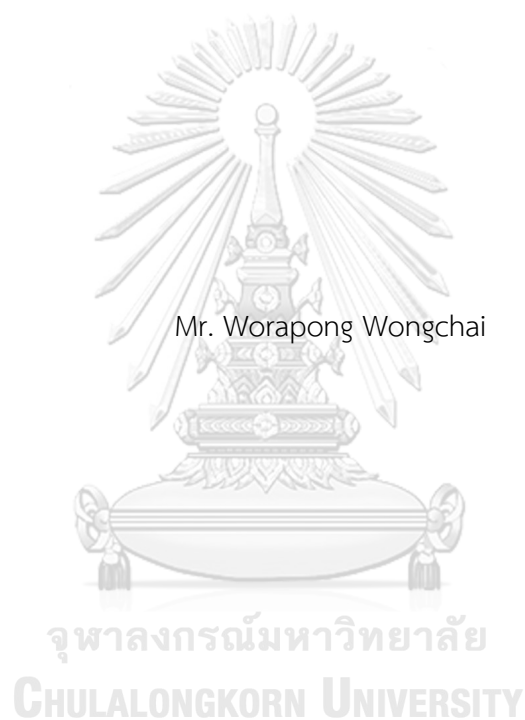


การกำหนดบริเวณที่เป็นไปได้ของโหนดโดยวิธีตามรอยขอบด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบฟังก์ชันภาค
ปรับตัวได้



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LOAD FEASIBLE REGION DETERMINATION BY USING BOUNDARY TRACING METHOD WITH
H ADAPTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำหนดบริเวณที่เป็นไปได้ของโหนดโดยวิธีตามรอยขอบ
	ด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาคปรับตัวได้
โดย	นายวรพงษ์ วงศ์ไชย
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.โสทธิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ ชัยทัศนีย์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.โสทธิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์)	
.....	กรรมการ
(ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สถาพร ลิ้มปัทมปาณี)	

วรพงษ์ วงศ์ไชย : การกำหนดบริเวณที่เป็นไปได้ของโหลดโดยวิธีตามรอยขอบด้วยการ
หาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาคปรับตัวได้. (

LOAD FEASIBLE REGION DETERMINATION BY USING BOUNDARY TRACING ME
THOD WITH ADAPTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ.
ดร.โสทธิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ามีความหลากหลายของเงื่อนไขในการกำหนดปัญหา
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอรูปแบบการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีการกำหนดบริเวณที่เป็นไปได้ของ
โหลดด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค เชิงปรับตัวโดยพิจารณาบนระนาบระหว่างแกนกำลังไฟฟ้าจริงและ
กำลังไฟฟ้าเสมือน โดยปัญหาที่พิจารณาในการวิจัยนี้คือความสามารถในการส่งผ่านพลังงานจาก
พื้นที่ต้นกำเนิดกำลังงานไฟฟ้าไปยังพื้นที่ปลายทางใดๆ เพื่อสังเกตพฤติกรรมรูปแบบการ
เปลี่ยนแปลงและผกผันของกำลังงานในแต่ละบัสด้วยวิธีตามรอยขอบประยุกต์กลุ่มอนุภาค โดยการ
กำหนดจุดขอบของบริเวณที่เป็นไปได้ของโหลดด้วยการหาระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดโหลดที่
เป็นไปได้หลังจากนั้นจึงใช้วิธีการตามรอยขอบเพื่อหาจุดการทำงานของระบบด้วยวิธีการทาง
เวกเตอร์และการหาจุดการทำงานที่มีเสถียรภาพในแต่ละบัสด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคสลับกันไปจนได้ผล
เฉลยรูปแบบจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถทำงานได้หากเกิดเหตุการณ์ปลดออกของสายส่ง วิธีการที่
นำเสนอได้รับการทดสอบกับระบบ IEEE 24 บัส และระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย ซึ่ง
ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าว สามารถกำหนดจุดการทำงานในแต่ละบัสด้วยการ
ประยุกต์วิธีกลุ่มอนุภาคในการหาผลเฉลยและกำหนดบริเวณที่เป็นไปได้ของโหลดเมื่อเกิดเหตุการณ์
หลุดออกของสายส่งสำหรับการส่งกำลังงานไฟฟ้าระหว่างต้นทางและปลายทางต่างๆได้ ซึ่งจุดการ
ทำงานที่ปรากฏอยู่บนระนาบจะบอกถึงจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถทำงานได้ตามปกติและขีดจำกัด
ในการเปลี่ยนแปลงของโหลดด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น การเพิ่มโหลด การตัดโหลด (การปลดสายส่ง)
วิธีการนี้จะทำให้เห็นสถานะการทำงานของโหลดได้อย่างชัดเจนมากกว่าวิธีการกำหนดขอบเขตของ
โหลดแบบดั้งเดิม นอกจากนี้วิธีการใหม่นี้ยังสามารถหาขอบเขตนอกสุดของพื้นที่ที่เป็นไปได้
ของโหลดก่อนนำมาพิจารณาสถานะการทำงานของโหลดใหม่ทำให้สามารถพิจารณาพารามิเตอร์
ของระบบที่สนใจใหม่ได้อีกด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970453321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: TRANSFER CAPABILITY, POWER FLOW SOLUTION SPACE, SOLVABLE REGION, REACTIVE POWER MANAGEMENT, PARTICLE SWARM OPTIMIZATION, FEASIBLE REGION

Worapong Wongchai :
LOAD FEASIBLE REGION DETERMINATION BY USING BOUNDARY TRACING METHOD WITH ADAPTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION. Advisor: Assoc. Prof. Sotdhipong Phichaisawat, Ph.D.

The electrical power system analysis has a wide range of conditions for determination problem, this thesis proposes a method for determining load feasible region adaptive particle swarm optimization on a plane between real power axis and reactive power axis. The considered problem in this research is the transfer capability determination from a source to a sink area for observation the behavior, patterns, changes, and obligations of each bus for accordance with the application of particle swarm optimization. The determination point uses the boundary tracing process by determining a boundary point of load feasible region with the distance minimization from an infeasible loading point approach to determine the point of operation. The next operation points are traced by using vector operations and minimize stability operation points in each bus with particle swarm optimization, repeatedly until obtaining the maximum number of bus that operated when occurs contingency. The proposed method has been tested with IEEE 24 bus system, and Thailand power system. The result shows that this method can determine load feasible region point for several source-sink pairs by applying the particle swarm method. In addition, the new methods presented determination the outermost boundary of load feasible region affected by the considered system parameters.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความเมตตากรุณาและการช่วยเหลืออันดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร. โสทธิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก) และดร. สถาพร ลิ้มปัทมปาณี หัวหน้าแผนกบำรุงรักษาไฟฟ้าโรงไฟฟ้าเขื่อนศรีนครินทร์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการศึกษาจนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณผู้มีส่วนให้คำปรึกษาทุกท่านที่เสนอแนะวิธีการใหม่ๆ ตลอดจนแนวคิดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร. ธนกร เจณณวาสิน อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) และนายภิกเนตร อังอภิวัชรชวาล รวมทั้งยังเป็นแบบอย่างที่ดีให้แก่ผู้วิจัยในเรื่องความตั้งใจและความทุ่มเทในการทำงาน

ผู้วิจัยขอขอบคุณพระคุณ ดร. สุวิทย์ อัจริยะเมต ผู้อำนวยการกองพัฒนาระบบงาน (กพร.) สำนักยุทธศาสตร์และวิสาหกิจ (สยศ.) กลุ่มยุทธศาสตร์และจัดการนวัตกรรม (ยธ.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ได้เสียสละเวลาและเอื้อเฟื้อข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาวิธีการนำไปใช้กลุ่มอนุภาค รวมไปถึงเทคโนโลยีในปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาค อีกทั้งขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. สุภัทรา วิเศษศรี ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยชี้แนะอบรมสั่งสอนและเอื้อเฟื้อสถานที่ขณะทำการวิจัย และขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อนในคณะ และรุ่นน้องภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้กำลังใจและการสนับสนุนแนวคิดของผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณมารดา และ ครอบครัวญาติพี่น้องที่ได้ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยโดยตลอดมา จนทำให้เกิดความสำเร็จในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขึ้น ประโยชน์ใดๆ จากวิทยานิพนธ์ ขอมอบแต่บิดาซึ่งเสียชีวิตในขณะที่ผู้วิจัยกำลังศึกษาอยู่ในระดับบัณฑิตศึกษา และไม่มีโอกาสได้เห็นความสำเร็จในครั้งนี้ รวมไปถึงครูและอาจารย์ทุกท่านที่มีเมตตาอบรมสั่งสอนและให้ความรู้แก่ผู้วิจัยมาตั้งแต่เด็กจนถึงปัจจุบัน

วรพงษ์ วงศ์ไชย

สารบัญ

	หน้า
.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
.....ง	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....1	1
สารบัญตาราง.....3	3
บทที่ 1. บทนำ.....4	4
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....4	4
1.2 วัตถุประสงค์.....7	7
1.3 ขอบเขตโครงสร้างวิทยานิพนธ์.....7	7
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....8	8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงสร้างวิทยานิพนธ์.....9	9
1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างวิทยานิพนธ์.....9	9
1.7 เนื้อหาของโครงสร้างวิทยานิพนธ์.....12	12
บทที่ 2. ทฤษฎีพื้นฐานของการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยวิธีกลุ่มอนุภาคและการกำหนดจุด ขอบเขต 13	
2.1 ความเป็นมาของวิธีการกลุ่มอนุภาค.....13	13
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค.....14	14
2.3 การพิจารณาตัวแปรในแต่ละขั้นตอนของวิธีกลุ่มอนุภาค.....19	19

2.3.1	จำนวนตัวอนุภาคในปริภูมิ	20
2.3.2	จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ.....	20
2.3.3	สัมประสิทธิ์ความเร่ง (C_1 และ C_2)	20
2.4	ความผันผวนของอนุภาคในการหาผลเฉลย	21
2.4.1	การใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในการบีบตัว.....	22
2.4.2	เงื่อนไขการจำกัดความเร็วของอนุภาค	23
2.5	ขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคแบบทวีภาค.....	24
2.6	ปัญหาการพิจารณาการไหลของกระแส	25
2.7	การกำหนดจุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้	27
2.7.1	วิธีการ Repeated Power Flow (RPF).....	27
2.7.2	วิธีการ Continuation Power Flow (CPF)	28
2.7.3	วิธีการ Optimal Power Flow (OPF).....	31
2.8	บทสรุป.....	33
บทที่ 3.	การประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคกับปัญหาการกำหนดจุดขอบเขต	34
3.1	ตัวแปรบัส (Bus Variable).....	34
3.2	วิธีกำหนดการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองบัส.....	36
3.2.1	ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองบัส.....	37
3.2.2	ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองบัส	38
3.3	ขั้นตอนการคำนวณสำหรับการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองพื้นที่	40
3.3.1	ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในระบบการส่งผ่านพลังงานสองพื้นที่	41
3.3.2	ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองพื้นที่.....	42
3.4	การประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคกับสมมติฐานการเกิด Contingency	45

3.4.1	ตัวแปรตัดสินใจปัญหาการปลดออกของสายส่ง	46
3.4.2	ฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาการปลดออกของสายส่ง.....	47
3.4.3	เงื่อนไขบังคับสำหรับปัญหาการปลดออกของสายส่ง	47
3.4.4	การแทนผลเฉลยของปัญหาการปลดสายออกด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค	49
3.4.5	ขั้นตอนการแก้ปัญหาการปลดออกของสายส่งด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค.....	51
3.5	การประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคกับปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน	53
3.5.1	ปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน.....	53
3.5.2	ตัวแปรตัดสินใจในปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน.....	54
3.5.3	ฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน	54
3.5.4	เงื่อนไขบังคับของปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน.....	55
3.5.5	การแทนผลเฉลยของปัญหาควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนด้วยอนุภาค.....	57
3.5.6	ขั้นตอนการแก้ปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค	58
3.7	สรุป	60
บทที่ 4.	วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ	61
4.1	การส่งพลังงานจากต้นทางไปยังปลายทาง.....	61
4.1.1	วิธีการส่งผ่านพลังงาน	61
4.2	ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ	66
4.2.1	ข้อมูลระบบทดสอบ IEEE 24 บัส.....	66
4.3	ตัวอย่างผลการทดสอบ	67
4.3.1	วิธีการแกะรอยขอกับการประยุกต์วิธีการกลุ่มอนุภาค.....	67
4.3.2	วิธีการแกะรอยขอกับการประยุกต์วิธีการกลุ่มอนุภาค: ระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย	79
บทที่ 5.	สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ.....	82
5.1	สรุปผลการทดสอบ	82

5.1.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ.....	82
5.1.2 ประโยชน์และการนำไปใช้.....	85
บรรณานุกรม	87
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก.	91
ประวัติผู้เขียน	132



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	ผังงานสำหรับขั้นตอนวิธีพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค [19].....	19
รูปที่ 2.2	การหาจุดพังทลายของ Nose Curve วิธี Continuation power flow [20].....	31
รูปที่ 3.1	องค์ประกอบของตัวแปรบัส.....	35
รูปที่ 3.2	การถ่ายโอนพลังงานระหว่างสองบัส.....	37
รูปที่ 3.3	การส่งผ่านพลังงานระหว่างสองพื้นที่.....	40
รูปที่ 4.1	การส่งผ่านพลังงานระหว่างระบบ 2 บัส [20].....	62
รูปที่ 4.2	แสดงกระบวนการแกะรอยขอบเพื่อหาขอบเขต [20].....	63
รูปที่ 4.3	จุดการทำงานของโหลดสูงสุดจากกรณีพื้นฐานที่ $-0.2+j0.0$ MVA [20]	64
รูปที่ 4.4	จุดการทำงานของโหลดสูงสุดจากกรณีพื้นฐานที่ $-0.8+j1.5$ MVA [20]	64
รูปที่ 4.5	บริเวณที่เป็นไปได้และบริเวณที่สามารถหาค่าได้ของระบบศึกษาสองบัส [20].....	65
รูปที่ 4.6	ระบบทดสอบ IEEE 24 บัส.....	66
รูปที่ 4.7	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 4.....	67
รูปที่ 4.8	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 4.....	68
รูปที่ 4.9	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 4.....	69
รูปที่ 4.10	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 4 ไปยังพื้นที่ 3	70
รูปที่ 4.11	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3	71
รูปที่ 4.12	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 3	72
รูปที่ 4.13	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 4 ไปยังพื้นที่ 2	73
รูปที่ 4.14	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 2	74
รูปที่ 4.15	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2	75
รูปที่ 4.16	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 4 ไปยังพื้นที่ 1	76
รูปที่ 4.17	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1	77
รูปที่ 4.18	วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 1	78

รูปที่ 4.19 วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 4	79
รูปที่ 4.20 วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 4	80
รูปที่ 4.21 วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3	81
รูปที่ 4.22 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย.....	94



สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรคงที่และตัวแปรอิสระ	35
ตารางที่ 5.1 ผลการสอบระบบ IEEE 24 บัส.....	83
ตารางที่ 5.2 ผลการสอบระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย	84
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลระบบ IEEE 24 บัส	91
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE 24 บัส	92
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลระบบทดสอบสายส่ง IEEE 24 บัส.....	92
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย.....	95
ตารางที่ ก.5 ข้อมูลระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังประเทศไทย	106
ตารางที่ ก.6 ข้อมูลระบบทดสอบสายส่งไฟฟ้ากำลังประเทศไทย.....	108

บทที่ 1. บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของโครงร่างวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงร่างวิทยานิพนธ์ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับโครงร่างวิทยานิพนธ์และเนื้อหาของโครงร่างวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง (Electrical Power System) มีหลากหลายเงื่อนไขในการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งประกอบด้วยระบบหลัก 3 ส่วนคือ ระบบผลิต (Generation System) ระบบส่ง (Transmission System) และระบบจำหน่าย (Distribution System) ระบบที่สำคัญที่นำมาวิเคราะห์ในทางปฏิบัติในอีกแง่หนึ่งก็คือระบบสายส่ง (Transmission System) มีส่วนประกอบหลักสองส่วนคือ ส่วนที่จ่ายไฟให้ผู้ใช้ไฟฟ้าคือ สายป้อนปฐมภูมิ (Primary Feeder) และสายป้อนทุติยภูมิ (Secondary Feeder) ซึ่งในการแก้ปัญหาทางด้านสายส่งเหล่านั้นโดยส่วนมากเราจะใช้การวิเคราะห์การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้ารูปแบบสมการพลังงาน (Power Flow Equation) ประกอบการพิจารณาค่าตัวแปร (Parameter) ได้แก่ บัส (Buses) จุดโหลด (Load Point) ซึ่งจะให้ผลออกมาในรูปของผลกระแสที่ไหลอยู่ในสายส่ง (Transmission Line Flow) ความต่างของแรงดันที่บัสต่างๆ ทุกค่าที่ออกมาต้องสามารถเป็นที่ยอมรับได้ว่าเป็นสภาวะการทำงานที่เป็นปกติ โดยต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power loss) และแรงดันตก (Voltage Drop) ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่นิยมคือ ทฤษฎีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson) แต่ถึงอย่างไรก็ตามในระบบไฟฟ้ากำลังก็มีข้อจำกัดหลายประการ หนึ่งในนั้นคือเงื่อนไขการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ในแต่ละวันโดยมีอุปสรรคที่เกิดขึ้นเป็นประจำคือ การละเมิดแรงดันทำให้เกิดแรงดันเกิน (Violation of Bus Voltage) และการเกิดกำลังไฟฟ้าเกินในระบบสายส่ง (Over load of Transmission Line)

นอกเหนือจากนั้นการเพิ่มขึ้นของโหลดก็ยังสามารถถูกจำกัดได้โดยจุดวิกฤต (Critical Point) โดยที่จุดวิกฤตต้องมีความเสถียรของระดับแรงดัน (Steady-state Voltage Stability) [1], [2] ดังนั้นการกำหนดจุดขอบโหลดที่ระบบรองรับได้ให้สามารถทำงานได้ตามปกติ (Load Margin Receive) ต้องพิจารณาและวิเคราะห์อย่างละเอียดถี่ถ้วนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่ที่มี

ค่าตัวแปรต่างๆเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์จุดขอบโหลดที่ระบบรองรับได้ (Load Margin) มากขึ้นตามไปด้วย โดยพิจารณาความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) ที่สะท้อนค่าพลังงานสองส่วนคือ กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) เพื่อพิจารณาความสามารถในการส่งผ่านพลังงานผ่านคู่แหล่งกำเนิดและโหลด (Source-sink Pair) โดยการหาความสามารถในการส่งผ่านพลังงาน (Available Transfer Capability) และการใช้ทฤษฎีคำนวณหาความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ [3], [4]

จากที่กล่าวมาข้างต้นจุดทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้ เป็นการประเมินเงื่อนไขความสามารถในการรองรับโหลดที่เพิ่มขึ้น ของระบบจากจุดทำงานปกติเดิมไปจนถึงจุดการทำงานสูงสุดที่ระบบสามารถรองรับได้ ซึ่งการกำหนดจุดขอบโหลดที่ระบบรองรับได้สามารถหาได้จากหลายเป็นทฤษฎี [5], [6], [7] ได้แก่ Repeated Power Flow: RPF, Continuation Power Flow: CPF, Optimal Power Flow: OPF บทพื้นฐานในการต่อยอดการแก้ปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน (Volt/VAr Control) ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานเพื่อกำหนดจุดขอบโหลดที่ระบบรองรับได้ ซึ่งเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงจัดการ (Combinatorial Optimization Problem) ซึ่งมีลักษณะที่มีรูปแบบที่เฉพาะเจาะจง ประกอบด้วยตัวแปรที่ทราบค่า (Known Variables) ตัวแปรไม่ทราบค่า (Unknown Variables) ซึ่งต้องใช้ทฤษฎีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) มาพิจารณา ในรูปแบบของตัวแปรต่อเนื่อง (Continuous Variables) และตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (Discrete Variables) ซึ่งโดยทั่วไปจุดขอบโหลดที่ระบบรองรับได้นั้น จะแสดงถึงจุดทำงานสูงสุดเฉพาะ ซึ่งจุดนั้นจะแสดงถึงทิศทางการเปลี่ยนไปของโหลด (Load) ในทางปฏิบัติจุดขอบโหลดที่ระบบรองรับได้อาจมีหลายค่า ขึ้นอยู่กับทิศทางของโหลด

การทำงานของอุปกรณ์กำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power Devices) สามารถเปลี่ยนเงื่อนไขการทำงานของโหลดได้ อาจส่งผลให้การทำงานของจุดขอบโหลดที่ระบบรองรับได้เปลี่ยนไป ซึ่งในการคำนวณต้องพิจารณาการทำงานของระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) ซึ่งส่งผลให้เกิดเป็นอนุพันธ์ที่ไม่สามารถทราบค่าได้ (Non-differentiable) จึงมีช่วงของการค้นหาของปริภูมิ (Search Space) ที่มากขึ้นดังนั้นวิธีแบบดั้งเดิมคือ ความสามารถในการส่งผ่าน (Available Transfer Capability) จะมีความแม่นยำและใช้เวลาน้อยต่อเมื่อจำนวนบัสไม่มาก แต่หากเป็นระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ระบบที่พิจารณาจะมีส่ายโอนพลังงานที่มากตามไปด้วยจึงจำเป็นต้องหาวิธีการเฉพาะ โดยมีขั้นตอนอย่างเป็นระบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทั่วไป (Conventional Optimization Algorithm) เพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการกำหนดค่าการส่งผ่านพลังงาน ซึ่งเรียกอย่างย่อว่าวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) [8] มาใช้แก้ปัญหาในการจัดการจำลองหาเหตุการณ์ความไม่แน่นอนของระบบ (Contingency) หากมีการปลดวงจรของระบบไฟฟ้าโดยสายส่ง โดยการทำงาน

ของกลุ่มอนุภาคจะสามารถหาผลเฉลยของจำนวนสายส่ง ตำแหน่งของบัส (ตำแหน่งของสายที่น้อยที่สุดที่ระบบสามารถอนุญาตให้มีการปลดออกจากระบบได้) เพื่อยังคงสามารถรักษาสภาวะการทำงานให้มีความเสถียรและเป็นไปตามเงื่อนไขที่มีความซับซ้อนได้อย่างน่าพอใจ มีความรวดเร็วในการค้นหาช่วงคำตอบของปริภูมิที่ทำให้การหาผลเฉลยมีการลู่เข้าคำตอบที่น่าพอใจ ปัจจุบันมีวิธีการในการหาผลเฉลยโดยใช้การวิหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมีหลายหลายวิธี ซึ่งหนึ่งในวิธีการที่นิยมและมีการยอมรับมากที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลังคือวิธีการกลุ่มอนุภาค เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาผลเฉลยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังในเชิงวิเคราะห์แบบคณิตศาสตร์ (Mathematical Algorithms) เป็นที่ยอมรับและนำไปประยุกต์ใช้ได้

