0629	0.1200	0	0	0	16
27	30	0.0914	0.1714	0	0	0	16
29	30	0.0686	0.1286	0	0	0	16
8	28	0.0171	0.0571	0.02	0	0	32
6	28	0.0057	0.0171	0.01	0	0	32

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

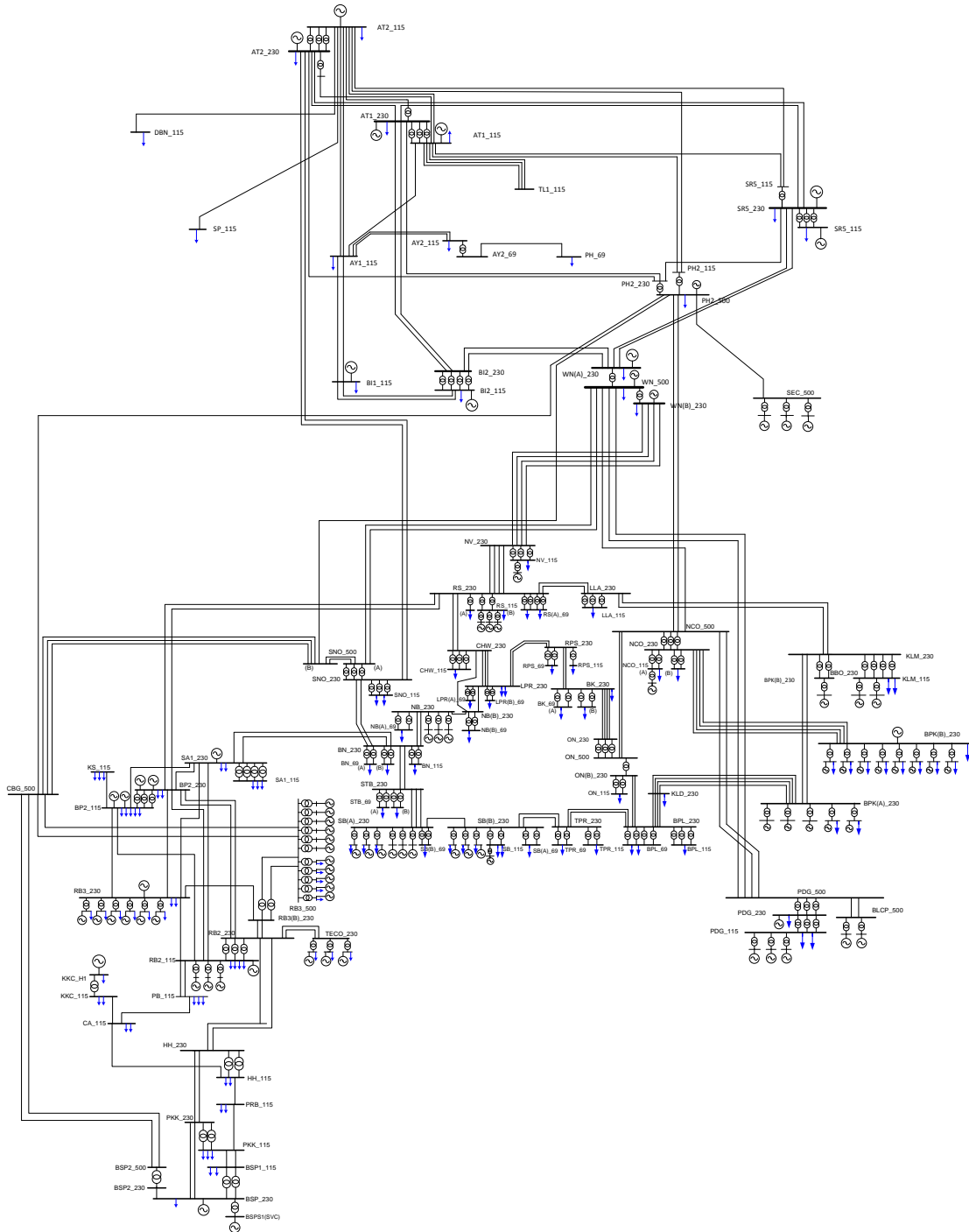
Bus	r _{gen}	x _{gen}
1	0	0.1
2	0	0.1
22	0.2	0.2
27	0	0.2
23	0	0.2
13	0.8	0.8

ก.2 ข้อมูลระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล

ระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงของ กฟผ. ที่นำมาใช้ทดสอบเป็นระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยที่ถูกลดรูปเพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าในเขตกรุงเทพและปริมณฑลของ กฟผ. ซึ่งประกอบไปด้วยพื้นที่ในเขตกรุงเทพและปริมณฑลเชื่อมต่อกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าในภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก โดยแสดงจุดการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงดังภาพที่ ก.1 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแผนภาพเส้นเดียวดังภาพที่ ก.2



ภาพที่ ก.1 จุดการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงของเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล กับพื้นที่ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก



ภาพที่ ก.2 แผนภาพเส้นเดียวแสดงการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงของเขตกรุงเทพ และปริมณฑล กับพื้นที่ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก

รายละเอียดที่สำคัญของระบบประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 108 เครื่อง ขนาดกำลังการผลิตรวม 17,520 MW ขนาดของโหลดรวม เท่ากับ 17,402 MW มีจำนวนบัสในระบบรวม 254

บัส จำนวนสายส่งรวม 215 วงจร และมีหม้อแปลงในระบบรวม 214 ลูก โดยค่าฐานของการคำนวณ เป็น 100 MVA รายละเอียดของข้อมูลบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่ง แสดงไว้ใน อ้างอิง [4-5]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสมบูรณ์ นามโชติ เกิดเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม 2531 ที่จังหวัดอุดรดิตถ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2553 จากนั้นได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