ความหลากหลายของจุดขอบโหนดที่ระบบรองรับได้สามารถอธิบายผ่านรูปแบบการรักษาเสถียรภาพขอบเขตการทำงานของระบบ ที่มีช่องว่างหาปริภูมิหลากหลายมิติประกอบด้วย การเพิ่มหรือลดจำนวนบัส การตั้งค่าแรงดันในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และปริมาณการส่งผ่านพลังงานในแต่ละบัส เป็นต้น [9] ผลเฉลยของการค้นหาตัวแปรจะเป็นจุดเรียงติดต่อกันจนเกิดเส้นขอบ โดยเส้นขอบนั้นจะแสดงการรักษาสมดุลจุดขอบโหนดที่ระบบรองรับได้ ถูกแสดงออกมาในรูปแบบของจุดหลายๆจุดติดต่อกันจนเกิดเส้นขอบซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งได้ จุดที่ทำงานอยู่ภายในเส้นขอบปริภูมิคือจุดขอบโหนดที่ระบบรองรับได้ ถึงอย่างไรก็ตามเส้นขอบเขตความปลอดภัยของระบบ (The Boundary of Security Regions) สามารถย่อหรือขยายได้ขึ้นอยู่กับตัวแปรในระบบ เพื่อที่จะครอบคลุมการชี้วัดจุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้ งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะพัฒนาทฤษฎีในการกำหนดค่าขอบเขตความปลอดภัยของระบบภายใต้เงื่อนไข การสังเกตความสามารถในการส่งผ่านของคู่แหล่งกำเนิดและโหนด โดยแบ่งออกเป็นหลายประเภทได้แก่ บริเวณที่ไม่สามารถแก้ปัญหาได้ (Unsolvable Region) บริเวณที่เป็นไปไม่ได้ (Infeasible Region) และบริเวณที่เป็นไปได้ (Feasible Region) CHULALONGKORN UNIVERSITY

บริเวณที่ไม่สามารถแก้ปัญหาได้คือบริเวณที่เซตจุดการทำงานการหาผลเฉลยของกำลังไฟฟ้าไม่ได้อยู่บริเวณนั้น บริเวณที่เป็นไปไม่ได้คือ บริเวณที่เซตจุดการทำงานการหาผลเฉลยของกำลังไฟฟ้าอยู่บริเวณนั้น แต่มีอย่างน้อยหนึ่งจุดถูกจำกัดเพราะละเมิดเงื่อนไข บริเวณที่เป็นไปได้คือ บริเวณที่เซตจุดการทำงานการหาผลเฉลยของกำลังไฟฟ้าอยู่บริเวณนั้นทั้งหมด บริเวณที่เป็นไปไม่ได้กับบริเวณที่เป็นไปได้ทั้งหมดรวมกันถูกเรียกว่าบริเวณที่สามารถหาค่าได้ (Solvable Region) [9], [10], [11], [12], [13] ทฤษฎีที่ใช้ในการกำหนดขอบการทำงานของบริเวณที่หาค่าได้เป็นพื้นฐานของกระบวนการเรื่อง ตัวทำนาย-ตัวแก้ไขให้ถูกต้องมีหาผลเฉลยการแก้ออยขอบเขตที่สามารถหาค่าได้ เรียกว่า “ทฤษฎีการต่อเนื่อง” (Continuation Method) มีจุดประสงค์อธิบายอยู่ใน [14] ทฤษฎีการต่อเนื่องคือการทำนายจุดการทำงานต่อไปของเส้นสมมติ หรือลูกศรสมมติแสดงปริมาณและทิศทาง (Vector) ต่อไปซึ่งสัมพันธ์กันที่จุดหนึ่งของเส้นตรงหรือเส้นโค้งแต่ไม่ตัดกัน (Tangent) จากนั้นจะทำ

การเก็บค่าจุดที่ทำนายไปเรื่อยๆ จนเกิดเป็นขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้คือ บริเวณที่มีผลเฉลย การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นเมตริกซ์แบบจาโคเบียนเอกพจน์ (Singular Jacobian Matrix) [15], [16], [17] ซึ่งจุดขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้จะต้องตอบสนองตามสมการเชิงเส้นที่ประกอบด้วย สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Equation) และสมการที่สอดคล้องกับเงื่อนไขเมตริกซ์ จาโคเบียนเอกพจน์

องค์ประกอบปัจจัยหลักของทฤษฎีการแกะรอยขอบเขตคือ การกำหนดจุดที่ทำให้เกิดขอบ และมีการทำนายล่วงหน้าว่าจุดใดจะเกิดตำแหน่งไหน จะเกิดขึ้นต่อไปได้โดยใช้ทฤษฎีการต่อเนื่องกัน [14] เป็นตัวกำหนดจุดขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้ พิสูจน์โดยใช้ระบบสมการเชิงเส้น ต่อเนื่อง ซึ่งจุดขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้ สามารถกำหนดได้อีกหลากหลายทฤษฎีที่สามารถ หาผลเฉลยแบบลู่เข้าสู่คำตอบเช่น ทฤษฎีการหาค่าเข้าใกล้ที่น้อยที่สุด (The minimization approach) [9] เพื่อหาจุดขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้โดยการหาค่าระยะทางที่น้อยที่สุดแบบ ยูคลิด (Euclidean Distance) จากจุดข้างนอกขอบเขตบริเวณมายังจุดภายในบริเวณที่สามารถหาค่า ได้ ซึ่งจากทฤษฎีที่กล่าวมาสามารถนำมาปรับใช้ให้เข้ากับกระบวนการแกะรอยขอบเขตเพื่อหาจุด บริเวณที่สามารถหาค่าได้ (The boundary Tracing Process) [18] ถึงอย่างไรก็ตามทฤษฎีการแกะ รอยขอบเขต [14] และ [18] ไม่ได้เน้นเฉพาะแค่การหาผลเฉลยขอบเขตเพื่อกำหนดจุดการทำงาน เฉพาะที่เท่านั้น หรือบริเวณที่เป็นไปได้ การกำหนดบริเวณความปลอดภัยได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ สำหรับการส่งผ่านพลังงานระหว่างคู่แหล่งกำเนิดและโหลดในระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อวิเคราะห์ทฤษฎีการแกะรอยขอบเขตของบริเวณที่เป็นไปได้ ภายใต้เงื่อนไขความสามารถ ในการโอนถ่ายระหว่างแหล่งกำเนิดและโหลด
- 2) หาขอบเขตความไม่แน่นอนของระบบ (Contingency) โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคประยุกต์เข้ากับ ทฤษฎีความสามารถในการโอนถ่ายพลังงานไฟฟ้าในสายส่ง (Available Transfer Capability)
- 3) เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีประสานการทำงานระหว่างความสามารถในการโอนถ่ายพลังงานใน สายส่งกับวิธีกลุ่มอนุภาคในการทำงานหรือสำหรับการควบคุมขอบเขตเสถียรภาพของระบบ

1.3 ขอบเขตโครงร่างวิทยานิพนธ์

- 1) ระบบที่พิจารณาคือ IEEE 24-bus และระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย
- 2) ระบบไฟฟ้าในการพิจารณาเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล (Balanced)
- 3) พิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังที่มีสถานะการทำงานคงตัว (Steady State)
- 4) การศึกษานี้จะไม่พิจารณาปัจจัยตัวแปรดังต่อไปนี้
 - 4.1) ไม่คิดผลของการเกิดเรโซแนนซ์ (Resonance)
 - 4.2) ไม่คิดผลของความถี่ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) ในภาวะปรกติ
 - 4.3) ไม่คิดผลกระทบหรือกำลังความสูญเสียที่มาจากสายส่ง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาบทความทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงร่างวิทยานิพนธ์ ดังนี้
 - 1.1) การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบสายส่ง
 - 1.2) การวางแผนค่าที่เหมาะสมที่สุดของกำลังไฟฟ้าเสมือนซึ่งส่งผลต่อการชดเชยกำลังไฟฟ้าในสายส่ง
 - 1.3) วิธีการพื้นฐานของการนำไปใช้ของกลุ่มอนุภาคเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล
 - 1.4) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของขนาดและตำแหน่งโดยวิธีกลุ่มอนุภาค
 - 1.5) ศึกษาวิเคราะห์การไหลกระแสอย่างต่อเนื่องในเครื่องมือเพื่อให้ระบบคงเสถียรภาพ
 - 1.6) ความสามารถในการส่งผ่านพลังงานและการกำหนดลักษณะการทำงาน
 - 1.7) คุณสมบัติและขอบเขตความสามารถในการส่งผ่านพลังงาน
 - 1.8) ศึกษาความสามารถในการส่งผ่านพลังงานโดยประยุกต์เข้ากับวิธีการอื่นๆ
 - 1.9) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบริเวณช่วงการทดสอบของการไหลกระแส
- 2) ศึกษาวิธีการคำนวณโดยใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น วิธีการไหลอย่างต่อเนื่องของกำลังไฟฟ้า (CPF)
- 3) สร้างแบบจำลองและสมการทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกราดออกของสายส่งในแต่ละเส้น
- 4) นำทฤษฎีความสามารถในการส่งผ่านพลังงานมาประยุกต์เข้ากับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีกลุ่มอนุภาคในระบบสายส่ง
- 5) ทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด
- 6) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงร่างวิทยานิพนธ์

- 1) การแสดงรูปแบบผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการแกะรอยขอบประยุกต์ร่วมกับวิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบการส่งผ่านพลังงานให้สอดคล้องกับสภาพการผลิตและการบริโภคพลังงานโดยมีเงื่อนไขบังคับ
- 2) วิธีการแสดงผลสำหรับระบบขนาดใหญ่เพื่อการคำนวณที่หาจุดลิมิตของระบบสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลังโดยระบุทั้งจำนวนและตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์ปลดสายออก

1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับโครงร่างวิทยานิพนธ์

งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 หัวข้อหลัก คือ 1) การกำหนดบริเวณที่เป็นไปได้ของโหลดด้วยวิธีการตามรอยขอบเขต 2) การวางแผนและการดำเนินงานที่เหมาะสมของการจัดการกำลังรีแอกทีฟในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

บทที่ 1. การกำหนดบริเวณที่เป็นไปได้ของโหลดด้วยวิธีการตามรอยขอบเขต

ในบทความวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการใช้ทฤษฎีในการกำหนดขอบเขตบริเวณที่แบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ บริเวณที่หาค่าไม่ได้ บริเวณที่เป็นไปได้และบริเวณที่เป็นไปไม่ได้ ซึ่งทั้ง 3 ขอบเขตจะจะให้ผลการกำหนดจุดวิกฤตของความเสถียรภาพในระบบที่แตกต่างกันออกไป แบ่งการพิจารณากำลังไฟฟ้าออกเป็นแกนกำลังไฟฟ้าจริงและแกนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งปัญหาของวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นวิเคราะห์การออกแบบและการตรวจสอบความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากพื้นที่กำลังการผลิตไปยังพื้นที่บริโภคพลังงานใดๆ แบ่งการทดลองเป็นลักษณะต่างๆจาก ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดเล็กไปหาระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อพิจารณาความแตกต่างและความสามารถการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นว่าสามารถแก้ไขปัญหาได้ตรงจุด ทั้งนี้วิธีการที่นำเสนอจะใช้กระบวนการตามรอยขอบเขตในการระบุจุดการทำงานวิกฤตของระบบที่ทำการทดสอบในบริเวณที่เป็นไปได้ของการบริโภคพลังงานด้วยการหาระยะทางที่สั้นที่สุดเพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณให้มากที่สุดแต่ค่าได้คำตอบพอใจมากที่สุด ระยะที่ใช้พิจารณาจากจุดบริเวณที่เป็นไปไม่ได้ให้วิ่งเข้าสู่บริเวณที่เป็นไปได้โดยการติดตามหาขอบเขตด้วยกระบวนการแทนเจนต์เวกเตอร์ ระบบจะพิจารณาระยะทางที่สั้นที่สุดที่เป็นไปได้สลับกันไปจนเกิดจุดแต่ละจุด ดำเนินการลู่จนเกิดวงรอบปิดเกิดเป็นขอบเขตบริเวณที่เป็นไปได้ของโหลดจากจุดหลายๆจุดเรียงติดต่อกัน ระบบที่นำมาพิจารณาในการศึกษานี้ใช้ระบบ IEEE 24 บัส โดยในระยะเริ่มแรกจะทดสอบกับระบบ 2 บัสเพื่อดูผลว่าเกิดความ

น่าพอใจหรือไม่ จากนั้นจึงขยายระบบขึ้นมาเป็น 6 บัส เมื่อผลทดสอบออกมาเป็นที่น่าพอใจแล้วจึงสรุปได้ว่าเครื่องมือทฤษฎีนี้สามารถนำไปใช้ได้กับระบบใหญ่ๆ จึงได้นำไปทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย ซึ่งผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถทำงานได้ดีในระบบแม้จะมีขนาดใหญ่หลายๆ ก็ตาม สามารถกำหนดบริเวณที่เป็นไปได้ของการบริโภคกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไปยังแหล่งปลายทาง ซึ่งขีดจำกัดของการส่งผ่านพลังงานจากต้นทางไปยังปลายทางนี้จะมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้องในการพิจารณาได้แก่ การเพิ่มโหลด การปลดออกของระบบ และการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น ข้อดีของการพิจารณาด้วยวิธีการทฤษฎีนี้จะดีกว่าคือจะเห็นข้อจำกัดและความเป็นไปได้ของโหลดอย่างชัดเจนมากกว่าวิธีการกำหนดขอบเขตของระบบแบบเก่า ซึ่งการกำหนดขอบเขตการส่งผ่านพลังงานแบบเก่าจะใช้วิธีการคำนวณการไหลของกระแสแบบซ้ำ การคำนวณการไหลของกระแสแบบต่อเนื่องเป็นต้น นอกเหนือจากนี้วิธีการใหม่นี้ยังสามารถหาค่าที่ออกนอกขอบเขตเพื่อพิจารณาหาพารามิเตอร์ที่สนใจได้อีกด้วย

บทความงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องมือสำหรับกำหนดการส่งผ่านพลังงานในสายส่ง วิธีการที่ใช้ขึ้นอยู่กับตัวดำเนินการแก้ไขและตัวทำนาย การกำหนดขอบเขตจะเป็นประโยชน์ในการลดปัญหาของระยะทางจากในกรณีที่ไม่สามารถทำได้ โดยวิธีการตามรอยขอบจะประกอบด้วยชุดของคำสั่งที่สร้างไว้ตามขั้นตอนสำหรับป้องกันความล้มเหลวในกระบวนการสืบค้นกลับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการทำนายเสนอสามารถทำได้ในการมองเห็นขอบเขตของการส่งผ่านพลังงานในรูปแบบของจุดที่ได้รับการตรวจสอบค่าสูงสุดของโหลดที่คำนวณโดยวิธีการคำนวณการไหลของกระแสในระบบแบบทำซ้ำ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจุดการบริโภคสูงสุดอยู่ที่เส้นขอบของการส่งผ่านพลังงาน โดยการใช้พื้นที่นี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายโอนข้อมูลเพื่อให้รับทราบถึงศักยภาพในการถ่ายโอนพลังงานผ่านรูปทรงขอบเขตที่เป็นไปได้ นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดขอบเขตที่อยู่ภายนอกสุดเพื่อพิจารณาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีต่อระบบ ปัจจัยในการพิจารณาได้แก่ แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยขอบเขตด้านนอกสุดจะแสดงอัตราการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าหากมีการขยายเนื่องมาจากการตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การแก้ปัญหาบริเวณขอบเขตนอกสุดจะให้แนวทางในการปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์โดยการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บทที่ 2. การวางแผนและการดำเนินงานที่เหมาะสมของการจัดการกำลังรีแอกทีฟในระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

ในบทความจะกล่าวถึงการจัดการกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับการวางแผนและการดำเนินงาน โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบไฟฟ้าจำหน่าย เพื่อหากำลังไฟฟ้าสูญเสีย กำลังไฟฟ้าที่ต้องทำ

การชดเชย และการควบคุมขนาดแรงดันของบัสเพื่อไม่ให้เกิดข้อจำกัดของระบบ การจัดการกำลังไฟฟ้าเสมือนด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการจำลองเหตุการณ์หลายๆ เหตุการณ์มาประกอบในการจัดการปัญหาได้แก่ ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ ปัญหาการควบคุมแรงดัน ซึ่งสองปัญหานี้จะต้องมีวิธีการจัดการกับกำลังไฟฟ้าเสมือน หรือรีแอกทีฟเพาเวอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งทั้งสองปัญหาจะเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงจัดการเพื่อทำให้ระบบยังคงไว้ซึ่งเสถียรภาพ แต่มีการคงไว้ซึ่งปัจจัยบางประการเพื่อหาค่าปัจจัยอื่นๆ ที่สนใจ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมทั่วไปมักจะขาดประสิทธิภาพในการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีความไม่ละเอียดของตัวแปรที่นำมาพิจารณาหรือ พิจารณาไม่ตรงจุดของปัญหาซึ่งไม่สามารถหาคำตอบที่ถูกต้องอย่างแม่นยำได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำวิธีการการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีกลุ่มอนุภาคมาประยุกต์ใช้ เพื่อแก้ไขปัญหาก็กล่าวมาข้างต้น ซึ่งโดยรวมจะกล่าวถึงการแก้ไขปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุที่พออย่างไรให้จำนวนมีความเหมาะสมกับระบบ เพื่อให้แรงดันในระบบไม่เกินค่าขีดจำกัด และปัญหาการควบคุมแรงดันโดยพิจารณาการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน เนื่องจากปริมาณการค้นหาคำตอบของปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นทั้งสองรูปแบบมีปริมาณการหาค่ายอดหลายยอดของผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดกระจายอยู่หลายช่วงปริมาณการค้นหา การใช้วิธีพื้นฐานทั่วไปอาจจะทำให้ได้คำตอบไม่ครบตามความเป็นจริง และไม่มีกรเปรียบเทียบคำตอบว่าค่าไหนเหมาะสมที่สุด ซึ่งอาจจะทำให้ไม่สามารถหลุดรอบการคำนวณจากการหาผลเฉลยได้เฉพาะที่จุดใดจุดหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีค่าฟังก์ชันจุดประสงค์มีบริเวณการค้นหาคำตอบที่กว้างทำให้ค่ายอดในค้นหาคำตอบเพิ่มปริมาณมากขึ้นด้วยหรือมีความแตกต่างของค่าผลเฉลยเพียงเล็กน้อยก็จะไม่สามารถค้นค่าที่เหมาะสมที่สุดออกมาได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคในการวิ่งหาค่าผลเฉลยแบบเป็นช่วงเพราะมีการปรับตัวเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว โดยการกระตุ้นให้กลุ่มอนุภาคสามารถไปหาผลเฉลยในบริเวณช่วงปริมาณอื่นได้เพื่อให้ได้คำตอบออกมาดีที่สุด วิธีการกระตุ้นแบ่งออกเป็นสองวิธีคือ วิธีแรกเมื่อถึงรอบการคำนวณที่กำหนดให้มีการกระตุ้นหนึ่งครั้ง วิธีที่สองคือเมื่อมีการคำนวณไปเรื่อยๆ แล้วฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงครบตามจำนวนรอบที่กำหนด ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่าผลเฉลยจะหาค่าที่เหมาะสมที่จุดขึ้นกับจำนวนรอบและจำนวนการกระตุ้นที่เหมาะสม การพัฒนาจึงเน้นรูปแบบของการวางแผนการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนดัดใช้เครื่องมือต่างๆ อาทิตัวชดเชยวาร์แบบสถิตและตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการจัดการกับปัญหาลำดับไฟฟ้าเสมือนตามวิธีการประยุกต์ใช้กลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวสามารถปรับปรุงเสถียรภาพและประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้ากำลังให้ดียิ่งขึ้น เมื่อประเมินด้วยเงื่อนไขการส่งจ่ายไฟฟ้าโดยพิจารณาลำดับไฟฟ้าสูญเสียในระบบ และผลประโยชน์ที่ได้จากการคำนึงทางหลักเศรษฐศาสตร์

วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคในการแก้ปัญหาการจัดการกำลังไฟฟ้าเสมือน ข้อดีของวิธีการนี้คือค่าตอนการทำงานค่อนข้างละเอียดมีรอบการคำนวณที่ไม่ยุ่งยาก มีความรวดเร็วในการค้นหาผลเฉลย รวมทั้งมีเสถียรภาพในการลู่เข้าหาผลเฉลย โดยได้พิจารณาผลการศึกษาแบ่งออกเป็นสองกรณีคือกรณีการหาปริภูมิผลเฉลยของการติดตั้งตัวเก็บประจุและปริภูมิการค้นหาของปัญหาการควบคุมแรงดันโดยกำลังรีแอกทีฟซึ่งจากกรณีการศึกษาทั้งสองกรณีพบว่าอนุภาคจะลู่หาคำตอบที่ดีที่สุดก็ต่อเมื่อขึ้นอยู่กับการกระตุ้นที่เหมาะสมและจำนวนอนุภาคที่เหมาะสม ซึ่งจะให้ค่าคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ใกล้เคียงกับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่กำหนดซึ่งมีช่วงปริภูมิที่กว้าง ซึ่งมีผลเฉลยในการลู่เข้าหาคำตอบหลากหลายปริภูมิกระจายอยู่ทั่ววงกว้าง ดังนั้นกระบวนการในการค้นหาแต่ละรอบบางกรณีอาจจะไม่หลุดจากผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่จุดยอดของปริภูมินั้นเพื่อไปค้นหาในปริภูมิอื่น เนื่องจากข้อบกพร่องดังกล่าวจึงได้มีการกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเพื่อทำให้อนุภาคพ้นจากผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ซึ่งทำให้การปรับตำแหน่งทั้งหมดของอนุภาคด้วยการสุ่มสร้างตำแหน่งใหม่ขึ้นมาแทนที่ด้วยความเร็วรอบคำนวณถัดไป

1.7 เนื้อหาของโครงร่างวิทยานิพนธ์

โครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 บท โดยแบ่งเป็นเนื้อหา ดังนี้

- บทที่ 1 บทนำ** จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงร่างวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของโครงร่างวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 วิธีการและทฤษฎีพื้นฐาน** ที่เกี่ยวข้องกับการอธิบายรูปแบบการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงคณิตศาสตร์โดยวิธีกลุ่มอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดจุดขอบเขตขีดจำกัดความต้องการ
- บทที่ 3 การประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาค** กับปัญหาการกำหนดจุดขอบเขตบริเวณที่เป็นไปได้โดยการแทนค่าหาผลเฉลยและวิธีการทดสอบ
- บทที่ 4 ผลการทดสอบ** ได้นำเสนอผลการทดสอบในกรณีต่างๆ เพื่อให้เห็นความแตกต่างระหว่างการส่งผ่านพลังงานระหว่างพื้นที่รวมไปถึงผลเฉลยที่แทนด้วยกลุ่มอนุภาค
- บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ** ได้สรุปผลการทดลองที่ได้จากการศึกษา และข้อเสนอแนะเพื่อ แสดงผลลัพธ์ที่สำคัญของการควบคุมจากบริเวณที่กำหนดเป็นศูนย์กลางส่งผ่านพลังงานไปยังส่วนรับพลังงานบริเวณต่างๆ และการควบคุมพลังงานและหาผลลัพธ์โดยกลุ่มอนุภาค

บทที่ 2.

ทฤษฎีพื้นฐานของการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยวิธีกลุ่มอนุภาคและการกำหนดจุดขอบเขต

โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการตรวจสอบระบบไฟฟ้ากำลังจะมีวิธีการหลักเกณฑ์ในการตรวจสอบ ซึ่งเงื่อนไขในการพิจารณาต้องสามารถพิสูจน์ตัวแปรทุกตัวในระบบว่าอยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดของตนเอง การระบุข้อจำกัดของโหลดเพื่อหาการเพิ่มขึ้นภายใต้เงื่อนไขให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดเพื่อยังคงรักษาไว้ซึ่งความเสถียรของระบบ สำหรับความสามารถในการพิสูจน์ของระดับการบริโภคของผู้ใช้ไฟฟ้าต้องมีน้อยกว่าจุดบริเวณที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขการไหลของกระแสเอกพจน์จาโคเบียนเมตริกซ์ ในบริเวณที่เป็นไปได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวแปรทุกตัวในระบบ เช่น ระดับแรงดันและการไหลของกระแส ต้องทำงานสอดคล้องกันโดยไม่ละเมิดขีดจำกัดของระบบ ทฤษฎีที่รองรับการกำหนดเงื่อนไขข้อจำกัดของระบบ พื้นฐานส่วนมากมาจากสมการการไหลของกระแส ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของสมการการไหลกระแสไฟฟ้าโดยใช้แนวคิดวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยกลุ่มอนุภาคและการกำหนดจุดขอบเขตขีดจำกัดของระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 ความเป็นมาของวิธีการกลุ่มอนุภาค

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีการกลุ่มอนุภาคจะมีพฤติกรรมเหมือนกับสัตว์ที่อยู่รวมกันเป็นฝูง มีผู้นำของฝูงซึ่งจะเป็นตัวคอยบอกเหตุการณ์ความเป็นไป ซึ่งในแต่ละฝูงนั้นสมาชิกในกลุ่มจะทำการหาสิ่งที่ดีที่สุดแล้วสื่อสารต่อกัน เพื่อให้สมาชิกเคลื่อนตามกันไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งในทิศทางนั้นอาจจะเป็นทิศทางที่ดีที่สุด แล้วเมื่อนั้นในสมาชิกได้เรียนรู้พฤติกรรมบางอย่างที่มีการเรียนรู้ใหม่ๆเกิดขึ้นแล้ว สมาชิกในกลุ่มจะทำการปรับตัวเข้าหากันเพื่อให้ได้เส้นทางหรือวิธีการที่ดีที่สุด การเรียนรู้พฤติกรรมของกันและกันและมีการปรับตัวนี้เรียกว่า เซาว์ปัญญาเชิงกลุ่ม แนวคิดนี้จะยกตัวอย่างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อเปรียบเสมือนฝูงสัตว์คือมีการแลกเปลี่ยนประสบการณ์สิ่งต่างๆที่ได้เรียนรู้มาจากสิ่งแวดล้อมต่อกันและกันเพื่อให้ได้เป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดในกลุ่มของตนเอง โดยวิธีการกลุ่มอนุภาคนี้เป็นวิธีการที่ แต่ละอนุภาค (Particle) ที่อยู่ในกลุ่มของตนพยายามเรียนรู้ข้อมูลจากประสบการณ์ของอนุภาคอื่นเพื่อพยายามปรับเปลี่ยนทิศทาง สื่อสารกันเพื่อเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ดีที่สุดในการค้นหานั้น วิธีกลุ่มอนุภาคถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อแก้ปัญหาทางด้าน

วิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค

กลุ่มอนุภาคจะทำงานร่วมกันโดยการอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม ซึ่งแต่ละตัวจะมีทั้งตำแหน่ง (Position) และความเร็ว (Velocity) ของตัวเองอยู่เพื่อทำการวิ่งลู่เข้าหาคำตอบในปริภูมิของตนเอง อนุภาคทุกตัวจะมีการสื่อสารกันเพื่อพยายามปรับความเร็วและตำแหน่งของตนเองให้สอดคล้องกับอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปยังทิศทางและตำแหน่งที่ดีที่สุด ทั้งนี้ในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ได้จากการคำนวณกันทางเวกเตอร์คือตำแหน่งเดิมมารวมกับค่าความเร็วของอนุภาค ตำแหน่งต่างๆคือผลเฉลยทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะเกิดจากการพิจารณาสองส่วนคือ ฟังก์ชันจุดประสงค์และค่าของตัวแปรตัดสินใจ ความเร็วของอนุภาคคือข้อมูลที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเกิดจากการสะสมของระยะความเร็ว เริ่มต้นจนสิ้นสุดความเร็วในรอบการคำนวณนั้นเพื่อปรับค่าตัวแปรตัดสินใจให้หาตำแหน่งผลเฉลยที่ดีที่สุด

ในการหาผลเฉลยของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในปริภูมิการค้นหาจะประกอบไปด้วย การพิจารณาเงื่อนไขทางคณิตศาสตร์ซึ่งเราเรียกว่า ตัวแปรตัดสินใจ ซึ่งตัวแปรตัดสินใจนี้จะสมมติให้มีจำนวน D ตัวในปริภูมิการค้นหาจึงสามารถสร้างเมตริกซ์ในการค้นหาปริภูมิที่มีตัวแปรตัดสินใจขนาด D มิติ (D-dimensional Search Space) กำหนดให้อนุภาคที่วิ่งหาผลเฉลยในปริภูมิมีขนาดจำนวน n ตัวแปร โดยมีระยะเวลาในการเคลื่อนที่นับเป็นจำนวนรอบที่ t โดยในแต่ละรอบจะพิจารณาค่าแห่งที่ขึ้นกับเวลาเป็น X^t และพิจารณาความเร็วที่ขึ้นกับเวลาเป็น V^t จึงสามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$X^t = \begin{bmatrix} X_1^t \\ X_2^t \\ \dots \\ X_i^t \\ \dots \\ X_n^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11}^t & X_{12}^t & \dots & X_{1d}^t & \dots & X_{1D}^t \\ X_{21}^t & X_{22}^t & \dots & X_{2d}^t & \dots & X_{2D}^t \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i1}^t & X_{i2}^t & \dots & X_{id}^t & \dots & X_{iD}^t \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1}^t & X_{n2}^t & \dots & X_{nd}^t & \dots & X_{nD}^t \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

$$V^t = \begin{bmatrix} V_1^t \\ V_2^t \\ \dots \\ V_i^t \\ \dots \\ V_n^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{11}^t & V_{12}^t & \dots & V_{1d}^t & \dots & V_{1D}^t \\ V_{21}^t & V_{22}^t & \dots & V_{2d}^t & \dots & V_{2D}^t \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{i1}^t & V_{i2}^t & \dots & V_{id}^t & \dots & V_{iD}^t \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{n1}^t & V_{n2}^t & \dots & V_{nd}^t & \dots & V_{nD}^t \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลต่อกันของแต่ละอนุภาคในปริภูมิ โดยการสื่อสารแลกเปลี่ยนในระยะปริภูมิตัวเองกำหนดให้เป็น P_{best}^t (Personal Best Position) คือตำแหน่งที่ดีที่สุดของตนเองในปริภูมินั้น และตัวแปร G_{best}^t (Global Best Position) คือตำแหน่งที่ดีที่สุดจากปริภูมิทั้งหมดที่ต้องการวิงหาคำตอบ สามารถกำหนดนิยามสมการได้เป็น

$$P_{best}^t = \begin{bmatrix} P_{best_1}^t \\ P_{best_2}^t \\ \dots \\ P_{best_i}^t \\ \dots \\ P_{best_n}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{best_{11}}^t & P_{best_{12}}^t & \dots & P_{best_{1d}}^t & \dots & P_{best_{1D}}^t \\ P_{best_{21}}^t & P_{best_{22}}^t & \dots & P_{best_{2d}}^t & \dots & P_{best_{2D}}^t \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{best_{i1}}^t & P_{best_{i2}}^t & \dots & P_{best_{id}}^t & \dots & P_{best_{iD}}^t \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{best_{n1}}^t & P_{best_{n2}}^t & \dots & P_{best_{nd}}^t & \dots & P_{best_{nD}}^t \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$G_{best}^t = \begin{bmatrix} g_{best_1}^t & g_{best_2}^t & \dots & g_{best_d}^t & \dots & g_{best_D}^t \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

ในการพิจารณาจากค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ สำหรับปัญหาการหาค่าต่ำสุด $P_{best_i}^t$ และ $G_{best_i}^t$ สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$P_{best_i}^t = \begin{cases} P_{best_i}^{t-1} & \text{if } f(X_i^t) \geq f(P_{best_i}^{t-1}) \\ X_i^t & \text{if } f(X_i^t) < f(P_{best_i}^{t-1}) \end{cases} \quad (2-5)$$

$$G_{best_i}^t \in \{P_{best_1}^t, P_{best_2}^t, \dots, P_{best_i}^t, \dots, P_{best_n}^t\} \quad \text{When}$$

$$f(G_{best}^t) = \min \{f(P_{best_1}^t), f(P_{best_2}^t), \dots, f(P_{best_i}^t), \dots, f(P_{best_n}^t)\} \quad (2-6)$$

จาก (2-5) อธิบายว่า $P_{best_i}^t$ จะมีค่าเท่ากับ $P_{best_i}^{t-1}$ ก็ต่อเมื่อค่าฟังก์ชันของจุดประสงค์ X_i^t (ตำแหน่งของอนุภาคตัวที่ i ในรอบการคำนวณที่ t) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของ $P_{best_i}^{t-1}$ แต่ถ้าฟังก์ชันจุดประสงค์ของ X_i^t มีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของ $P_{best_i}^{t-1}$ ก็กำหนดให้ X_i^t เป็น $P_{best_i}^t$ ส่วน (2-6) เป็นการกำหนดค่า G_{best}^t โดยเลือกจาก $P_{best_i}^t$ ซึ่งกำหนดให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์น้อยที่สุด

วิธีการพื้นฐานในการใช้วิธีกลุ่มอนุภาคจะต้องมีค่าเริ่มต้นจากกลุ่มอนุภาค (Initial Swarm) ซึ่งจะต้องกำหนดตำแหน่งและความเร็วเริ่มต้นด้วยสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีที่นิยมคือการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาคด้วยการสุ่ม สร้างค่าสุ่มในแต่ละมิติ (Randomly Generate) ของแต่ละอนุภาคโดยกำหนดให้มีค่าขอบบนและขอบล่างของมิตินั้นร่วมกับตัวเลขสุ่ม (Random Number) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งสามารถเขียนสมการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและความเร็วได้ดังนี้

$$X_{id}^0 = X_d^{(L)} + r_{id}(X_d^{(U)} - X_d^{(L)}), \quad \forall_i = 1, \dots, n, \forall_d = 1, \dots, D \quad (2-7)$$

ในระยะเริ่มต้นต้องกำหนดให้อนุภาคทั้งหมดมีความเร็วเท่ากับศูนย์ทำให้อนุภาคเริ่มต้นอยู่ที่สถานะหยุดนิ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_{id}^0 = 0, \quad \forall_i = 1, \dots, n, \forall_d = 1, \dots, D \quad (2-8)$$

กำหนดให้ค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาคในตอนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ P_{best}^0 ซึ่งมีค่าเท่ากับตำแหน่งของอนุภาคตอนเริ่มต้นจากนั้นจึงกำหนดค่า G_{best}^0 โดยพิจารณาจากค่า P_{best}^0 สามารถเขียนสมการตำแหน่งเริ่มต้นได้ดังนี้

$$P_{best_{id}}^0 = X_{id}^0, \quad \forall_i = 1, \dots, n, \forall_d = 1, \dots, D \quad (2-9)$$

การปรับตำแหน่งของอนุภาคจะต้องมีค่าความเร็วเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการคำนวณรอบปัจจุบัน (Current Iteration) ไปยังการคำนวณรอบต่อไป (Next Iteration) สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$V^{t+1} = V^t + c_1 r_1^t (P_{best}^t - X^t) + c_2 r_2^t (G_{best_{aug}}^t - X^t) \quad (2-10)$$

$$V_{id}^{t+1} = V_{id}^t + c_1 r_{1d}^t (P_{best_{id}}^t - X_{id}^t) + c_2 r_{2d}^t (G_{best_{id}}^t - X_{id}^t) \quad (2-11)$$

c_1 และ c_2 ในสมการทั้งสองคือสัมประสิทธิ์ความเร่ง (Acceleration Coefficient) หรือค่าคงตัวความเร่ง (Acceleration Constant) ส่วน $r_1^t, r_{1d}^t, r_2^t, r_{2d}^t$ คือตัวเลขสุ่มที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งใช้สำหรับการดำเนินการสุ่มหาด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคและ $G_{best_{aug}}^t$ คืออนุภาคซึ่งมีตำแหน่งดีที่สุดที่ถูกเพิ่มขนาดปรากฏ (Augmented) เพื่อเพิ่มในการคำนวณรอบถัดไป นอกจากนั้นแล้วความเร็วของอนุภาคจะเกิดจากผลรวมของส่วนประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ตัวแปร V^t หมายถึงความเฉื่อย (Inertia Component) พิจารณาจากการเก็บค่าความเร็วครั้งก่อนหน้า ส่วนประกอบนี้จะพยายามควบคุมบังคับให้อนุภาคจำการเดินทางในเส้นทางเดิมหรือทิศทางเดิม เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคเปลี่ยนทิศทาง การเคลื่อนที่ไปจากเดิมมากเกินไป ส่วนที่สองคือ $c_1 r_1^t (P_{best}^t - X^t)$ เป็นส่วนประกอบประเภทปัญญานิยม (Cognitive Component) เปรียบเสมือนเป็นสมองสั่งการให้แต่ละอนุภาคจดจำตำแหน่งที่ดีที่สุดของตนเองเอาไว้เพื่อไม่ให้เกิดการเดินทางผิดทิศทาง ซึ่งส่งผลให้อนุภาคยังสามารถเคลื่อนที่ในทิศทางเดิมของตนเองที่ประมวลผลออกมาว่าเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุด และส่วนสุดท้ายคือ $c_2 r_2^t (G_{best_{aug}}^t - X^t)$ คือส่วนประกอบทางสังคม (Social Component) ซึ่งเป็นส่วนบอกอนุภาคที่ตำแหน่งต่างๆให้รู้ว่าอนุภาคที่มีตำแหน่งที่ดีที่สุดอยู่ตำแหน่งใด เนื่องจากอนุภาคที่อยู่ในปริภูมินั้นจะเรียนรู้และเคลื่อนที่ตามทิศทางเดียวกับอนุภาคซึ่งมีตำแหน่งที่ดีที่สุด เมื่อทราบความเร็วและตำแหน่งเคลื่อนที่เริ่มต้นแล้วตำแหน่งของอนุภาคในการคำนวณรอบถัดไปสามารถอธิบายเป็นสมการดังนี้

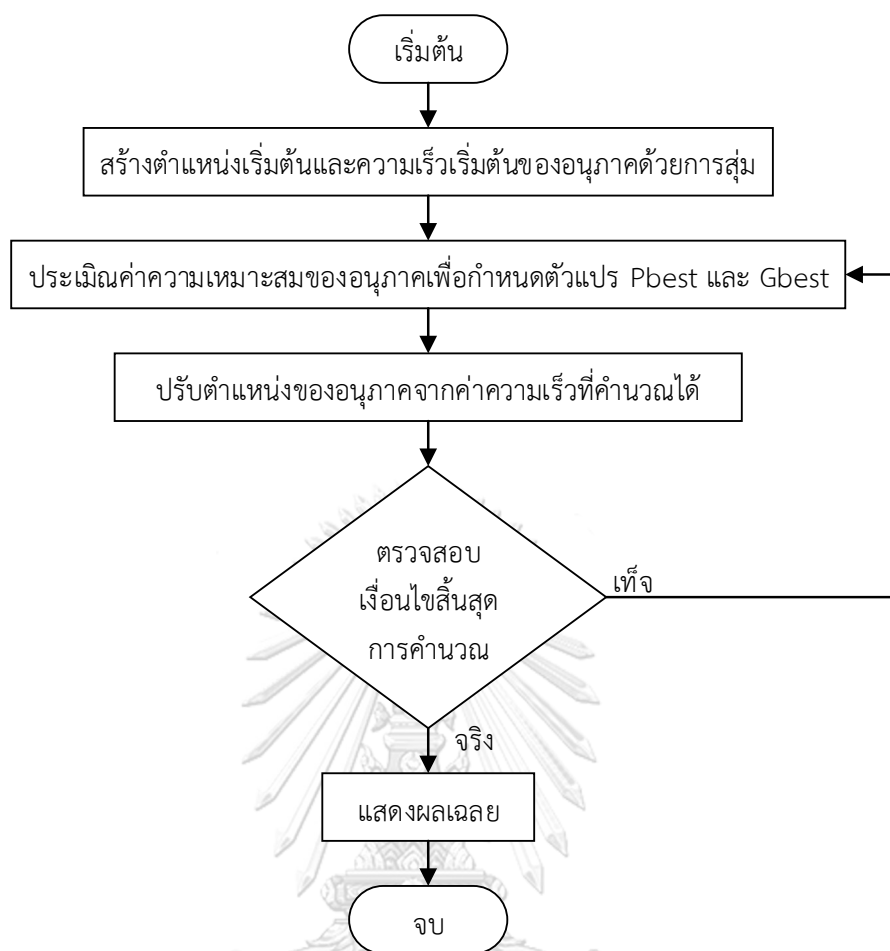
$$X^{t+1} = X^t + V^{t+1} \quad (2-12)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (2-13)$$

ขั้นตอนในการคำนวณหาความเร็วในแต่ละรอบจะมีการปรับตำแหน่งของตัวอนุภาคเองด้วย ซึ่งจะวนซ้ำไปเรื่อยๆจนเข้าเงื่อนไขสุดท้ายที่เป็นจริงจึงจะยุติการคำนวณ (Stopping Conditions) ผลของค่า G_{best} ในการคำนวณรอบสุดท้ายจะเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด จะสังเกตได้จากจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดที่กำหนดไว้ จำนวนรอบการคำนวณซึ่งผลเฉลยไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือค่า

ของผลเฉลยที่ลู่เข้าอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ ทั้งนี้ควรเลือกเงื่อนไขตรวจสอบกระบวนการ
ขั้นตอนสุดท้ายให้เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลู่เข้าก่อนกำหนด (Premature
Convergence) โดยทั่วไปเงื่อนไขตัดสินใจในการยุติการคำนวณจะนิยามหาจำนวนรอบสูงสุดของการ
คำนวณ ดังนั้นขั้นตอนหลักของวิธีกลุ่มอนุภาคจะประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกเป็น
ขั้นตอนการสร้างตำแหน่งและกำหนดความเร็วของกลุ่มอนุภาคเริ่มต้น ขั้นตอนที่สองคือการประเมินค่า
ความเหมาะสม (Fitness Value Evaluation) ในแต่ละอนุภาคเพื่อกำหนดค่าตัวแปรตำแหน่งที่ดี
ที่สุดของตนเองในปริภูมิตานั้น P_{best} และตำแหน่งที่ดีที่สุดจากปริภูมิทั้งหมดที่ต้องการวิหาคำตอบ G_{best}
รวมไปถึงขั้นตอนการหาทิศทางและปรับตำแหน่งของอนุภาค โดยค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาค
สามารถพิจารณาได้จากค่าฟังก์ชันจุดประสงค์กับพจน์ลงโทษ (Penalty Term) ในแต่ละอนุภาค คือ
เมื่อผลเฉลยของอนุภาคนั้นเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดโปรแกรมจะคืนค่าบทลงโทษออกมาเท่ากับศูนย์
 แต่ถ้าผลเฉลยของอนุภาคไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดโปรแกรมจะคืนค่าเท่ากับหนึ่งซึ่งจะสะสม
ไปเรื่อยๆ





รูปที่ 2.1 ผังงานสำหรับขั้นตอนวิธีพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค [19]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สิ่งสำคัญในการเลือกใช้วิธีกลุ่มอนุภาคคือการแทนผลเฉลยด้วยอนุภาคจะต้องพิจารณาสองประการคือ ประการแรกจำนวนมิติที่นำมาสร้างหาผลเฉลยของอนุภาคแต่ละตัว ประการที่สอง พารามิเตอร์ที่อยู่ในแต่ละมิติของอนุภาคแสดงค่าอะไร โดยพารามิเตอร์นั้นแทนค่าตัวแปรตัดสินใจอะไรซึ่งพิจารณาจากมิติของอนุภาคนั้นอยู่ในตำแหน่งใด

2.3 การพิจารณาตัวแปรในแต่ละขั้นตอนของวิธีกลุ่มอนุภาค

ตัวแปรที่ต้องกำหนดก่อนเริ่มดำเนินการหาอนุภาคได้แก่ จำนวนตัวอนุภาคที่ต้องใช้ปริภูมิการค้นหา จำนวนรอบการคำนวณมากที่สุดที่จะสามารถหาคำตอบได้ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการ

กำหนดการยุติการคำนวณ และสัมประสิทธิ์ค่าการถ่วงน้ำหนักความเร่ง (C_1, C_2) ตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการพิจารณาพฤติกรรมการค้นหาผลเฉลยในปริภูมิด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

2.3.1 จำนวนตัวอนุภาคในปริภูมิ

เป็นตัวแปรที่ส่งกระทบโดยตรงต่อการค้นหาผลเฉลย เพราะอนุภาคที่มีจำนวนมากเกินไปจะทำให้เวลาที่ทำการค้นหาคำตอบในช่วงปริภูมิใช้เวลาที่มากขึ้นตามไปด้วย แต่จะส่งผลให้พบโอกาสการค้นหาคำตอบที่แม่นยำและถูกต้องมากขึ้นด้วย แต่หากกำหนดตัวอนุภาคที่น้อยเกินไปก็อาจจะทำให้ผลเฉลยที่ได้ไม่แม่นยำเท่าที่ควร ดังนั้นการกำหนดจำนวนอนุภาคที่เหมาะสมจึงจำเป็นในทฤษฎีนี้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าช่วงจำนวนอนุภาคที่เหมาะสมในการค้นหาผลเฉลยในปริภูมิคือ 10 ถึง 50 อนุภาค อย่างไรก็ตามในแต่ละปัญหาการค้นหาผลเฉลยในแต่ละเรื่องในแต่ละการทดลอง ก็มีช่วงปริภูมิในการค้นหาที่ซับซ้อนแตกต่างกัน ดังนั้นการกำหนดอนุภาคจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา (Problem dependent) ซึ่งต้องเลือกให้เหมาะสม

2.3.2 จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ

เป็นตัวแปรที่กำหนดขึ้นหาจุดยุติในการวนรอบการคำนวณ จำนวนรอบการคำนวณที่เป็นจุดยุติการคำนวณเรียกว่า จำนวนรอบการคำนวณสูงสุดซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละลักษณะของปัญหา ถ้าหากพิจารณาเรื่องเวลาที่ใช้การคำนวณน้อยและกำหนดให้จำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณต่ำเกินไป อาจทำให้ขั้นตอนการค้นหาผลเฉลยยุติก่อนที่จะเข้าสู่ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้ ในขณะที่รอบการคำนวณที่มากเกินไปก็อาจจะส่งผลให้การค้นหาผลเฉลยใช้เวลามากเกินไป

2.3.3 สัมประสิทธิ์ความเร่ง (C_1 และ C_2)

เป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อความเร็วและการเคลื่อนที่ของอนุภาค เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงเสถียรภาพของทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคกรณี $c_1 > c_2$ อนุภาคมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนไปในทิศทางของตนเองซึ่งเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดของตนเอง แต่ถ้า $c_2 > c_1$ อนุภาคแต่ละอนุภาคจะปรับ

การเคลื่อนที่ของตัวให้ให้สอดคล้องกับอนุภาคซึ่งมีตำแหน่งที่ดีที่สุดในกลุ่ม การเลือกค่าพารามิเตอร์ทั้งสองขึ้นอยู่กับ การหาค่าผลเฉลยในแต่ละปฏิกิริยาการค้นหาที่เหมาะสม ในกรณีแรกหาก c_1 และ c_2 มีค่าต่ำอนุภาคจะมีความเร็วการเคลื่อนที่ในหาผลเฉลยในปฏิกิริยาค่อนข้างช้า แต่ผลในการหาผลเฉลยนั้นจะค่อนข้างแม่นยำสูงทำให้เป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด แต่ถ้ากำหนดให้ c_1 และ c_2 มีค่าสูง อนุภาคจะเคลื่อนที่ผ่านปฏิกิริยาดด้วยความเร็วสูงแต่ครอบคลุมปฏิกิริยาการค้นหาเป็นบริเวณกว้างแต่อาจจะเคลื่อนที่ผ่านช่วงคำตอบที่ดีที่สุดไปโดย ซึ่งจากการทดลอง (Eberhart and Shi, 2000) การกำหนดค่า c_1 และ c_2 ที่ดีที่สุดคือเท่ากับ 2.0

2.4 ความผันผวนของอนุภาคในการหาผลเฉลย

ความสามารถของการหาผลเฉลยด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคขึ้นอยู่กับ การพิจารณาสองปัจจัยได้แก่ สภาวะการถ่วงสมดุล (Tradeoff) และความสามารถในการสำรวจ (Exploration) ของกลุ่มอนุภาค การสำรวจคือการวิ่งกระจายของอนุภาคแต่ละตัวในทิศทางต่างๆ เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปฏิกิริยาของตนเองที่รับผิดชอบ โดยเสาะแสวงไปในพื้นที่ที่ปฏิกิริยาต่างๆ หมายถึงการหาสิ่งที่ต้องการอย่างละเอียดถี่ถ้วนที่สุด (Shi and Eberhart, 1988) จึงเสนอให้มีค่าความถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดคือน้ำหนักความเฉื่อย (ω) เพื่อควบคุมความเร็วที่เหมาะสมซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการสำรวจและการเสาะแสวงหาของกลุ่มอนุภาค ซึ่งจะเปรียบเทียบความเร็วก่อนหน้ากับความเร็วในรอบปัจจุบันจากนั้นจะเปลี่ยนความเร็วให้เหมาะสม สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$v'_{id}{}^{+1} = \omega v'_{id} + c_1 r'_{1d} (p'_{best,id} - x'_{id}) + c_2 r'_{2d} (g'_{best,d} - x'_{id}) \quad (2-14)$$

ค่าของ ω มีความสำคัญต่อพฤติกรรมในการหาคำตอบและการถ่วงดุลความเร่งของตัวอนุภาค ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการสำรวจ เพราะกลุ่มอนุภาคจะมีความสามารถสำรวจได้ดีเมื่อ ω มีค่าที่เหมาะสมในแต่ละรอบนั้น ด้วยเหตุนี้ค่าของ ω จึงควรเปลี่ยนแปลงตามรอบการคำนวณ โดยในช่วงเริ่มต้น ω ควรมีค่าสูง เพื่อให้กลุ่มอนุภาคสามารถกระจายตัวได้ทั่วในปฏิกิริยาการค้นหาจนกระทั่งพบพื้นที่ที่เหมาะสมและเมื่อรอบการคำนวณผ่านไปจนเกือบสิ้นสุด ω ควรมีค่าลดลงเพื่อให้กลุ่มอนุภาคมีความเร็วในการเสาะแสวงหาลดลงเพื่อค้นหาคำตอบให้ละเอียดมากที่สุด โดยตามปกติ

ω จะถูกปรับให้มีค่าลดลงแบบเชิงเส้น (Linear Decreasing) ตามรอบการคำนวณที่เพิ่มขึ้น ดังต่อไปนี้

$$\omega^t = (\omega^0 - \omega^m) \frac{(nt - t)}{nt} + \omega^m \quad (2-15)$$

$$\omega^t = \omega^0 - \frac{(\omega^0 - \omega^m) t}{nt} \quad (2-16)$$

จากการคำนวณเสนอให้ ω^0 ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นในกาคำนวณรอบแรกควรมีค่าเท่ากับ 0.9 และ ω^m ซึ่งเป็นการคำนวณรอบสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.4 ตามลำดับจะทำให้ผลเฉลยออกมาเป็นที่น่าพอใจ

2.4.1 การใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในการปิดตัว

เป็นการปรับปรุงพฤติกรรมของอนุภาคโดยการปรับปรุงความเร็วในการสำรวจและการเสาะแสวงเช่นเดียวกับการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อย โดยการปิดความเร็วของอนุภาคด้วยค่าสัมประสิทธิ์การปิดตัว โดยความเร็วของอนุภาคจะมีค่าเท่ากับ

$$v_{id}^{t+1} = K[v_{id}^t + c_1 r_{1d}^t (p_{best_{id}}^t - x_{id}^t) + c_2 r_{2d}^t (g_{best_{id}}^t - x_{id}^t)] \quad (2-17)$$

$$K = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \quad (2-18)$$

$$\varphi = c_1 + c_2 \quad \text{where} \quad \varphi > 4 \quad (2-19)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การปิดตัวส่งผลต่อความเร็วของอนุภาคเช่นเดียวกับการถ่วงน้ำหนัก เมื่อตัวแปร K มีค่าที่สูงขึ้นกลุ่มอนุภาคจะมีความสามารถในการกระจายตัวเพื่อสำรวจพื้นที่ปริภูมิได้ดี และเมื่อ K มีค่าที่ต่ำลงกลุ่มอนุภาคจะมีความสามารถในการเจาะลึกเพื่อเสาะแสวงหาได้ดี ทั้งนี้ค่า

สัมประสิทธิ์การบีบตัว จะเป็นตัวแปรที่รับประกันการลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุดได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนค่าตามรอบการคำนวณเหมือนกับการถ่วงความเฉื่อย ดังนั้นเพื่อการทำงานร่วมกันได้ดีระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การบีบตัวและค่าการถ่วงน้ำหนัก ค่าการถ่วงน้ำหนัก C_1 และ C_2 จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2.05 ซึ่งทำให้ค่ามุมความเร็วหรือ $\varphi = 4.1$ และ $K = 0.729$ จากสมการทั้งสองสำหรับการคำนวณความเร็วของอนุภาคจึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$v_{id}^{t+1} = 0.729v_{id}^t + 1.49445r_{1d}^t (p_{best_{id}}^t - x_{id}^t) + 1.49445r_{2d}^t (g_{best_d}^t - x_{id}^t) \quad (2-20)$$

2.4.2 เงื่อนไขการจำกัดความเร็วของอนุภาค

ความเร็วของอนุภาคส่งผลโดยตรงต่อการหาตำแหน่งของอนุภาค หากกำหนดความเร็วของอนุภาคมากเกินไป อาจจะทำให้เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ซึ่งเป็นตำแหน่งของผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดไป หรือบางครั้งอาจจะเคลื่อนที่เลยออกไปนอกเขตพื้นที่ปริภูมิการค้นหา ซึ่งทำให้การลู่หาผลเฉลยเกิดการลู่ออก (Divergence) จึงต้องมีการควบคุมการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอนุภาคในการคำนวณแต่ละรอบโดยสร้างเงื่อนไขการจำกัดความเร็ว ตามสมการเชื่อมโยงดังต่อไปนี้

$$v_{id}^{t+1} = \begin{cases} v_{id}^{t+1} & \text{if } v_{id}^{t+1} < v_d^{\max} \\ v_d^{\max} & \text{if } v_{id}^{t+1} \geq v_d^{\max} \end{cases} \quad (2-21)$$

จากเงื่อนไขการจำกัดความเร็วในสมการข้างต้น การคำนวณความเร็วในรอบที่ $t+1$ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ ความเร็วของอนุภาคที่ได้จากการคำนวณรอบปัจจุบัน (v_{id}^{t+1}) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความเร็วสูงสุดที่กำหนดในรอบนั้น ซึ่งการกำหนดค่าความเร็วสูงสุดที่เหมาะสมนั้นส่งผลต่อการแปรผันทางด้านความเร็วที่จะนำมาพิจารณาต่อเพราะหากมีค่ามากเกินไป โปรแกรมจะมองว่าไม่มีการจำกัดความเร็วรอบ แต่ถ้าหากมีการกำหนดความเร็วสูงสุดที่ต่ำเกินไป กลุ่มอนุภาคจะทำการคำนวณหลายรอบเพื่อหาพื้นที่ที่เหมาะสมที่สุดในปริภูมิการค้นหา หรือในบางครั้งกลุ่มอนุภาคอาจจะไม่สามารถเคลื่อนที่ออกจากผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ได้ วิธีหนึ่งในการกำหนดค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาคได้ดังสมการต่อไปนี้

$$v_d^{\max} = \delta(x_d^{(u)} - x_d^{(L)}) \quad (2-22)$$

โดย δ จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่บอกถึงลักษณะของปัญหา ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง $0 < \delta \leq 1$

2.5 ขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคแบบทวิภาค

วิธีกลุ่มอนุภาคแบบทวิภาคเป็นการค้นหาปริภูมิผลเฉลยแบบทวิภาค (Binary Search Space) โดยแต่ละมิติของตำแหน่งอนุภาค (x_{id}) จะเป็นตัวแปรที่แสดงค่าออกมาในรูปแบบเลขฐานสอง คือมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น ($x_{id} \in \{0,1\}$) ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่ คือการที่ตัวเลขในแต่ละมิติของตำแหน่งอนุภาคมีการสลับ (Flip) จากค่าหนึ่งไปยังอีกค่าหนึ่ง โดยการเคลื่อนที่หนึ่งครั้งจะเปลี่ยนค่าจาก 0 เป็น 1 หรือจาก 1 เป็นศูนย์ เพื่อเป็นการแสดงถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาค จะจำลองเหตุการณ์การสลับที่ของการเคลื่อนที่อนุภาคเป็นแบบความน่าจะเป็น (Probability) โดยความเร็วในแต่ละมิติของอนุภาค (v_{id}) ต้องถูกเปลี่ยนให้เป็นตัวเลขนี้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 เพื่อแสดงค่าความน่าจะเป็นที่ตัวเลขในแต่ละมิติของตำแหน่งอนุภาคจะมีค่าเป็น 0 หรือ 1 ซึ่งจะมองเป็นเปอร์เซ็นต์ ยกตัวอย่างเช่นถ้า v_{id}^{t+1} ถูกเปลี่ยนให้กลายเป็น 0.3 หมายความว่ามีโอกาสร้อยละ 30 ที่ x_{id}^{t+1} จะมีค่าเท่ากับ 1 และมีโอกาสร้อยละ 70 ที่ x_{id}^{t+1} จะมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นการเปลี่ยนค่าความเร็วอนุภาคให้เป็นตัวเลขซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 เพื่อแสดงค่าความน่าจะเป็น สามารถประยุกต์ใช้กับฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid Function) ซึ่งสามารถเขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$\text{sig}(a) = \frac{1}{1 + e^{-a}} \quad (2-23)$$

$$\text{sig}(a) \in (0,1) \quad (2-24)$$

$$\text{sig}(0) = 0.5 \quad (2-25)$$

(2-26)

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \text{sig}(a) = 1$$

(2-27)

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \text{sig}(a) = 0$$

ในขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคแบบทวีภาค เมื่อคำนวณความเร็วของอนุภาคได้แล้วให้นำมาแทนค่าในฟังก์ชันซิกมอยด์ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{sig}(v_{id}^{t+1}) = \frac{1}{1 + e^{-v_{id}^{t+1}}} \quad (2-28)$$

จากนั้นจึงปรับตำแหน่งของอนุภาคใช้เงื่อนไขดังนี้

$$x_{id}^{t+1} = \begin{cases} 1 & \text{if } r_{3d}^t < \text{sig}(v_{id}^{t+1}) \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2-28)$$

เมื่อ r_{3d}^t คือตัวเลขสุ่มที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 สมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่า x_{id}^{t+1} จะมีค่าเป็น 1 หรือ 0 ด้วยโอกาสที่เท่ากัน (ร้อยละ 50) ก็ต่อเมื่อ $v_{id}^{t+1} > 0$ แต่ถ้า $v_{id}^{t+1} < 0$ ก็จะทำให้ x_{id}^{t+1} มีค่าเป็น 1 ด้วยโอกาสน้อยกว่าร้อยละ 50 และในทางกลับกันถ้า $v_{id}^{t+1} > 0$ ก็จะทำให้ x_{id}^{t+1} มีค่าเป็น 1 ด้วยโอกาสมากกว่าร้อยละ 50

2.6 ปัญหาการพิจารณาการไหลของกระแส

สมการการไหลของกระแสเป็นปัญหาพื้นฐานสำคัญสำหรับการพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในเชิงวิศวกรรม สำหรับการดำเนินงานตามปกติ ซึ่งเงื่อนไขการทำงานโดยทั่วไปต้องมีความพอใจในผลของสมการการไหลของกระแสในระบบ ปัญหาของการกำหนดฟังก์ชันการทำงานการไหลกระแสโดยทั่วไปประกอบด้วย การกำหนดแรงดันพื้นฐานในแต่ละบัสและการคำนวณการไหลของกระแสใน

แต่ละระบบสายส่ง ในการพิจารณาปัญหาการไหลของกระแส การทดสอบปรับเปลี่ยนค่าในแต่ละบัส เพื่อดูสถานการณ์คงตัวในระบบนั้นสำคัญ ต้องพิจารณาตัวแปรได้แก่ กำลังงานไฟฟ้าจริง (Real Power: P) กำลังงานไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power: Q) แรงดันไฟฟ้า (Voltage Magnitude: V) และมุมประกอบแรงดัน (Voltage phase angle: δ) การคงสถานะตัวแปรจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของบัสที่พิจารณา ปัญหาการไหลของกระแสในระบบเป็นแบบสมการไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนอธิบายได้ในรูปแบบดังนี้

$$f(x) - s = 0 \quad (2-29)$$

เมื่อ S คือเวกเตอร์ที่แสดงถึงกำลังงานไฟฟ้าจริงและกำลังงานไฟฟ้าเสมือน ที่ฉีดเข้าไปในระบบเป็นตัวแปรที่สามารถทราบค่าได้แสดงได้ดังนี้

$$S = [P_{pv} \ P_{pq} \ Q_{pq}]^T \quad (2-30)$$

และ x เป็นเวกเตอร์ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าแสดงได้ดังนี้

$$x = [\delta_{pv} \ \delta_{pq} \ V_{pq}]^T \quad (2-31)$$

ฟังก์ชันสมการ $f(x)$ ประกอบด้วยตัวแปรที่พิจารณาการทำงานของกำลังไฟฟ้าจริง $f_p(x)$ และกำลังไฟฟ้าเสมือน $f_q(x)$ สามารถเขียนอธิบายออกมาในรูปแบบของสมการได้เป็น

$$f(x) = [f_{p_{pv}}(x) \ f_{p_{pq}}(x) \ f_{q_{pq}}(x)]^T \quad (2-32)$$

เมื่อตัวแปรที่อยู่ด้านล่างสุดคือ “ pv ” และ “ pq ” เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการบริโภคโหลด ปัญหาการไหลของกระแสในระบบไฟฟ้ากำลังจะกำหนดให้มีสมการ

ทั้งหมด N สมการมีค่าเท่ากับ $npv + 2npq$ เมื่อ npv และ npq คือจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจำนวนของบัสโหลดตามลำดับ ดังนั้นปัญหาการไหลของกระแสในระบบไฟฟ้ากำลังจึงมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า N ตัวแปร และมีทั้งหมด N สมการ การพิสูจน์ปัญหาการไหลของกระแสในระบบจะพิสูจน์โดยใช้ทฤษฎีนิวตันราฟสัน (Newton-Rapson Method)

2.7 การกำหนดจุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้

จุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้คือ ความสามารถในการเพิ่มขึ้นของโหลดโดยนอกเหนือจากเงื่อนไขปกติ ปัญหาโดยทั่วไปของจุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้ส่วนมากจะพิจารณาเกี่ยวกับการส่งผ่านพลังงานระหว่างคู่แหล่งกำเนิดและโหลด ทางด้านการตลาดในปัจจุบัน การกำหนดจุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้เป็นพื้นฐานของการพิจารณาคุณภาพในระบบไฟฟ้าหลากหลายด้าน เช่น ผลรวมความสามารถในการส่งผ่านพลังงานในระบบ ความสามารถในการส่งผ่านพลังงาน [4] ทฤษฎีการกำหนดจุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ Repeat Power Flow: RPF, Continuation Power Flow: CPF และ Optimal Power Flow: OPF [5]-[7] ซึ่ง RPF และ CPF สามารถพิสูจน์ได้โดยการคำนวณได้จากการเพิ่มขึ้นของจุดรับพลังงานหรือโหลดจนกระทั่งถึงขีดจำกัดการทำงานของระบบ ทฤษฎี RPF เป็นการพิสูจน์ปัญหาการไหลของกระแสโดยตรงในแต่ละทุกๆขั้นตอนการเพิ่มขึ้นของโหลด ในทางตรงกันข้ามทฤษฎี CPF เป็นตัวกำหนดการพิสูจน์การไหลของกระแสโดยการขยายของจาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian Matrix) เพื่อหลีกเลี่ยงเงื่อนไขที่ผิดพลาดของเมตริกซ์ทุกๆการเพิ่มขึ้นของโหลดจนกระทั่งถึงขีดจำกัดของระบบ ทฤษฎี OPF เป็นการหาค่าที่มากที่สุดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้ของตัวแปรโหลด เป็นหัวข้อที่จะหาข้อจำกัดของระบบไฟฟ้ากำลัง [6]

2.7.1 วิธีการ Repeated Power Flow (RPF)

จากทฤษฎีนี้ให้ถือว่าบัสแหล่งกำเนิดเป็นบัสอ้างอิงเพื่อกำหนดการพิสูจน์การไหลของกระแส ถ้าหากการพิสูจน์นี้ถูกต้อง การไหลของกระแสจะไม่ละเมิดขีดจำกัดของระบบ ซึ่งข้อกำหนดต่างๆสามารถอธิบายได้จากสมการ

$$P_{di} = P_{di}^0 + \lambda \quad (2-33)$$

$$Q_{di} = (P_{di}^0 + \lambda) \tan(\cos^{-1}(\psi_i)) \quad (2-34)$$

เมื่อ λ ขนาดของตัวแปรที่ทำงานสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของโหลดบัส

P_{di} คือกำลังงานไฟฟ้าจริงที่โหลดบัสที่ i ;

P_{di}^0 ค่าเริ่มต้นของกำลังงานไฟฟ้าพื้นฐานที่โหลดบัสที่ i ;

Q_{di} คือค่ากำลังงานไฟฟ้าเสมือนที่โหลดบัสที่ i ;

ψ_i คือมุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนโหลดบัสที่ i ;

กระแสจะไหลเข้าทุกๆการเพิ่มขึ้นของ λ ซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของโหลดด้วยจนกระทั่งมาถึงขีดจำกัดการทำงานของระบบ จุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้เป็นข้อแตกต่างระหว่างจุดที่โหลดทำงานปกติและจุดที่สูงสุดของโหลดที่ระบบสามารถยอมรับได้ สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$Load\ Margin = P_{di}(\lambda) - P_{di}^0 \quad (2-35)$$

2.7.2 วิธีการ Continuation Power Flow (CPF)

การไหลของกระแสอย่างต่อเนื่อง (CPF) คือเครื่องมือสำหรับการกำหนดกราฟจุดโค้ง (Curve) ของการพิสูจน์การไหลของกระแสในระบบ ผลของจุดโค้งจะแสดงถึงจุดข้อจำกัดของระบบที่ยังสามารถรองรับได้ซึ่งถือเป็นจุดวิกฤตที่ต่อเนื่องกันในการทำงานของระบบไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จุดวิกฤตของโหลดถูกเรียกว่า จุดแยกเป็นสองส่วนของปมอานม้า (Saddle-node-bifurcation point) ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าจุด SNB ปัญหาของจุดนี้คือเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของโหลดตัวแปร λ ก็เป็นตัวแปรที่เพิ่มขึ้นหลากหลายค่าที่ไม่สามารถระบุได้ เพราะการเพิ่มขึ้นของตัวแปร λ ทำงานสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของโหลดในสัดส่วนที่เหมาะสมของกำลังงานไฟฟ้าจริงต่อกำลังงาน

ไฟฟ้าเสมือน การไหลของกระแสอย่างต่อเนื่องสามารถกำหนดจุดขีดจำกัดของโหลดและลักษณะรูปแบบของแรงดันในการส่งผ่านพลังงานแหล่งกำเนิดไฟฟ้าคือ P_{gi} อยู่ในรูปของฟังก์ชัน λ อธิบายเป็นสมการได้คือ

$$P_{di}(\lambda) = P_{di}^0 + \lambda[K_{di}S_{\Delta Base} \cos(\psi_i)] \quad (2-36)$$

$$Q_{di}(\lambda) = Q_{di}^0 + \lambda[K_{di}S_{\Delta Base} \sin(\psi_i)] \quad (2-37)$$

$$P_{gi}(\lambda) = P_{gi}^0(1 + \lambda K_{gi}) \quad (2-38)$$

เมื่อ P_{di}, Q_{di} เป็นค่าเริ่มต้นของโหลดที่บัส i , ในแง่มุมของกำลังงานไฟฟ้าจริงและกำลังงานไฟฟ้าเสมือน

P_{gi}^0 เป็นค่าเริ่มต้นของกำลังงานไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส j ;

K_{di} เป็นค่าตัวคูณสำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่บัส i เมื่อ λ มีการเปลี่ยนแปลง

K_{gi} เป็นค่าคงที่สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i เมื่อ λ มีการเปลี่ยนแปลง

ψ_i คือมุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนโหลดบัสที่ i ;

$S_{\Delta Base}$ เป็นกำลังงานไฟฟ้าปรากฏซึ่งเลือกจากค่าที่เปลี่ยนแปลงอย่างเหมาะสมของ λ ดังนั้นสมการการไหลของกระแสจึงมีฟังก์ชัน λ ด้วยสามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$f(x) - S(\lambda) = g(x, \lambda) = 0 \quad (2-39)$$

จำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่ามี $N+1$ เพราะมีตัวแปรที่แปรผันเพิ่มเข้ามาคือ λ ในขณะที่จำนวนของสมการคือ N สำหรับการพิสูจน์กราฟไค้งตามลำดับ ในการหาจำนวนของกราฟไค้งจะใช้

ตัวแปรทำนาย (Predictor) และตัวแปรตรวจแก้ไข (Corrector) ในกระบวนการไหลของกระแสอย่าง ต่อเนื่อง [1],[2] โดยกระบวนการทำนายสามารถคำนวณได้จากแทนเจนต์เวกเตอร์ (Tangent Vector) หรือตัวแปร (t) ซึ่งเขียนเป็นสมการระบบเชิงเส้นได้ดังนี้

$$[J_{Aug}][t] = \begin{bmatrix} g_x & g_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

โดยตัวแปรที่เป็นตัวทำนาย จะมีเครื่องหมาย (*) อยู่ในสมการสามารถเขียนได้ดังนี้

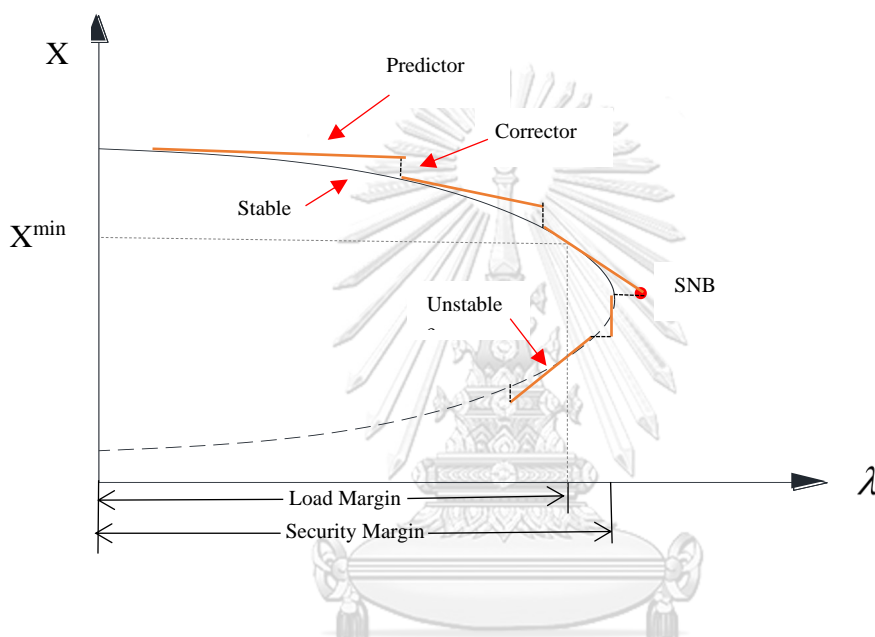
$$\begin{bmatrix} x^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

- เมื่อ J_{Aug} เป็นจาโคเบียนเมตริกซ์ที่ขยาย
- g_x เป็นการอ้างอิงการดำเนินการจาโคเบียนเมตริกซ์ที่ dg/dx ;
- g_λ เป็นการอ้างอิงอนุพันธ์เศษส่วน $dg/d\lambda$;
- e_k เป็นเวกเตอร์แถวขนาดที่เหมาะสมกับองค์ประกอบทั้งหมดที่มีค่าเท่ากับศูนย์ยกเว้น ส่วน k^{th} ซึ่งมีค่าเท่ากับหนึ่ง
- σ เป็นช่วงกว้างของการเพิ่มระดับขนาด

ความผันผวนมีความเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบที่ใหญ่ที่สุดของแทนเจนต์เวกเตอร์ (t) จึงถูกเลือกให้เป็นพารามิเตอร์ต่อเนื่อง ค่าดัชนี k^{th} ทำงานสอดคล้องกับส่วนประกอบความต่อเนื่อง พารามิเตอร์เป็นการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงในพารามิเตอร์ จากด้านขวาสุดของสมการที่ (2-40) ค่าที่เหมาะสมที่สุดในเมตริกซ์คือ +1 หรือ -1 กระบวนการตัวเลือกถูกกำหนดโดยการพิสูจน์การไหลกระแสที่ใกล้จุดการทำนาย ความต่อเนื่องของพารามิเตอร์ถูกกำหนดให้เหมาะสมกับค่า η ทุกองค์ประกอบที่ k^{th} ของเวกเตอร์ Z เมื่อ $Z = [x \ \lambda]^T$ ดังนั้นขั้นตอนการเลือกค่าถูกพิสูจน์โดยวิธีการไหลของกระแสจากสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} g(Z) \\ Z_k - \eta \end{bmatrix} = 0 \quad (2-42)$$

กระบวนการการทำนายและกระบวนการเลือกจะแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 การหาจุดพังทลายของ Nose Curve วิธี Continuation power flow [20]

จากรูปเป็นการกำหนดรูปแบบลักษณะพารามิเตอร์ของกราฟเส้นโค้ง CPF ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การเพิ่มขึ้นของโหลด เมื่อการพิจารณาปัญหาอยู่ในช่วงมีเสถียรภาพจำกัดของแรงดัน (Steady-state Voltage Stability Limit) การจำกัดจุดที่ระบบสามารถยอมรับได้พิจารณาจากจุด SNB ซึ่งเรียกว่า จุดความปลอดภัย (Security margin) เมื่อพิจารณาการจำกัดของค่าพารามิเตอร์ จุดการทำงานที่ ระบบสามารถยอมรับได้ถูกกำหนดจากจุดวิกฤตพารามิเตอร์ (Parameter Criteria)

2.7.3 วิธีการ Optimal Power Flow (OPF)

จุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้ถูกกำหนดโดยใช้ทฤษฎีการไหลของพลังงานที่เหมาะสม (OPF) ทฤษฎี OPF เป็นการหาค่าที่เพิ่มขึ้นสูงสุดของโหลดพารามิเตอร์ (λ) เพื่อที่จะหาข้อจำกัดของระบบ [6] วิธีการนี้เป็นการรวมข้อจำกัดต่างๆเข้ากับการพิจารณาปัญหา สามารถคำนวณทฤษฎี OPF ออกมาในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\max \lambda \quad (2-43)$$

$$s.t \ g(x, \lambda) = 0 \quad (2-44)$$

$$h(x, \lambda) \leq 0 \quad (2-45)$$

เมื่อ λ	คือพารามิเตอร์ที่แสดงถึงการเปลี่ยนของโหลดที่บริเวณจุดรับพลังงาน
x	คือเวกเตอร์ของสถานะตัวแปรประกอบด้วยขนาดแรงดันของบัสโหลด (V_{pq}) และมุมประกอบแรงดันของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลดบัส (δ_{pv}, δ_{pq})
$g(x, \lambda)$	แสดงถึงสมการ Power flow
$h(x, \lambda)$	แสดงถึงข้อจำกัดสมการซึ่งมีข้อจำกัดในการทำงาน เช่น จำกัดแรงดัน จำกัดสายส่ง จำกัดการผลิต ลักษณะการทำงานของพารามิเตอร์แหล่งกำเนิดไฟฟ้าและโหลดสอดคล้องกับสมการ (2-36)-(2-38)

2.8 บทสรุป

วิธีกลุ่มอนุภาคมีข้อดีคือ มีแนวคิดและหลักการที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย เมื่อนำไปสร้างแบบจำลองในการแก้ปัญหาแบบสุ่มตัวแปรเพราะมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก การแทนผลเฉลยด้วยอนุภาคมีตัวแปรตัดสินใจในการกำหนดเขตเขตการทำงานโดยตรงไม่จำเป็นต้องเข้ารหัส (Coding) โดยค่าตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณเพื่อใช้แทนผลเฉลยเป็นเลขฐานสองคือเป็นจำนวนเต็มและเป็นจำนวนจริง เพื่อกลุ่มอนุภาคจะได้ใช้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นข้อมูลตัดสินใจในการหาผลเฉลย จึงทำให้สามารถแก้ปัญหาที่ฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่สามารถหาค่าอนุพันธ์ได้ วิธีกลุ่มอนุภาคเหมาะในการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเพราะมีความรวดเร็วและมีความยืดหยุ่นในการค้นหาผลเฉลย อีกทั้งยังมีเสถียรภาพของการลู่เข้าสู่ผลเฉลย อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าทางคณิตศาสตร์พื้นฐานบางประการก็มีความละเอียดซับซ้อนในการวิเคราะห์เช่น การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธีกลุ่มอนุภาค จะต้องกำหนดรอบการคำนวณที่แน่นอน ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่ง ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อย ดังนั้นจึงต้องทราบถึงลักษณะปริภูมิที่จะค้นหา เพื่อให้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณได้อย่างเหมาะสม นอกเหนือจากนั้นแล้วการค้นหาคำตอบในปริภูมิบางครั้งกระบวนการค้นหาก้อาจจะไปติดอยู่ที่ผลเฉลยในช่วงในช่วงหนึ่งในปริภูมิ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเพื่อให้สามารถหลุดออกจากช่วงคำตอบใดคำตอบหนึ่งในปริภูมิได้

แนวคิดของวิธีการกำหนดจุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้ คือการหาเขตคำตอบของจำนวนความเป็นไปได้ในการเพิ่มขึ้นของโหนดอย่างมีทิศทางเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหนดในระบบ เป็นการหาจุดการทำงานสูงสุดของระบบเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของโหนดเรียกว่า Saddle Node Bifurcation ถึงอย่างไรก็ตามการกำหนดจุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้ยังต้องพิจารณาการเพิ่มขึ้นของโหนดอย่างมีทิศทางประกอบควบคู่กันไปด้วย สามารถอธิบายวิธีการนี้จากพื้นฐานของแนวคิด Security Region

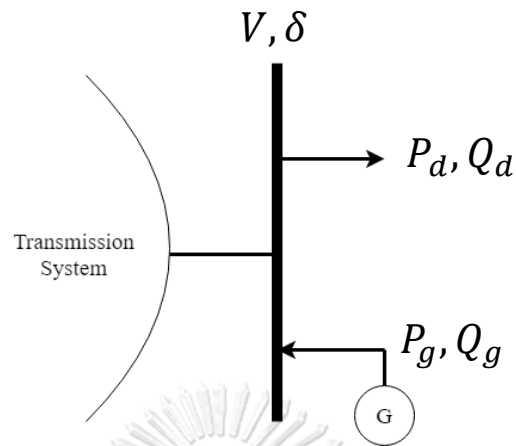
บทที่ 3.

การประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคกับปัญหาการกำหนดจุดขอบเขต

ในบทนี้จะกล่าวถึงการกำหนดปัญหาสำหรับคำนวณเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการกำหนดขอบเขตของพื้นที่ ที่สามารถเป็นไปได้และการนำวิธีการกลุ่มอนุภาคมาประยุกต์ใช้ได้อย่างไร ขั้นตอนการคำนวณจะประกอบไปด้วยการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (Unknow Variables) ฟังก์ชันจุดประสงค์ (The Objective Function) และฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraints) ในบทนี้จะพิจารณาปัญหาได้แก่ การส่งผ่านพลังงานจากบัสแหล่งกำเนิดไปยังโหลดบัส การส่งผ่านพลังงานจากบริเวณแหล่งกำเนิด (Source Area) ไปยังบริเวณโหลด (Sink Area) จุดขอบเขตบริเวณที่เป็นไปได้อย่างสอดคล้องกับจุดโหลดที่สูงที่สุด ของคู่แหล่งกำเนิดและโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกระบวนการตามรอยขอบ (Boundary Tracing Process) การกำหนดจุดขอบเขตได้มาจากจุดการทำนายซึ่งอยู่ภายนอกขอบเขตบริเวณที่เป็นไปได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากทุกๆ การคำนวณจุดตามรอยขอบ ปัญหามักจะหาคำตอบได้จากจุดที่ใกล้ที่สุดกับบริเวณที่เป็นไปได้อย่างได้ซึ่งได้มาจากจุดการทำนาย ดังนั้นการคำนวณเพื่อหาคำตอบจากปัญหานี้คือการพิจารณาหาค่าที่น้อยที่สุดของระยะทาง (Distance Minimization) เพื่อใช้เป็นฟังก์ชันจำกัด (Power Flow Constraints) และข้อจำกัดการทำงานของระบบ

3.1 ตัวแปรบัส (Bus Variable)

ในการวิเคราะห์ Power Flow จะมีตัวแปรบัส (Bus Variables) ซึ่งประกอบด้วย มุมประกอบแรงดัน (Voltage Angle: δ) ขนาดแรงดัน (Voltage Magnitude: V) ความต้องการพลังงาน (Power Demand: P_d, Q_d) และพลังงานที่ผลิตได้ (Power Generation: P_g, Q_g) ซึ่งจะแสดงเป็นรูปภาพได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของตัวแปรบัส

การแปรผันและการคงที่ของตัวแปรสามารถจำแนกได้โดยอุปกรณ์ในระบบ สำหรับบัสอ้างอิง มุมประกอบแรงดันจะถูกคงที่ (Fixed) เพื่อที่จะเป็นมุมอ้างอิงสำหรับบัสอื่นๆ สำหรับบัสแหล่งผลิต ไฟฟ้าขนาดแรงดันจะถูกคงที่เนื่องจากบัสแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสามารถควบคุมแรงดันของบัสตนเองได้ นอกจากนี้แล้วปัญหาของคู่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าและโหลดยังเป็นสาเหตุให้มีตัวแปรอิสระต่างๆ (Free) เพิ่มขึ้นเพื่อประกอบการพิจารณาอีกด้วย การแบ่งประเภทของตัวแปรอิสระถูกรวบรวมและแสดงได้ ดังตารางต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรคงที่และตัวแปรอิสระ

Device	Mode	Free Variable	Fix Variables
Reference Bus	Normal	P_g, Q_g	δ, V, P_d, Q_d
	Source	P_g, Q_g	δ, V, P_d, Q_d
	Sink	P_g, Q_g, P_d, Q_d	δ, V
	Source and Sink	P_g, Q_g, P_d, Q_d	δ, V
Generator Bus	Normal	δ, Q_g	V, P_g, P_d, Q_d
	Source	δ, P_g, Q_g	V, P_d, Q_d
	Sink	δ, Q_g, P_d, Q_d	V, P_g

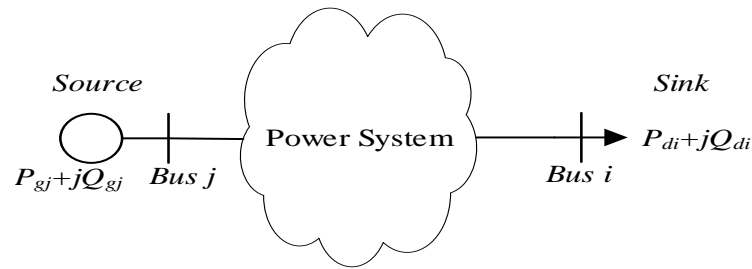
	Source and Sink	$\delta, P_g, Q_g, P_d, Q_d$	V
Load Bus	Normal	δ, V	P_d, Q_d
	Source	N/A	N/A
	Sink	δ, V, P_d, Q_d	-
	Source and Sink	N/A	N/A
Synchronous Condenser or SVC (Generator Bus without P_g)	Normal	δ, Q_g	V, P_d, Q_d
	Source	N/A	N/A
	Sink	δ, Q_g, P_d, Q_d	V
	Source and Sink	N/A	N/A

เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลในตารางมีความเป็นไปได้ว่าบัสแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและบัสอ้างอิงทั้งคู่อาจสามารถเป็นบัสแหล่งกำเนิดและบัสของโหลดได้ แต่โหลดบัสและบัส Synchronous Condenser ไม่สามารถเป็นบัสแหล่งกำเนิดได้เพราะว่าบัสทั้งคู่ไม่สามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าจริงได้ เห็นได้ชัดว่าจำนวนตัวแปรอิสระขึ้นอยู่กับประเภทบัสและโหมดการทำงาน เมื่อใช้แนวคิดนี้เราสามารถพัฒนาระบบที่ไม่ทราบค่าตัวแปรได้ สำหรับการถ่ายโอนพลังงานระหว่างคู่ของแหล่งกำเนิดและโหลด

3.2 วิธีการกำหนดการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองบัส

วิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การส่งผ่านพลังงานระหว่างสองบัสประกอบด้วย บัสแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและบัสโหลดแสดงไว้ในรูปด้านล่าง จุดการทำงานของโหลดบัสคือเป้าหมายในการพิจารณาปัญหา บริเวณความเป็นไปได้ที่จุดโหลดบัสจะเขียนแสดงได้อยู่บนระนาบระหว่างแกนกำลังไฟฟ้าจริงและแกนกำลังฟ้าเสมือน



รูปที่ 3.2 การถ่ายโอนพลังงานระหว่างสองบัส

3.2.1 ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองบัส

การคำนวณหาจุดการทำงานที่ระบบสามารถยอมรับได้เป็นพื้นฐานของวิธีการแก้ปัญหา Power flow โดยทุกเงื่อนไขการเพิ่มขึ้นของโหลดต้องสามารถอธิบายออกมาเป็นสมการได้ เพราะจุดการทำงานสูงสุดของโหลดเกี่ยวข้องกับบริเวณขอบเขตที่เป็นได้ ตัวแปรพื้นฐานของ Power flow ยังคงเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอีกด้วย ตัวแปรของ Power flow จะประกอบด้วย มุมประกอบแรงดันของโหลดบัสและบัสแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเวกเตอร์เขียนแทนด้วยตัวแปร δ_{pv} และ δ_{pq} ตามลำดับ ขนาดแรงดันของโหลดบัสตัวแปรเวกเตอร์คือ V_{pq}

ในการพิจารณาปัญหานี้ตัวแปรของบัสแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและตัวแปรของบัสโหลดเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ตัวแปรที่พิจารณาที่คู่แหล่งกำเนิดและโหลดประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากบัสแหล่งกำเนิด j แทนด้วยตัวแปร P_{gj} กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ผลิตได้จากบัสแหล่งกำเนิด j แทนด้วยตัวแปร Q_{gj} ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจริงที่โหลดบัส i แทนด้วยตัวแปร P_{di} ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเสมือนที่โหลดบัส i แทนด้วยตัวแปร Q_{di} จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น พลังงานไฟฟ้าเสมือนที่บัสแหล่งกำเนิดจะถูกคำนวณหลังจากการคำนวณ Power Flow แล้ว ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าเสมือนสำหรับทุกแหล่งกำเนิดรวมไปถึงตัว Synchronous condensers and SVC ก็เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเช่นกัน เขียนแทนด้วยเวกเตอร์ Q_G เมื่อ

$$Q_G = [Q_{ref} \quad Q_{pv}]^T \quad (3-1)$$

ตัวแปร "ref" และ "pv" ด้านล่างหมายถึงบัสอ้างอิง และบัสแหล่งกำเนิดไฟฟ้าตามลำดับ บัสแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเสมือนคือ Q_g เป็นองค์ประกอบสมาชิกของเวกเตอร์ Q_G ดังนั้นเวกเตอร์ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของปัญหานี้ถูกเขียนด้วยในรูปแบบฟังก์ชัน (X) ซึ่งรวมแล้วสามารถเขียนอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$X = [\delta_{pv} \quad \delta_{pq} \quad V_{pq} \quad P_{gj} \quad Q_G \quad P_{di} \quad Q_{di}]^T \quad (3-2)$$

3.2.2 ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองบัส

ในกระบวนการเลือกและการทำนาย กระบวนการเลือกจะทำการเลือกและคาดคะเนจุดปัญหาที่จะทำการพิสูจน์ จุดทำนายคือจุดที่บริเวณเป็นไปได้ของปัญหา จุดประสงค์ของวิธีการนี้ต้องการที่จะหาวิธีการกำหนดขอบเขตบริเวณความเป็นไปได้โดยใช้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Problem) เพราะสามารถหาขีดจำกัดของการทำงานของระบบได้รวมไปถึงข้อจำกัดต่างๆที่มีอยู่ในระบบ กำหนดให้ $S^* = P_{di}^* + jQ_{di}^*$ เป็นจุดโหนดบริเวณด้านนอกของขอบเขตความเป็นไปได้ ในกรณีนี้จะพิจารณาแค่หนึ่งโหนดบัสแล้วลอง Plot แสดงรูปร่างของขอบเขตบริเวณความเป็นไปได้ ภายในช่องว่างสองมิติระหว่าง P_{di} และ Q_{di} ดังนั้นการฉีดพลังงานเพิ่มเข้าไปที่บัสต่างๆในระบบจะไม่พิจารณา ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับกำหนดจุดขอบเขตความเป็นไปได้ เป็นฟังก์ชันที่แสดงถึงระยะทางระหว่างจุดคือ S^* และจุดบริเวณขอบที่ไม่ทราบค่าคือ $S^b = P_{di} + Q_{di}$ แสดงออกมาเป็นสมการได้ดังนี้


$$F(X) = \frac{1}{2} \left\{ (P_{di} - P_{di}^*)^2 + (Q_{di} + Q_{di}^*)^2 \right\} \quad (3-3)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือเทอมของเศษส่วนครึ่งหนึ่งของสมการ Mismatch Power ซึ่งคล้ายกับฟังก์ชันของราคา [8]-[12] การพิสูจน์ฟังก์ชัน (X) ต้องสอดคล้องสัมพันธ์กันกับสมการ Power

Flow และอุปกรณ์ทุกตัวต้องทำงานภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดของตัวเอง ดังนั้นข้อจำกัดของปัญหานี้จึงประกอบด้วยสมการ Power Flow

$$g(X) = 0 \quad (3-4)$$

เมื่อ $g(X)$ ประกอบด้วยฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับทุกบัสในระบบ ข้อจำกัดของแรงดันที่โหลดบัสคือ



$$V_{pq}^{\min} \leq V_{pq} \leq V_{pq}^{\max} \quad (3-5)$$

ข้อจำกัดของบัสกำเนิดไฟฟ้าคือ

$$P_{gj}^{\min} \leq P_{gj} \leq P_{gj}^{\max} \quad (3-6)$$

$$Q_{gj}^{\min} \leq Q_{gj} \leq Q_{gj}^{\max} \quad (3-7)$$

ข้อจำกัดของสายส่งคือ

$$T(X) \leq S_T \quad (3-8)$$

เมื่อ $T(X)$ คือฟังก์ชันของ Power Flow ในสายส่ง

S_T คือเวกเตอร์ข้อจำกัดของสายส่ง

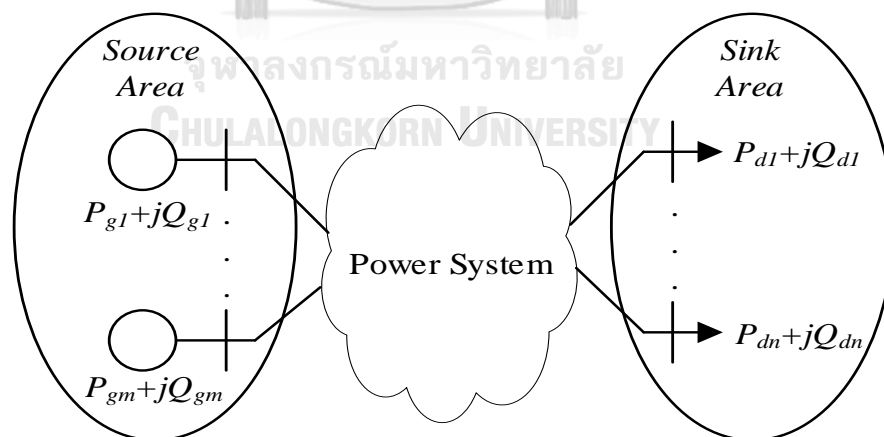
เมื่อความต้องการของโหลดมีค่าติดลบ และแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกดังนั้นข้อจำกัดของระบบคือ

$$P_{di} \leq 0 \quad (3-9)$$

การกำหนดจุดขอบเขตสามารถหาค่าต่ำสุด (Minimizing) ได้จาก (3-3) และวัตถุประสงค์ข้อจำกัดใช้ได้จาก (3-4)-(3-9) โดยความหมายทางกายภาพของการหาค่าต่ำที่สุดคือการหาจุดใกล้ที่สุดของ S จากจุด S^* เมื่อ S^* อยู่นอกขอบเขตที่เป็นไปได้ ดังนั้นจุดที่ใกล้ S มากที่สุดคือจุดที่อยู่ในขอบเขตความเป็นไปได้ของระบบและมีค่าจากการพิสูจน์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นบวก ในทางตรงกันข้ามจุด S จะเท่ากับจุด S^* ก็ต่อเมื่อ S^* อยู่ในขอบเขตบริเวณความเป็นไปได้ ในกรณีนี้ จะไม่สามารถหาค่าจุดกำหนดขอบเขตได้และฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะให้ผลลัพธ์มีค่าออกมาเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจุด S^* ต้องอยู่นอกขอบเขตความเป็นไปได้เสมอจากกระบวนการตามรอยขอบเขต

3.3 ขั้นตอนการคำนวณสำหรับการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองพื้นที่

จากรูปด้านล่างพื้นที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน m ตัว และพื้นที่ของโหลดประกอบด้วยบัสจำนวน n บัส



รูปที่ 3.3 การส่งผ่านพลังงานระหว่างสองพื้นที่

ในกรณีนี้จุดโหลดจะอยู่ในขอบเขตความเป็นไปได้ สามารถเขียนสมการอธิบายในการคำนวณที่โหลดบัสได้ดังต่อไปนี้

$$S = P_d + jQ_d = \sum_{i=1}^n P_{di} + j \sum_{i=1}^n Q_{di} \quad (3-10)$$

เมื่อ P_d คือผลรวมของกำลังงานไฟฟ้าจริงที่พื้นที่โหลด

Q_d คือผลรวมของกำลังงานไฟฟ้าเสมือนที่พื้นที่โหลด

3.3.1 ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในระบบการส่งผ่านพลังงานสองพื้นที่

ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในการพิจารณาปัญหาในระบบนี้มีความคล้ายคลึงกับตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในการพิจารณาการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองบัส ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าพื้นฐานของสมการ Power Flow ประกอบด้วยขนาดแรงดัน มุมประกอบแรงดัน (V_{pq} , δ_{pv} and δ_{pq}) กำลังงานที่แหล่งกำเนิดและกำลังงานที่โหลดยังคงเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์ ภายในเวกเตอร์ประกอบด้วยตัวแปรต่างๆ ดังนี้ เวกเตอร์การผลิตกำลังงานไฟฟ้าจริงบริเวณพื้นที่แหล่งผลิตไฟฟ้าแทนด้วยตัวแปร P_g เมื่อ

$$P_g = [P_{g1} \dots P_{gj} \dots P_{gm}]^T \quad (3-11)$$

เวกเตอร์การผลิตกำลังงานไฟฟ้าเสมือนบริเวณพื้นที่แหล่งผลิตไฟฟ้าแทนด้วยตัวแปร Q_g เมื่อ

$$Q_g = [Q_{g1} \dots Q_{gj} \dots Q_{gm}]^T \quad (3-12)$$

เวกเตอร์ความต้องการกำลังงานไฟฟ้าจริงบริเวณพื้นที่โหลดแทนด้วยตัวแปร P_d เมื่อ

$$P_d = [P_{d1} \dots P_{dj} \dots P_{dn}]^T \quad (3-13)$$

เวกเตอร์ความต้องการกำลังงานไฟฟ้าเสมือนบริเวณพื้นที่โหลดแทนด้วยตัวแปร Q_d เมื่อ

$$Q_d = [Q_{d1} \dots Q_{dj} \dots Q_{dn}]^T \quad (3-14)$$

ถึงอย่างไรก็ตามเวกเตอร์ตัวแปรใน (3-12) ก็เป็นสมาชิกของเวกเตอร์ Q_G ใน (3-1) พลังงานไฟฟ้าเสมือนของแหล่งกำเนิดพลังงานยังคงเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบสำหรับการพิจารณาปัญหานี้ ดังนั้นสามารถรวมเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$X = [\delta_{pv} \quad \delta_{pq} \quad V_{pq} \quad P_g \quad Q_G \quad P_d \quad Q_d]^T \quad (3-15)$$

3.3.2 ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองพื้นที่

สำหรับในกรณีศึกษาที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือฟังก์ชันที่แสดงถึงระยะทางบนระนาบผลรวมของโหลดที่บริเวณพื้นที่โหลด เพื่อที่จะกำหนดจุดขอบเขตโดยการหาจุดโหลดที่ใกล้ที่สุดจากจุดโหลดที่อยู่ภายนอกขอบเขตความเป็นไปได้ นั่นคือจุด S^* ซึ่งเหมือนกับการพิจารณาปัญหาที่การส่งผ่านพลังงานระหว่างสองบัส การหาค่าที่น้อยที่สุด (Minimization) สำหรับกรณีนี้เขียนออกมาในรูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } F(X) = \frac{1}{2} \left\{ \left[\left(\sum_{i=1}^n P_{di} \right) - P_d^* \right]^2 + \left[\left(\sum_{i=1}^n Q_{di} \right) - Q_d^* \right]^2 \right\} \quad (3-16)$$

$$\text{Subjected to } g(x) = 0 \quad (3-17)$$

$$V_{pq}^{\min} \leq V_{pq} \leq V_{pq}^{\max} \quad (3-18)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (3-19)$$

$$Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max} \quad (3-20)$$

$$T(X) \leq S_T \quad (3-21)$$

$$P_d \leq 0 \quad (3-22)$$

โดยทั่วไปแล้วการกำหนดจุดการทำงานของระบบที่สามารถยอมรับได้นั้น แหล่งกำเนิดไฟฟ้าและตัวโหลดสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยรูปแบบของตัวเหล่านั้นเอง พื้นที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าและพื้นที่บริเวณโหลดถูกบังคับให้ทำงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด การพิจารณาปัญหานี้ถูกประยุกต์เข้ากับความต้องการของกำลังงานไฟฟ้าจริงที่บัส k ซึ่งปัจจัยการเปลี่ยนแปลงคือ $K_{P_{di}}$ เมื่อ

$$K_{P_{di}} = \frac{P_{di}}{\sum_{k=1}^n P_{dk}} \quad (3-23)$$

นั่นคือมีความหมายว่า

$$\begin{aligned} P_{di} &= K_{P_{di}} \sum_{k=1}^n P_{dk} \\ &= K_{P_{di}} (P_{d1} + \dots + P_{di} + \dots + P_{dn}) \end{aligned} \quad (3-24)$$

ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังต่อไปนี้

$$K_{P_{di}} P_{d1} + \dots + (K_{P_{di}} - 1) P_{di} + \dots + K_{P_{di}} P_{dn} = 0 \quad (3-25)$$

ถึงอย่างไรก็ตาม ความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส i สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยแพคเตอร์ K_{Qdi} และการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่บัส j ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงโดยแพคเตอร์ K_{Pgj} ทั้งหมดนี้สามารถเขียนอธิบายเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$K_{Qd1}Q_{d1} + \dots + (K_{Qdi} - 1)Q_{di} + \dots + K_{Pdi}Q_{dn} = 0 \quad (3-26)$$

$$K_{Pg1}P_{g1} + \dots + (K_{Pgj} - 1)P_{gj} + \dots + K_{Pgm}P_{gm} = 0 \quad (3-27)$$

จาก (3-25)-(3-27) สามารถเขียนใหม่ได้ในรูปของสมการเมตริกซ์ดังนี้

$$(A_{Pd} - I_d)P_d = 0 \quad (3-28)$$

$$(A_{Qd} - I_d)Q_d = 0 \quad (3-29)$$

$$(A_{Pg} - I_g)P_g = 0 \quad (3-30)$$

เมื่อ I_d, I_g คือเมตริกซ์ Identity ที่มีขนาด $n \times n$ และเมตริกซ์ Identity ที่มีขนาด $m \times m$ ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$A_{Pd} = [K_{Pd1} \dots K_{Pd1}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} K_{Pd1} & \dots & K_{Pd1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{Pdn} & \dots & K_{Pdn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3-31)$$

$$A_{Qd} = [K_{Qd1} \dots K_{Qd1}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} K_{Qd1} & \dots & K_{Qd1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{Qdn} & \dots & K_{Qdn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3-32)$$

$$A_{Pg} = [K_{Pg1} \dots K_{Pg1}]_{m \times m} = \begin{bmatrix} K_{Pg1} & \dots & K_{Pg1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{Pgm} & \dots & K_{Pgm} \end{bmatrix}_{m \times m} \quad (3-33)$$

เมื่อ

$$K_{Pd} = [K_{Pd1} \dots K_{Pdi} \dots K_{Pdn}]^T \quad (3-34)$$

$$K_{Qd} = [K_{Qd1} \dots K_{Qdi} \dots K_{Qdn}]^T \quad (3-35)$$

$$K_{Pg} = [K_{Pg1} \dots K_{Pgj} \dots K_{Pgm}]^T \quad (3-36)$$

จากปัญหาการส่งผ่านพลังงานระหว่างสองพื้นที่ สามารถอธิบายได้คือ (3-28)-(3-30) ซึ่งเป็นสมการข้อจำกัดแบบเชิงเส้น เพิ่มเติมด้วยปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการควบคุม Participation Factor-ของระบบการผลิตและการบริโภคโหลด ซึ่งจากวิธีการนี้จะได้จุดขอบเขตความเป็นไปได้ของโหลดเขียนได้เป็น (5-10) เมื่อได้จุดขอบเขตบริเวณที่เป็นไปได้แล้วขั้นตอนต่อไปคือการหาผลเฉลยของจุดโหลดที่ระบบรองรับได้โดยการจำลองเหตุการณ์การเกิด Contingency คือเมื่อเกิดเหตุขัดข้องมีการหลุดออกของสายส่งในระบบอย่างไรระบบจึงยังสามารถคงเสถียรภาพการทำงานให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดได้ ดังนั้นจึงมีการนำเอาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยกลุ่มอนุภาคมาจำลองเหตุการณ์ในการหาผลเฉลย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.4 การประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคกับสมมติฐานการเกิด Contingency

ระบบสายส่งไฟฟ้ามีการพิจารณาประสิทธิภาพหลายด้านได้แก่ การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ การปรับปรุงขนาดแรงดันในแต่ละบัสให้เหมาะสมอยู่ในขอบเขตบริเวณความเป็นไปได้และกำลังคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) ของระบบ นั่นทำให้ระบบสามารถรองรับโหลดที่จะเพิ่มเข้ามาในอนาคต อย่างไรก็ตามก็ตีประโยชน์ที่กล่าวมาข้างต้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการควบคุมประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานได้อย่างเหมาะสม และเป็นไปตามเงื่อนไขของระบบที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงเกิดการพิจารณาตำแหน่งติดตั้งและจำนวนสายส่งที่ถูกปลดออกจากระบบเมื่อเกิด Contingency เพื่อให้ได้จุดขอบเขตความเป็นไปได้ที่เหมาะสมซึ่งทำได้ยากเพราะระบบสายส่งแต่ละระบบมีความแตกต่างกันทั้งลักษณะการจัดเรียงตัว รูปแบบการกระจายตัวของโหลด และปริมาณโหลดซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทุกช่วงเวลา การปลดสายส่งออกจึงต้องดำเนินการให้เหมาะสมกับระบบจำหน่ายที่กำลังพิจารณาเพื่อให้ระบบยังคงรักษาเสถียรภาพการทำงานให้เป็นปกติและเกิดประโยชน์สูงสุด

ปัญหาการปลดสายส่งจึงเกี่ยวข้องกับการวางแผนเพื่อกำหนดรูปแบบการเกิด Contingency ให้เหมาะสมทั้งในแง่ของตำแหน่งสาย (หมายเลขบัสในระบบ) ขนาด (ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังงานไฟฟ้าเสมือนที่บัสนั้นๆ) และจำนวน (จำนวนสายส่งทั้งหมดที่ยังคงทำงานอยู่ทั้งหมดในระบบที่เวลานั้นๆ)

3.4.1 ตัวแปรตัดสินใจปัญหาการปลดออกของสายส่ง

ในการศึกษานี้ได้แบ่งปัญหาการปลดสายส่งออกเป็น 3 รูปแบบได้แก่ *Type A*, *Type B*, และ *Type C* ตัวแปรตัดสินใจของปัญหาแต่ละรูปแบบจะมีความแตกต่างกัน โดยถ้ากำหนดให้ *NC* เป็นเซตซึ่งสมาชิกของเซตประกอบด้วยหมายเลขบัสสำหรับการปลดสาย ข้อมูลเบื้องต้นที่ทราบจากเซต *NC* จะเป็นตัวรูปแบบของการกำหนดปัญหา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ปัญหา *Type A*: ข้อมูลที่จะทราบจากเซต *NC* คือหมายเลขบัสของสมาชิกทั้งหมดในเซต ซึ่งหมายความว่าทั้งจำนวนบัสและหมายเลขบัสที่จะทำการปลดสายส่งออกได้ถูกกำหนดไว้แล้ว สิ่งที่ต้องการทราบคือ กำลังงานไฟฟ้าจริงและกำลังงานไฟฟ้าเสมือนในแต่ละบัสที่ระดับโหลดต่างๆ (Load Levels) ตัวแปรตัดสินใจของปัญหานี้จึงพิจารณาเพียงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในแต่ละบัสเท่านั้น

ปัญหา *Type B*: ข้อมูลที่ทราบจากเซต *NC* คือจำนวนสมาชิกทั้งหมดภายในเซตแต่ยังไม่ทราบว่าสมาชิกแต่ละตัวมีหมายเลขบัสเป็นเท่าใด (ไม่รู้ตำแหน่ง) ปัญหา *Type B* จึงเป็นปัญหาที่กำหนดจำนวนบัสที่ต้องทำการปลดออกไว้จำนวนหนึ่ง (พลังงานที่หายไป) สิ่งที่ต้องการทราบคือ หมายเลขหรือตำแหน่งที่ทำการปลด และค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสที่เหลือเป็นเท่าไรในแต่ละที่ระดับโหลด ตัวแปรตัดสินใจในปัญหานี้จึงได้แก่หมายเลขบัสและกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัส

ปัญหา *Type C*: เซต *NC* จะไม่มีข้อมูลใดๆ เกี่ยวกับการปลดออกของสายส่ง กล่าวคือ ปัญหา *Type C* ไม่ได้กำหนดเงื่อนไขใดๆ ของการปลดออกของสายส่ง สิ่งที่ต้องการทราบคือ ต้องการปลดสายส่งออกเท่าไร ณ ที่ตำแหน่งใด และกำลังไฟฟ้าที่เหลืออยู่ที่บัสต่างๆ ตอนนั้น ณ ระดับโหลดต่างๆควรมีค่าเท่าใด ด้วยเหตุนี้ตัวแปรตัดสินใจของปัญหาจึงประกอบด้วยจำนวนบัส หมายเลขบัส และค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละบัส

3.4.2 ฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาการปลดออกของสายส่ง

วัตถุประสงค์หลักของการจำลองเหตุการณ์การเกิด Contingency หรือการปลดออกของสายส่ง คือการควบคุมขนาดแรงดันบัสให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และการลดค่ากำลังสูญเสีย โดยทั่วไปการควบคุมขนาดแรงดันบัสได้ถูกใช้เป็นเงื่อนไขบังคับ ฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาการปลดออกของสายส่งจึงเกี่ยวข้องกับลดค่ากำลังสูญเสียของระบบอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$\min F = \sum_{j=1}^S T^j P_L^j \quad (3-37)$$

$$\min F = \sum_{j=1}^S k_e^j T^j P_L^j \quad (3-38)$$

เมื่อ T^j คือช่วงเวลารอบที่ j ณ ที่ระดับโหลดต่างๆ

P_L^j คือพลังงานที่สูญเสียรอบที่ j ณ ที่ระดับโหลดต่างๆ

k_e^j คือค่าราคาต่อหน่วยของพลังงานที่สูญเสียรอบที่ j ณ ที่ระดับโหลดต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ฟังก์ชันจุดประสงค์ใน (3-37) และ (3-38) พิจารณาเฉพาะการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ โดย (3-37) ต้องการให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวม (Total Energy Loss) จากทุกระดับโหลดมีค่าน้อยที่สุด ส่วน (3-38) ต้องการให้ผลรวมของมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากทุกระดับโหลดมีค่าน้อยที่สุด

3.4.3 เงื่อนไขบังคับสำหรับปัญหาการปลดออกของสายส่ง

ข้อพิจารณาประการแรกของการปลดออกของสายส่งคือ ระบบส่งภายหลังการปลดออกต้องสามารถทำงานได้อย่างปกติ เงื่อนไขบังคับในการปลดออกของสายส่งจึงแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ เงื่อนไขบังคับสำหรับการทำงานของระบบ และเงื่อนไขบังคับเกี่ยวกับการปลดสายส่งออกจริงในทางปฏิบัติ เงื่อนไขบังคับสำหรับการทำงานของระบบได้แก่สมการเพื่อความสมดุลพลังงานในระบบเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_i^j = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} |V_i^j V_n^j Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \quad (3-39)$$

$$Q_i^j = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} |V_i^j V_n^j Y_{in}| \sin(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \quad (3-40)$$

$$V^{\min} \leq |V_i^j| \leq V^{\max} \quad (3-41)$$

เงื่อนไขบังคับตาม (3-39) และ (3-40) เป็นสมดุลกำลังไฟฟ้า (Power Balance Equations) เงื่อนไขบังคับคือ (3-41) เป็นการควบคุมขนาดแรงดันบัสให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ในปัจจุบันอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ตามโรงงานอุตสาหกรรมหรือในบ้านเรือน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$Qc_k^j \leq Qc^{\max} \quad \text{where } k \in NC \quad (3-43)$$

$$k \notin NC_T \quad \text{where } k \in NC \quad (3-44)$$

จาก (3-43) เป็นเงื่อนไขบังคับเพื่อควบคุมขนาดทางกายภาพของตัวเก็บประจุผ่านทางปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเอง เพราะโดยทั่วไปขนาดทางกายภาพของตัวเก็บประจุจะแปรผันตรงกับปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สามารถจ่ายได้ ส่วน (3-44) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้

หมายเลขบัสซึ่งถูกเลือกขึ้นมาเพื่อติดตั้งตัวเก็บประจุต้องไม่เป็นสมาชิกของเซต NC_T ซึ่งเป็นเซตของหมายเลขบัสที่ไม่อนุญาตให้ปลดสายส่งออก

นอกจากเงื่อนไขบังคับข้างต้นแล้ว ยังมีเงื่อนไขบังคับอื่นที่เกิดจากรูปแบบของปัญหาการปลดสายส่งออกที่กำลังพิจารณา เช่น ถ้าเป็นปัญหา *Type B* และ *Type C* สมาชิกแต่ละตัวในเซต NC ต้องมีหมายเลขบัสไม่ซ้ำกัน

3.4.4 การแทนผลเฉลยของปัญหาการปลดสายออกด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

สิ่งสำคัญในการประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคกับการแก้ปัญหาการปลดสายส่งออกจากระบบ คือ การแทนผลเฉลยของปัญหาด้วยอนุภาค สิ่งที่มีผลต่อการแทนผลเฉลยด้วยอนุภาค ได้แก่ จำนวนตัวแปรตัดสินใจและจำนวนระดับโหนดที่จะนำมาพิจารณา เนื่องจากงานวิจัยนี้แบ่งปัญหาการปลดสายส่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ *Type A*, *Type B* และ *Type C* ซึ่งปัญหาแต่ละรูปแบบมีจำนวนตัวแปรตัดสินใจที่แตกต่างกัน การแทนผลเฉลยของปัญหาด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคจึงมีความแตกต่างกัน

สำหรับปัญหา *Type A* ตัวแปรตัดสินใจของปัญหาได้แก่ค่าพลังงานไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงหรือกำลังงานไฟฟ้าเสมือนในแต่ละบัส ณ ระดับโหนดต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากหมายเลขบัสของสมาชิกในเซต NC สำหรับติดตั้งตัวเก็บประจุได้ถูกกำหนดไว้แล้ว ถ้าเซต NC มีจำนวนสมาชิกเท่ากับ nc อนุภาคแต่ละตัวจึงแทนผลเฉลยด้วยลักษณะดังนี้

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{P}_{c_1} & \bar{P}_{c_2} & \dots & \bar{P}_{c_t} & \dots & \bar{P}_{c_{NC}} \\ \bar{Q}_{c_1} & \bar{Q}_{c_2} & \dots & \bar{Q}_{c_t} & \dots & \bar{Q}_{c_{NC}} \end{bmatrix} \quad (3-45)$$

$$\bar{P}_{c_t} = [P_{c_t}^1 \quad P_{c_t}^2 \quad \dots \quad P_{c_t}^j \quad \dots \quad P_{c_t}^S] \quad (3-46)$$

$$\bar{Q}_{c_t} = [Q_{c_t}^1 \quad Q_{c_t}^2 \quad \dots \quad Q_{c_t}^j \quad \dots \quad Q_{c_t}^S] \quad (3-47)$$

จำนวนมิติของอนุภาคแต่ละตัวสามารถคำนวณได้จาก

$$D = NC \times S \quad (3-48)$$

ในส่วนของปัญหา *Type B* ข้อมูลจากเซต NC คือจำนวนสมาชิกภายในเซต (จำนวนบัสที่ทำการปลดสายส่งออก) ตัวแปรตัดสินใจของปัญหาจึงได้แก่ หมายเลขบัสที่ทำการปลดสายส่งออก และค่ากำลังงานไฟฟ้า(ทั้งกำลังงานไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน) ที่บัสเหล่านั้น ณ ระดับโหลดต่างๆ ถ้าให้ NC คือจำนวนสมาชิกของเซต NC อนุภาคแต่ละตัวจะแทนผลเฉลยด้วยลักษณะดังนี้

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \overline{BC} & \overline{Pc}_1 & \overline{Pc}_2 & \dots & \overline{Pc}_t & \dots & \overline{Pc}_{NC} \\ \overline{BC} & \overline{Qc}_1 & \overline{Qc}_2 & \dots & \overline{Qc}_t & \dots & \overline{Qc}_{NC} \end{bmatrix} \quad (3-49)$$

$$\overline{BC} = [BC_1 \quad BC_2 \quad \dots \quad BC_t \quad \dots \quad BC_{NC}] \quad (3-50)$$

$$\overline{Pc}_t = [Pc_t^1 \quad Pc_t^2 \quad \dots \quad Pc_t^j \quad \dots \quad Pc_t^S] \quad (3-51)$$

$$\overline{Qc}_t = [Qc_t^1 \quad Qc_t^2 \quad \dots \quad Qc_t^j \quad \dots \quad Qc_t^S] \quad (3-52)$$

จำนวนมิติของอนุภาคแต่ละตัวสามารถคำนวณได้จาก

$$D = NC + (NC \times S) = NC \times (1 + S) \quad (3-53)$$

สำหรับปัญหา *Type C* เนื่องจากเซต NC ของปัญหา *Type C* ไม่ได้กำหนดเงื่อนไขใดๆ ในการปลดสายส่งออก ตัวแปรตัดสินใจของปัญหาจึงประกอบด้วยจำนวนบัส หมายเลขบัส และค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในแต่ละบัส ณ ระดับโหลดต่างๆ งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคแบบทวิภาค เพื่อลดจำนวนตัวแปรตัดสินใจให้เหลือเพียงหมายเลขบัสและค่า

กำลังงานไฟฟ้าในแต่ละบัสที่ต้องการ ถ้าระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนบัสเท่ากับ NB การแทนผลเฉลยด้วยอนุภาคจะมีลักษณะดังนี้

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{Uc} & \bar{Pc}_1 & \bar{Pc}_2 & \dots & \bar{Pc}_t & \dots & \bar{Pc}_{NB} \\ \bar{Uc} & \bar{Qc}_1 & \bar{Qc}_2 & \dots & \bar{Qc}_t & \dots & \bar{Qc}_{NB} \end{bmatrix} \quad (3-54)$$

$$\bar{Uc} = [Uc_1 \quad Uc_2 \quad \dots \quad Uc_k \quad \dots \quad Uc_{NB}] ; Uc_k \in \{0,1\} \quad (3-55)$$

$$\bar{Pc}_k = [Pc_k^1 \quad Pc_k^2 \quad \dots \quad Pc_k^j \quad \dots \quad Pc_k^S] \quad (3-56)$$

$$\bar{Qc}_k = [Qc_k^1 \quad Qc_k^2 \quad \dots \quad Qc_k^j \quad \dots \quad Qc_k^S] \quad (3-57)$$

Uc_k คือตัวแปรตัดสินใจซึ่งกำหนดสถานการณ์ปลดสายส่งออกในแต่ละบัส (0 = ไม่ปลดสายส่งออก และ 1 = ปลดสายส่งออก) จำนวนมิติของอนุภาคแต่ละตัวสามารถคำนวณได้จาก

$$D = NB + (NB \times S) = NB \times (1 + S) \quad (3-58)$$

3.4.5 ขั้นตอนการแก้ปัญหาการปลดออกของสายส่งด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

ขั้นตอนการแก้ปัญหาการปลดสายส่งออกด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค มีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: เตรียมข้อมูลเกี่ยวกับการคำนวณอาทิ

1. ข้อมูลของระบบจำหน่ายที่พิจารณา เช่น ค่าฐานของกำลังไฟฟ้า (Base MVA) ค่าฐานของแรงดันไฟฟ้า (Base Voltage) ข้อมูลโหลดและข้อมูลสายป้อน

2. ข้อมูลของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณฟังก์ชันจุดประสงค์
3. ค่าขอบบนและค่าขอบล่างของเงื่อนไขบังคับทั้งหมด
4. พารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาค เช่น จำนวนอนุภาคในกลุ่ม จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อย และค่าสัมประสิทธิ์ความเร่ง
5. ค่าพจน์ลงโทษ กรณีผลเฉลยไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ

ขั้นตอนที่ 2: กำหนดให้ $t=0$ เมื่อ t คือตัวนับจำนวนรอบการคำนวณ (Iteration Index)

ขั้นตอนที่ 3: สุ่มสร้างตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาคทั้งหมดในกลุ่มและกำหนดความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคทั้งหมดให้เท่ากับศูนย์

ขั้นตอนที่ 4: จากข้อมูลการปลดออกของสายส่งที่ปรากฏในแต่ละอนุภาค ให้คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและขนาดแรงดันบัส

ขั้นตอนที่ 5: คำนวณค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของอนุภาคทุกตัว โดยใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 6: คำนวณพจน์ลงโทษของอนุภาคทุกตัวในกลุ่ม พจน์ลงโทษของอนุภาคใดๆ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อผลเฉลยของอนุภาคนั้นสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ถ้าผลเฉลยของอนุภาคใดไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ พจน์ลงโทษของอนุภาคนั้นก็จะมีค่าตามที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 7: การคำนวณค่าความเหมาะสมของอนุภาคแต่ละตัวจากผลรวมของฟังก์ชันจุดประสงค์และพจน์ลงโทษของอนุภาคนั้น

ขั้นตอนที่ 8: กำหนดค่า $pbest_i^t$ และค่า $Gbest^t$ จากค่าความเหมาะสมของอนุภาคทั้งหมดในกลุ่ม

ขั้นตอนที่ 9: คำนวณความเร็วของแต่ละอนุภาค และปรับตำแหน่งของอนุภาคทั้งหมดในกลุ่มตามขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาค

ขั้นตอนที่ 10: ตรวจสอบว่า $t = nt$ (จำนวนรอบสูงสุดของการคำนวณ) หรือไม่ ถ้าใช่ให้ทำขั้นตอนที่ 11 ต่อไป แต่ถ้าไม่ใช่ให้กำหนด $t \rightarrow t+1$ และย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 11: ระบุผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุจากค่า $Gbest$ ในการคำนวณรอบสุดท้าย ผลเฉลยที่ต้องการประกอบด้วย หมายเลขบัสสำหรับการปลดออกขนาดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในแต่ละบัส

การระบุขนาด (ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน) ในแต่ละบัส ให้พิจารณาจากผลเฉลี่ยในแต่ละระดับโหลด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ขนาดในแต่ละบัสใดๆ กำหนดจากค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏที่บัสนั้นมีอยู่ ณ ระดับโหลดใดระดับหนึ่ง (พิจารณาที่ P และ Q สูงสุด)

3.5 การประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคกับปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน

3.5.1 ปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน

ปริมาณโหลดในระบบสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความต้องการใช้งานในแต่ละช่วงเวลาของวัน ปริมาณโหลดที่เปลี่ยนไปอาจทำให้เกิดปัญหาแรงดันต่ำเกิน (Undervoltage) หรือปัญหาแรงดันเกิน (Overvoltage) ในระบบ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีวิธีที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมแรงดัน วิธีหนึ่งซึ่งมีประสิทธิภาพและใช้อย่างแพร่หลายในการดำเนินการประจำวัน (Daily Operation) ของระบบจำหน่าย คือ การควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน (Voltage/Reactive Power Control; Volt/VAr Control)

การควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน หมายถึงการดำเนินการเพื่อคุมค่า (Regulate) แรงดันบัสและคุมค่ากำลังรีแอกทีฟหรือตัวประกอบกำลังที่สถานีไฟฟ้าย่อย โดยทั่วไปอุปกรณ์หลักที่ใช้สำหรับการควบคุมแรงดัน/กำลังรีไฟฟ้าเสมือนได้แก่ ตัวเปลี่ยนจุดแยกขณะมีโหลด (Under Load Tap Changer: ULTC) ซึ่งติดตั้งอยู่กับ หม้อแปลงหลักในสถานีไฟฟ้าย่อย ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยและตัวเก็บประจุในสายป้อน การควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน คือการกำหนดจุดทำงานของอุปกรณ์ทั้งสามให้เหมาะสม ซึ่งนอกจากจะเป็นการคุมค่าแรงดันและตัวประกอบกำลังของระบบแล้ว ยังช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบอีกด้วย

ตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงจะเปลี่ยนตำแหน่งเพื่อปรับค่าแรงดันบัสหตุติภูมิก็ต่อเมื่อขนาดแรงดันบัสหตุติภูมิมีค่าอยู่นอกขอบเขตที่กำหนดไว้ เมื่อแรงดันบัสหตุติภูมิซึ่งเป็นแรงดันต้นทางของสายป้อนมีค่าเปลี่ยนไป ขนาดของแรงดันที่บัสอื่นๆ จึงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่น สนวนตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยจะเปลี่ยนแปลงปริมาณการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน เมื่อตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ในขณะที่ตัวเก็บประจุในสายป้อนจะชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้ระบบ ตาม

ปริมาณโหลดเพื่อควบคุมขนาดแรงดันบั๊สและลดกำลังสูญเสียรวมของระบบ จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ทั้งสามตัวก็มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันในการปรับสถานะการทำงานของตัวเอง และการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ชนิดหนึ่งสามารถส่งผลต่อการเปลี่ยน สถานะการทำงานของอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งได้ ดังนั้น การประสานการทำงาน (Coordination) ระหว่างตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงและตัวเก็บประจุ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพราะหากไม่มีการประสานการทำงานระหว่างกัน ตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงและตัวเก็บประจุมีโอกาสทำงานบ่อยครั้งเกินไป จนทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษามีค่าเพิ่มขึ้นและอุปกรณ์มีอายุการใช้งานสั้นลง จากที่กล่าวมาข้างต้นปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนจึงเกี่ยวข้องกับข้อกำหนดสถานะการทำงานของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงและตัวเก็บประจุเพื่อให้งานสัมพันธ์กันอย่างเหมาะสมและส่งผลต่อการปรับปรุงสมรรถนะของระบบ

3.5.2 ตัวแปรตัดสินใจในปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนคือ การกำหนดตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงที่สถานีไฟฟ้าย่อย ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยและตัวเก็บประจุในสายป้อน ตัวแปรตัดสินใจจึงประกอบด้วยสถานะการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสามที่ระดับโหลดต่างๆ

3.5.3 ฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน

โดยทั่วไปฟังก์ชันจุดประสงค์ที่พบในปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน เกี่ยวข้องกับการลดกำลังสูญเสียของระบบ หรือการควบคุมค่าแรงดันบั๊สทุติยภูมิของสถานีไฟฟ้าย่อย ตัวอย่างฟังก์ชันจุดประสงค์ในปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนได้แก่

$$\text{Min } F = \sum_{j=1}^S T^j P_L^j \quad (3-59)$$

$$\text{Min } F = \sum_{j=1}^S k_e^j T^j P_L^j \quad (3-60)$$

$$\text{Min } F = \sum_{j=1}^S |V_{\text{sec}}^{\text{sch},j} - V_{\text{sec}}^{\text{act},j}| \quad (3-61)$$

การกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ตาม (3-59) และ (3-60) พิจารณาเรื่องการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ โดย (3-59) ต้องการให้พลังงานสูญเสียรวมจากทุกระดับโหนดมีค่าต่ำสุด ในขณะที่ (3-60) ต้องการให้มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากทุกระดับโหนดมีค่าต่ำสุด ส่วนฟังก์ชันจุดประสงค์ใน (3-61) ต้องการให้ค่าแรงดันสัมพัทธ์ที่ระดับโหนดต่างๆ เบี่ยงเบนออกจากค่าที่กำหนดไว้ให้น้อยที่สุด

3.5.4 เงื่อนไขบังคับของปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน

เงื่อนไขบังคับในปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ เงื่อนไขบังคับสำหรับการทำงานของระบบ และเงื่อนไขบังคับเกี่ยวกับจำนวนครั้งในการเปลี่ยนแปลงสถานะ (หรือการเปลี่ยนตำแหน่ง) ของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงและตัวเก็บประจุ เงื่อนไขบังคับสำหรับการทำงานของระบบ ประกอบด้วยสมการสมดุลกำลังไฟฟ้า การควบคุมขนาดแรงดันสัมพัทธ์และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของแรงดัน รวมทั้งค่าตัวประกอบกำลังของระบบ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$P_i^j = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} |V_i^j V_n^j Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \theta_n^j + \theta_i^j) \quad (3-62)$$

$$Q_i^j = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} |V_i^j V_n^j Y_{in}| \sin(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \quad (3-63)$$

$$V^{\min} \leq |V_i^j| \leq V^{\max} \quad (3-64)$$

$$THD_{V,i}^j \leq THD_V^{\max} \quad (3-65)$$

$$pf_{sys}^{\min} \leq |pf_{sys}^j| \leq pf_{sys}^{\max} \quad (3-66)$$

เงื่อนไขบังคับสำหรับจำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$N_{tap} = \sum_{j=1}^S |Tap^j - Tap^{j-1}| \leq N_{tap}^{\max} \quad (3-67)$$

$$N_{CS,m} = \sum_{j=1}^S |CS_m^j - CS_m^{j-1}| \leq N_{tap}^{\max} \quad (3-68)$$

$$N_{CF,n} = \sum_{j=1}^S |CF_n^j - CF_n^{j-1}| \leq N_{CF}^{\max} \quad (3-69)$$

$$Tap^{\min} \leq Tap^j \leq Tap^{\max} \quad (3-70)$$

$$0 \leq CS_m^j \leq CS_m^{\max} \quad (3-71)$$

$$0 \leq CF_n^j \leq CF_n^{\max} \quad (3-72)$$

เงื่อนไขบังคับใน (3-67) เป็นเงื่อนไขบังคับสำหรับจำกัดจำนวนครั้งในการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง เงื่อนไขบังคับใน (3-68) และ (3-69) เป็นการจำกัดจำนวนครั้งการสับเข้าและการปลดออกของตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยและตัวเก็บประจุในสายป้อน ส่วนเงื่อนไขบังคับใน (3-70) ถึง (3-72) นั้นเป็นการกำหนดขอบเขตสถานะการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสาม

3.5.5 การแทนผลเฉลยของปัญหาควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนด้วยอนุภาค

สิ่งสำคัญในการประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคกับปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนคือการแทนผลเฉลยของปัญหาด้วยอนุภาค ตัวแปรตัดสินใจของปัญหาประกอบด้วย ตำแหน่งปรับตั้งตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง สถานการณ์ทำงานของตัวเก็บประจุทั้งหมดในสายป้อน ถ้ากำหนดให้วงจรสายป้อนรับกำลังไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าสถานีย่อยเพียงเครื่องเดียว ตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงดัน ณ บัสต้นทางของสายป้อนก็จะมีเพียงชุดเดียว อนุภาคแต่ละตัวที่ใช้แทนผลเฉลยของปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนจึงมีลักษณะดังนี้

$$\bar{x} = [\overline{Tap} \quad \overline{CS} \quad \overline{CF}] \quad (3-73)$$

$$\overline{Tap} = [Tap^1 \quad Tap^2 \quad \dots \quad Tap^j \quad \dots \quad Tap^S] \quad (3-74)$$

$$\overline{CS} = [CS_1 \quad CS_2 \quad \dots \quad CS_m \quad \dots \quad CS_{ncs}] \quad (3-75)$$

$$\overline{CS}_m = [CS_m^1 \quad CS_m^2 \quad \dots \quad CS_m^j \quad \dots \quad CS_m^S] \quad (3-76)$$

$$\overline{CF} = [CF_1 \quad CF_2 \quad \dots \quad CF_n \quad \dots \quad CF_{ncf}] \quad (3-77)$$

$$\overline{CF}_n = [CF_n^1 \quad CF_n^2 \quad \dots \quad CF_n^j \quad \dots \quad CF_n^S] \quad (3-78)$$

จำนวนมิติของอนุภาคซึ่งใช้แทนผลเฉลยในปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนสามารถคำนวณได้จาก

$$D = (1 + n_{CF} + n_{CS}) \times S \quad (3-79)$$

3.5.6 ขั้นตอนการแก้ปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

การใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อแก้ปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนมีขั้นตอนคล้ายคลึงกับการแก้ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ แต่สำหรับปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือน ผลเฉลยจำนวนมากในปริภูมิการคนหาจะไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับที่กำหนดจำนวนครั้งในการเปลี่ยนแปลงสถานะ การทำงานของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงและตัวเก็บประจุด้วยเหตุนี้ จึงควรตรวจสอบอนุภาคทั้งหมดก่อนว่ามีอนุภาคใดบางที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับซึ่งกำหนด จำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานเมื่อตรวจสอบแล้ว จึงคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเฉพาะอนุภาคตัวที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับเหล่านี้เท่านั้น การทำเช่นนี้ช่วยลดเวลาในการคำนวณได้อย่างมาก การใช้ขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อแก้ปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังไฟฟ้าเสมือนมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: เตรียมข้อมูลเกี่ยวกับการคำนวณ เช่น

1. ข้อมูลของระบบจำหน่ายที่พิจารณา เช่น ค่าฐานข้อมูลของกำลังไฟฟ้า ค่าฐานของแรงดันไฟฟ้า ข้อมูลโหลด และข้อมูลสายป้อน
2. ข้อมูลของตัวแปรต่างๆ ในการคำนวณฟังก์ชันจุดประสงค์ เช่น ราคาต่อหน่วยของค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย และราคาต่อหน่วยของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย
3. ค่าขอบบนและค่าขอบล่างของเงื่อนไขบังคับทั้งหมด
4. พารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาค เช่น จำนวนอนุภาคในกลุ่ม จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อย และค่าสัมประสิทธิ์ความเร่ง
5. ค่าพจน์ลงโทษ กรณีผลเฉลยไม่สอดคล้องกันตามเงื่อนไขบังคับ

ขั้นตอนที่ 2: กำหนดให้ $t=0$ เมื่อ t คือตัวนับจำนวนรอบการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 3: สุ่มสร้างตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาคทั้งหมดในกลุ่ม และกำหนดความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคทั้งหมดให้เท่ากับศูนย์

ขั้นตอนที่ 4 : ตรวจสอบอนุภาคทั้งหมดในกลุ่มว่ามีอนุภาคมดบ้างที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับซึ่ง

กำหนดจำนวนครั้งในการเปลี่ยนแปลงสถานะ การทำงานของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง

รวมทั้งตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อน

- ขั้นตอนที่ 5: ให้พิจารณาเฉพาะอนุภาคที่สอดคล้องกับเงื่อนไข บังคับจำนวนครั้งการทำงานของตัวเก็บประจุ โดยนำข้อมูลสถานการณ์ทำงานซึ่งปรากฏอยู่ในแต่ละอนุภาค ไปคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงฮาร์มอนิก เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขนาดแรงดันบัล และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน
- ขั้นตอนที่ 6: คำนวณค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของอนุภาคทุกตัว โดยใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5
- ขั้นตอนที่ 7: คำนวณพจน์ลงโทษอนุภาคทุกตัวในกลุ่ม พจน์ลงโทษของอนุภาคใดๆจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อผลเฉลยของอนุภาคนั้นสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ถ้าผลเฉลยของอนุภาคใดไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ พจน์ลงโทษของอนุภาคนั้นก็จะมีค่าตามที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1
- ขั้นตอนที่ 8: คำนวณค่าความเหมาะสมของอนุภาคแต่ละตัวจากผลรวมของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์และพจน์ลงโทษของอนุภาคนั้น
- ขั้นตอนที่ 9: กำหนดค่า $pbest_t$ และค่า $Gbest_t$ จากค่าความเหมาะสมของอนุภาคทั้งหมดในกลุ่ม
- ขั้นตอนที่ 10: คำนวณความเร็วของแต่ละอนุภาค และปรับตำแหน่งของอนุภาคทั้งหมดในกลุ่มตามขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาค
- ขั้นตอนที่ 11: ตรวจสอบว่า $t = nt$ (จำนวนรอบสูงสุดของการคำนวณ) หรือไม่ ถ้าใช่ให้ทำขั้นตอนที่ 12 ต่อไป แต่ถ้าไม่ใช่ให้กำหนด $t \rightarrow t + 1$ และย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4
- ขั้นตอนที่ 12: ระบุผลเฉลยเหมาะที่สุดของปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุจากค่า $Gbest$ ในการคำนวณรอบสุดท้าย โดยผลเฉลยที่ได้จะแสดงข้อมูลตำแหน่งปรับเปลี่ยนตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงที่แต่ละระดับโหนด รวมทั้งค่ากำลังรีแอกทีฟซึ่งตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยและตัวเก็บประจุในสายป้อนต้องจ่ายให้แก่ระบบที่ระดับโหนดต่างๆ

3.7 สรุป

บทนี้เป็นการกล่าวถึงรูปแบบการพัฒนาเครื่องมือหรือ Algorithm ที่จะกำหนดขอบเขตบริเวณที่เป็นไปได้ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จะถูกจัดการหาโดยการพิจารณากรณีที่เกิดขึ้นระหว่างการส่งผ่านพลังงานของคู่แหล่งกำเนิดและโหลด การพิสูจน์ขอบเขตนี้สามารถหาค่าที่น้อยที่สุดระหว่างระยะทาง จากจุดโหลดด้านนอกขอบเขตมายังจุดด้านในบริเวณความเป็นไปได้ การคำนวณในบทนี้ใช้ขั้นตอนการเลือกจุดโดยใช้วิธีการตามรอยขอบ จากนั้นได้กล่าวถึงวิธีการนำวิธีการกลุ่มอนุภาคเข้ามาในการพิจารณาปัญหาต่างๆ ได้แก่การ แทนค่าตัวแปร การพิจารณาปัญหา การกำหนดรูปแบบการแก้ไขปัญหา เป็นต้น



บทที่ 4.

วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบทจากวิธีการแกะรอยขอบที่ได้จากการทดสอบระบบ IEEE 24 บัส และระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย ซึ่งจะมีรูปแบบลักษณะที่แตกต่างหลากหลายในการพิจารณาการส่งผ่านพลังงานในแต่ละพื้นที่ เพื่อที่จะวิเคราะห์ผลตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนพื้นที่ในการส่งผ่านพลังงาน และวัดความต้องการของโหลดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิมคือการแกะรอยขอบในบริเวณที่เป็นไปได้

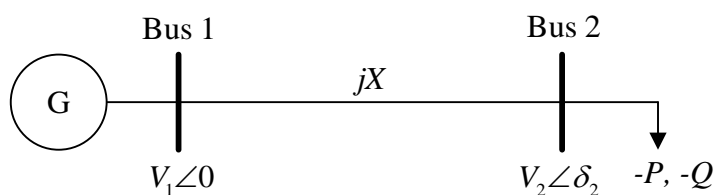
4.1 การส่งพลังงานจากต้นทางไปยังปลายทาง

วิธีการแกะรอยขอบที่ประยุกต์วิธีกลุ่มอนุภาคที่นำเสนอจะแสดงในส่วนนี้ โดยจะพิจารณาจากระบบ IEEE 24 บัสและระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย ซึ่งวิธีการแบบเดิม [21] จะแสดงการเปรียบเทียบบริเวณความเป็นไปได้ไปสู่บริเวณด้านนอกคือบริเวณที่สามารถหาค่าได้ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบรอยขอบที่ได้จากการแกะรอยที่เริ่มต้นมาจากการกำหนดจุดการทำงานสูงสุดในหลากหลายทิศทาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.1 วิธีการส่งผ่านพลังงาน

ตัวอย่างผลการทดสอบที่แสดงใน [14] แสดงให้เห็นว่า รอยขอบบริเวณที่สามารถหาค่าได้ โดยการใช้วิธี Continuation Power Flow บนระบบสองบัสซึ่งประกอบไปด้วย บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและบัสโหลดที่แสดงในรูปด้านล่างเมื่อ $V_1 = X = 1.0 p.u.$

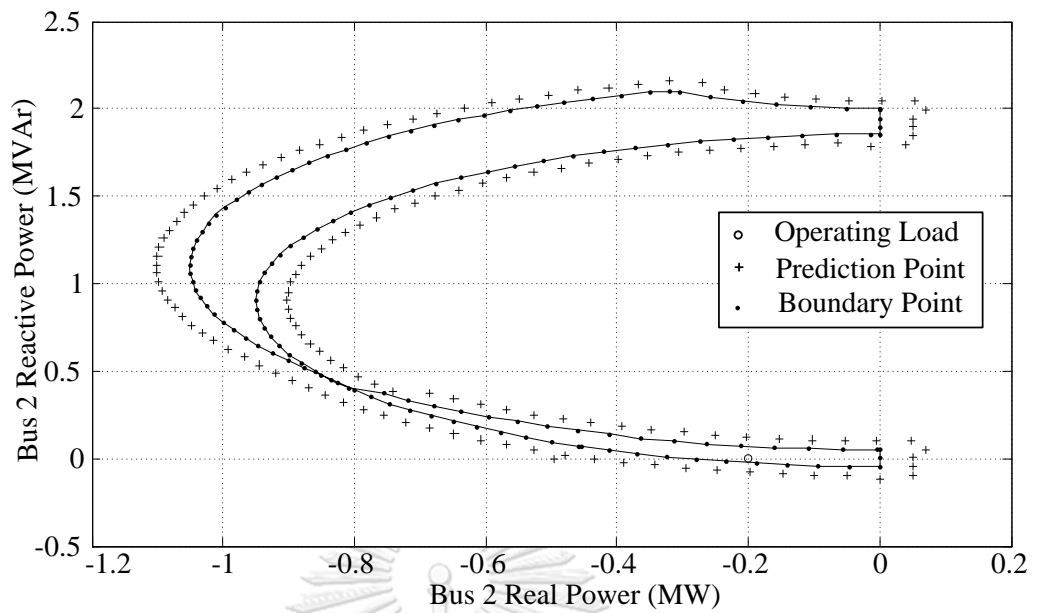


รูปที่ 4.1 การส่งผ่านพลังงานระหว่างระบบ 2 บัส [20]

ในการจำลองเหตุการณ์จะมีการตั้งข้อสังเกตว่าบัสโหลดจะถูกตั้งให้มีค่าเป็นลบ และบัสแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะถูกตั้งให้มีค่าเป็นบวก เพื่อที่จะสามารถกำหนดขอบเขตบริเวณที่เป็นไปได้ ดังนั้นในเหตุการณ์การจำลองนี้ส่วนนี้จะกำหนดขีดจำกัดของอุปกรณ์ลงในระบบ ซึ่งอยู่ในขอบเขตวิกฤตของแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0.95-1.05 p.u. จุดวิกฤตความจุของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ 0-2 MW และ ± 2 MVAr แรงการฉีดโหลด (Injection) ต้องไม่เป็นค่าบวกเนื่องจากเป็นโหลดบัสที่ไม่สามารถสร้างกำลังไฟฟ้าจริงได้ โดยการไหลของพลังงานไฟฟ้าเราพบว่าการฉีดโหลดด้วยปริมาณ $-0.2 + j0.0$ MVA ที่บัสที่สองคือจุดเริ่มต้นขอบเขตบริเวณความเป็นไปได้ ซึ่งจุดนี้ถูกเลือกเป็นจุดที่มีอยู่ของโหลดสำหรับการจำลองเหตุการณ์

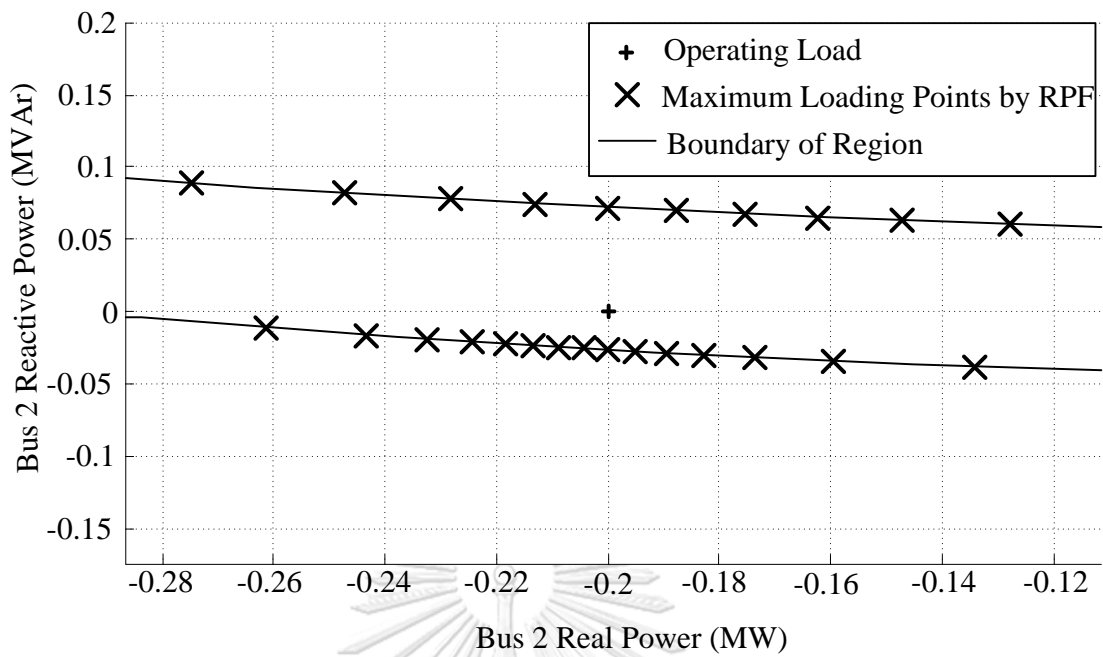
จากจุดโหลดที่มีอยู่ การจำลองเหตุการณ์เพื่อหาจุดเริ่มต้นและจุดการทำนายโดยอาศัยวิธีการ Repeated Power Flow ด้วยจังหวะ (Step) การเพิ่มขึ้นของโหลดทีละ $\sigma = 0.1$ MW ในทิศทางที่ถูกกำหนดโดย Power Factor จากจุดเริ่มต้นแรกในการข้อพิสูจน์ขอบเขตของจุดโหลดมีค่าเท่ากับ $-0.296 + j0.0$ MVA จุดการทำนายจุดแรกกำหนดได้จากการเปลี่ยนแปลงของจุดโหลดที่ $-0.2 + j0.0$ MVA นั้นทำให้ได้จุดการทำนายจุดแรกคือ $-0.496 + j0.0$ MVA

ขอบเขตที่ได้เกิดจากวิธีการแกะรอยขอบ ซึ่งวิธีการถูกกำหนดให้ใช้ตัวแปรการเพิ่มขึ้นของโหลดคือ l และมีบริเวณช่องว่างคือ d ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.05 p.u. บริเวณรอบนอกที่แสดงรูปร่าง (Region Contour) ถูกร่างอยู่บนระนาบการฉีดกำลังงานงานไฟฟ้าปรากฏ แกน X คือกำลังงานไฟฟ้าจริง และแกน Y คือกำลังงานไฟฟ้าเสมือนที่ถูกฉีดเข้าที่บัสที่สองตามลำดับ ผลลัพธ์ของวิธีการแกะรอยขอบถูกแสดงดังรูปต่อไปนี้

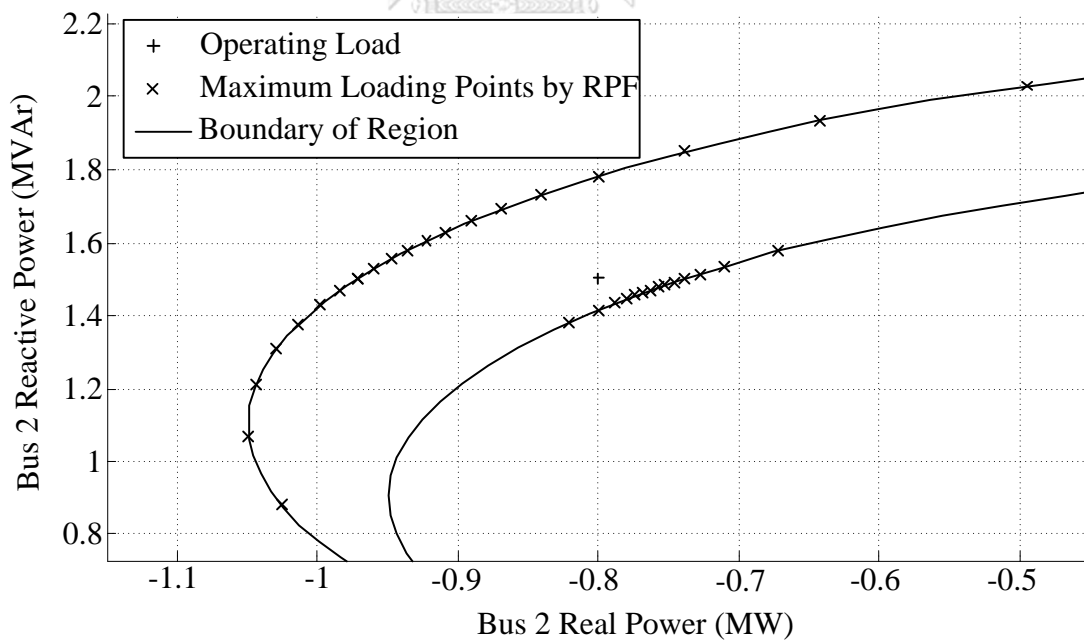


รูปที่ 4.2 แสดงกระบวนการแกะรอยขอบเพื่อหาขอบเขต [20]

จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่ามีจุดโหนดที่มีอยู่ภายในขอบเขตภูมิภาค (Region) เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลกับจุดโหนดสูงสุด การฉีดโหนดด้วยปริมาณ $-0.8+j1.5$ MVA คือจุดที่ถูกเลือกบนพื้นฐานที่ได้มาจากกรณีศึกษาอื่นๆ จากสองจุดการทำงานที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถหาจุดการทำงานสูงสุดของโหนดโดยวิธีการ Repeated Power Flow โดยในการจำลองเหตุการณ์นี้มีการเปลี่ยนแปลงของโหนดที่หลากหลายทิศทางรอบจุดการทำงานที่มีอยู่ของโหนด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบผลการแกะรอยขอบได้จากรูปด้านล่าง

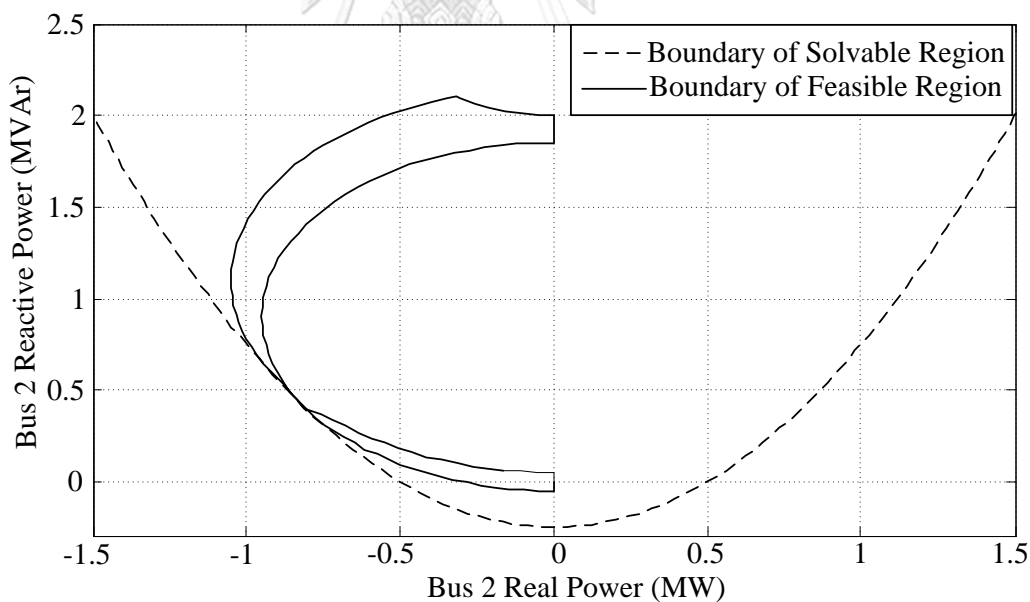


รูปที่ 4.3 จุดการทำงานของโหลดสูงสุดจากกรณีพื้นฐานที่ $-0.2+j0.0$ MVA [20]



รูปที่ 4.4 จุดการทำงานของโหลดสูงสุดจากกรณีพื้นฐานที่ $-0.8+j1.5$ MVA [20]

ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าจุดโหลดสูงสุดที่ได้รับอยู่บนขอบเขตภูมิภาคได้มาจากวิธีการแกะรอยขอบที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งมีจุดการทำงานสูงสุดอยู่บนระนาบ ซึ่งได้มาจากทิศทางที่หลากหลายของโหลด บริเวณขอบเขตภูมิภาคนี้ถูกกำหนดโดยขีดจำกัดของอุปกรณ์ที่พิจารณาในปัญหา ข้อจำกัดเหล่านี้คือข้อจำกัดในทางปฏิบัติของการดำเนินการทางระบบไฟฟ้ากำลัง รูปด้านล่างเปรียบเทียบระหว่างเส้นขอบเขตภูมิภาคที่ได้รับกับบริเวณภูมิภาคที่สามารถหาค่าได้ ซึ่งบริเวณที่สามารถหาค่าได้ถูกกำหนดอยู่ใน [14] เส้นโค้งบริเวณที่สามารถหาค่าได้เป็นจุดที่ถูกกำหนดโดยการใช้วิธีการแกะรอยขอบ แต่ปัญหาการหาค่าที่ต่ำที่สุด (Minimization) คือการคำนวณโดยละเลยการจำกัดของเครื่องมือในทางปฏิบัติ สามารถสังเกตได้ว่าเส้นขอบเขตภูมิภาคของขีดจำกัดของอุปกรณ์มีขนาดเล็กกว่าขอบเขตภูมิภาคที่สามารถหาค่าได้มาก เส้นขอบเขตภูมิภาคนี้เรียกว่าบริเวณที่เป็นไปได้ มีรูปแบบที่หลากหลายในการกำหนด [9]-[13] ถึงอย่างไรก็ตามระบบที่ใช้ทดสอบนี้เป็นระบบอย่างง่ายแก่การเข้าใจ จุดประสงค์ของวิธีการแกะรอยขอบในวิทยานิพนธ์นี้ ต้องการที่จะใช้ทดสอบกับระบบที่ใหญ่กว่าเพื่อที่จะศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีต่อบริเวณที่เป็นไปได้

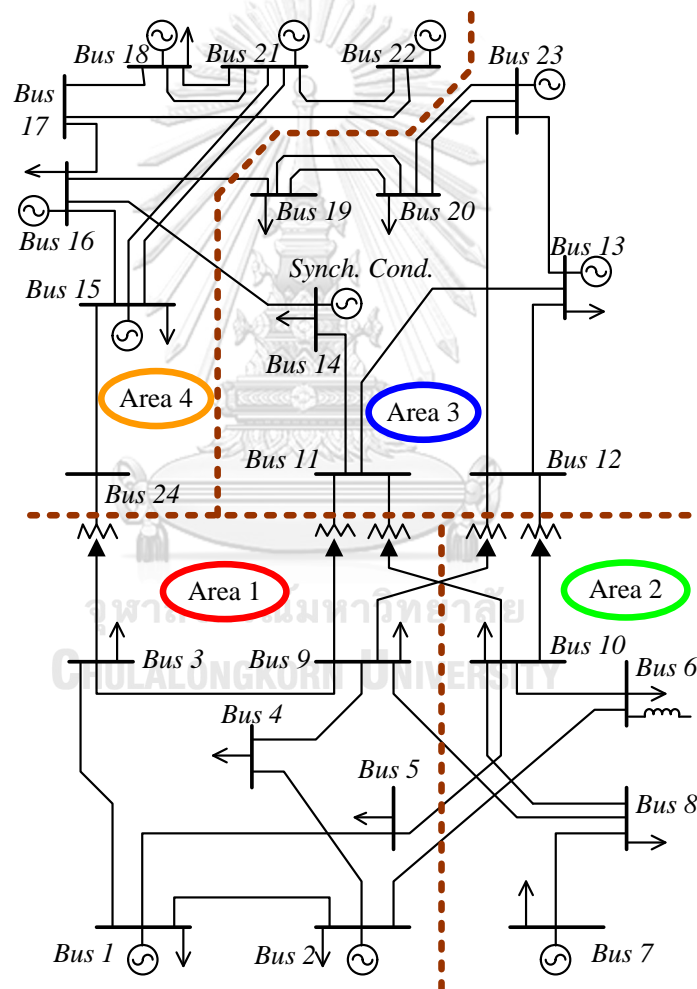


รูปที่ 4.5 บริเวณที่เป็นไปได้และบริเวณที่สามารถหาค่าได้ของระบบศึกษาสองบัส [20]

4.2 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.1 ข้อมูลระบบทดสอบ IEEE 24 บัส

ระบบทดสอบ IEEE 24 บัส [22] ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 ตัว ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ 1 ตัว และสายส่งจำนวน 38 เส้น ซึ่งแสดงอยู่ในรูปด้านล่าง ข้อมูลลักษณะของระบบทดสอบ แสดงในตาราง ซึ่งแสดงอยู่ที่บทความผนวก



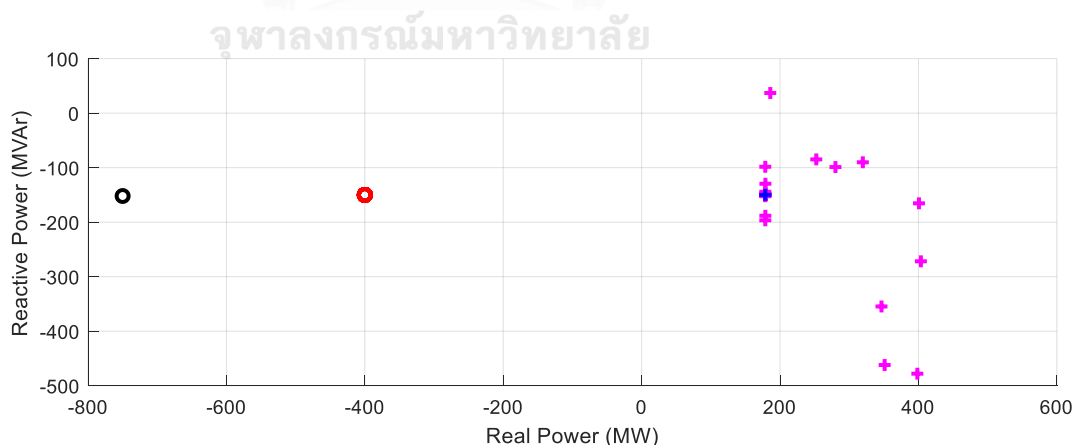
รูปที่ 4.6 ระบบทดสอบ IEEE 24 บัส

4.3 ตัวอย่างผลการทดสอบ

4.3.1 วิธีการแกะรอยขอบกับการประยุกต์วิธีการกลุ่มอนุภาค

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะแบ่งกรณีศึกษาเป็นทั้งหมด 15 กรณี เป็นระบบทดสอบแรก IEEE 24 บัส 12 กรณีและระบบทดสอบที่สองคือระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย 3 กรณี ปัญหาที่นำมาพิจารณาคือเมื่อเกิดเหตุการณ์ Contingency ในระบบทดสอบมีสิ่งที่จะต้องพิจารณาคือจำนวนบัสสูงสุดที่ยังคงสามารถทำได้หากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่ง และจำนวนกำลังงานทั้งหมดที่อยู่ในแต่ละบัส ทั้งนี้เพื่อพิสูจน์ว่าวิธีการกลุ่มอนุภาคสามารถนำมาประยุกต์เข้ากับวิธีการดั้งเดิมได้อย่างไร โดยการเชื่อมโยงคือการนำเอาวิธีการแกะรอยขอบมาคำนวณเพื่อหาจุดเริ่มต้นของกระบวนการสุ่มด้วยวิธีการกลุ่มอนุภาค ซึ่งจากรูปที่แสดงด้านล่างนี้จะมีสองจุดที่ห่างออกจากตัวกลุ่มจุดคำตอบ ซึ่งมาจากวิธีการแกะรอยขอบ นั่นคือ “จุดเริ่มต้น” และ “จุดการทำนาย” เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้มาจากสองจุดนี้จะเป็นขอบเขตบริเวณที่อยู่ในบริเวณที่เป็นไปได้ และกลุ่มจุดที่อยู่ห่างออกมาคือกลุ่มบริเวณคำตอบของช่วงโหลดที่ได้มาจากวิธีการกลุ่มอนุภาค

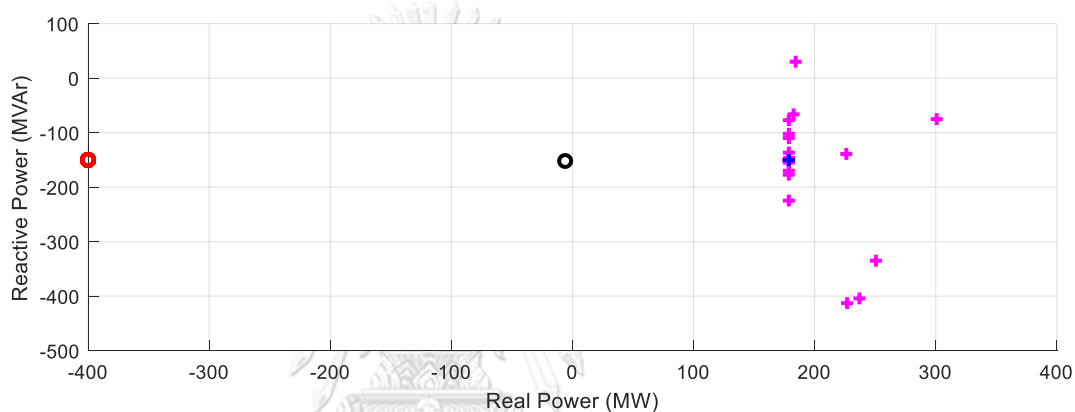
กรณีที่ 1 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 4 ใช้เวลาทั้งสิ้น 7.870732 วินาที



รูปที่ 4.7 วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 4

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 16 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 8 บัส มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 170-410 MW และ ± 500 MVar มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j150$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโหลด และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยขอบคือ $-780-j150$ MVA ซึ่งเป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโหลด

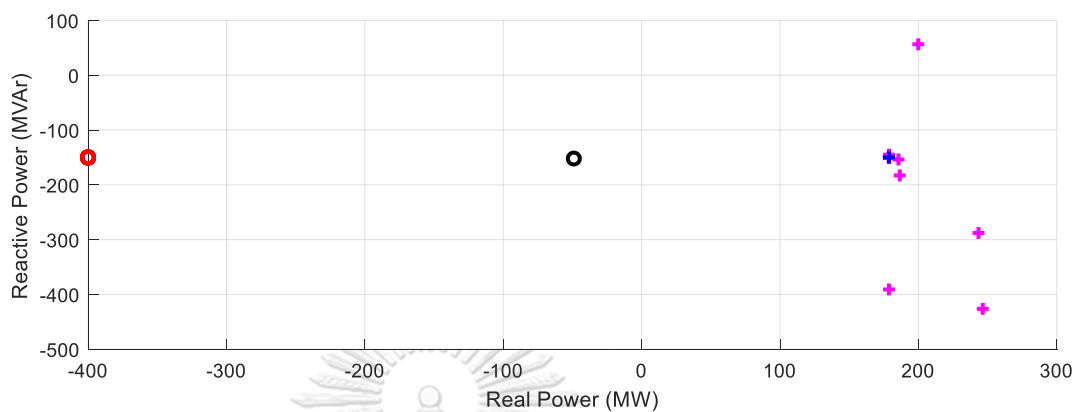
กรณีที่ 2 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 4 ใช้เวลาทั้งสิ้น 5.732304 วินาที



รูปที่ 4.8 วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 4

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 17 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 7 บัส มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 180-300 MW และ ± 420 MVar มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j150$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโหลด และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยขอบคือ $-5-j150$ MVA ซึ่งเป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโหลด

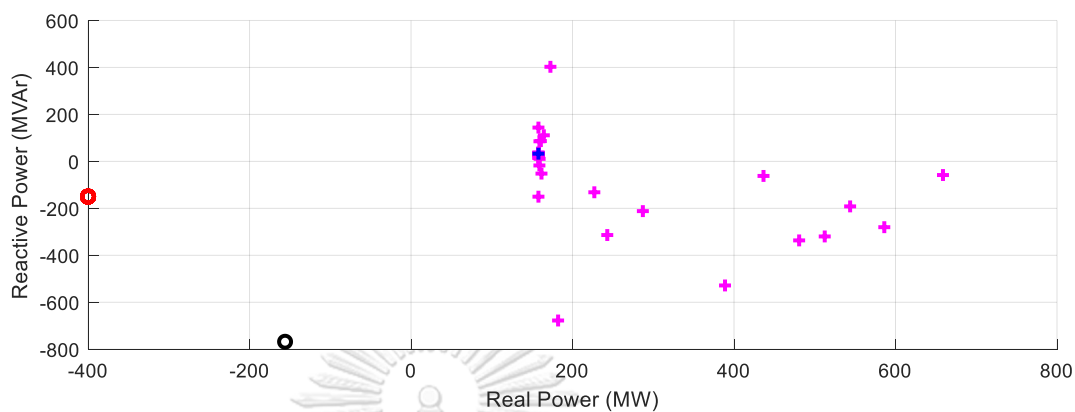
กรณีที่ 3 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 4 ใช้เวลาทั้งสิ้น 5.568922 วินาที



รูปที่ 4.9 วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 4

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 8 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 16 บัส ซึ่งเป็นไปไม่ได้ แต่หากพิจารณาจากรูปแล้วจะพบว่า มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 180-250 MW และ ± 420 MVar มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j150$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโหลด และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยขอบคือ $-50-j150$ MVA เป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโหลด ซึ่งเป็นไปได้ว่าบริเวณที่กลุ่มอนุภาคพิจารณาหาคำตอบอาจจะอยู่นอกขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้ เพราะเนื่องจากบริเวณที่ 1 อาจจะมีบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลดในบริเวณที่ 4

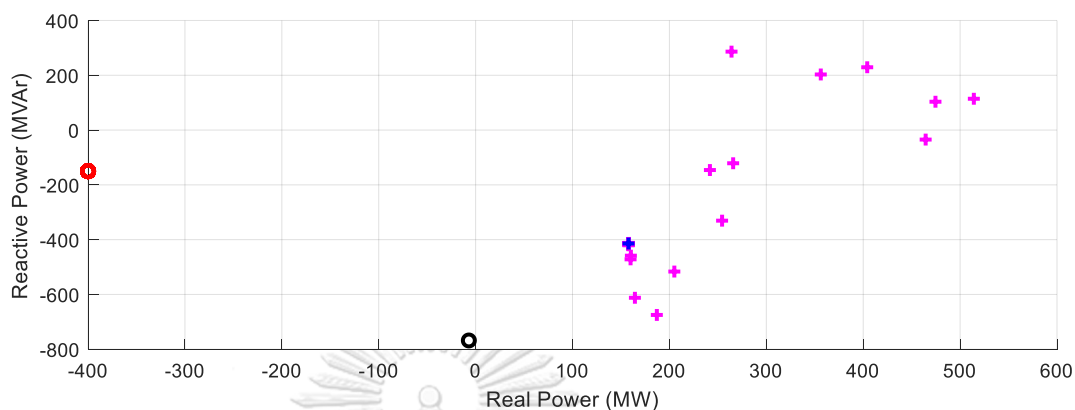
กรณีที่ 4 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 4 ไปยังพื้นที่ 3 ใช้เวลาทั้งสิ้น 5.281644 วินาที



รูปที่ 4.10 วิธีการแกะรอยชอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 4 ไปยังพื้นที่ 3

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 22 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 4 บัส มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 180-640 MW และ ± 650 MVar เนื่องจากในบริเวณนี้อาจมีความแตกต่างของระดับโวลต์ในแต่ละบัสค่อนข้างมาก มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j180$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโวลต์ และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยชอบคือ $-180-j790$ MVA ซึ่งเป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโวลต์

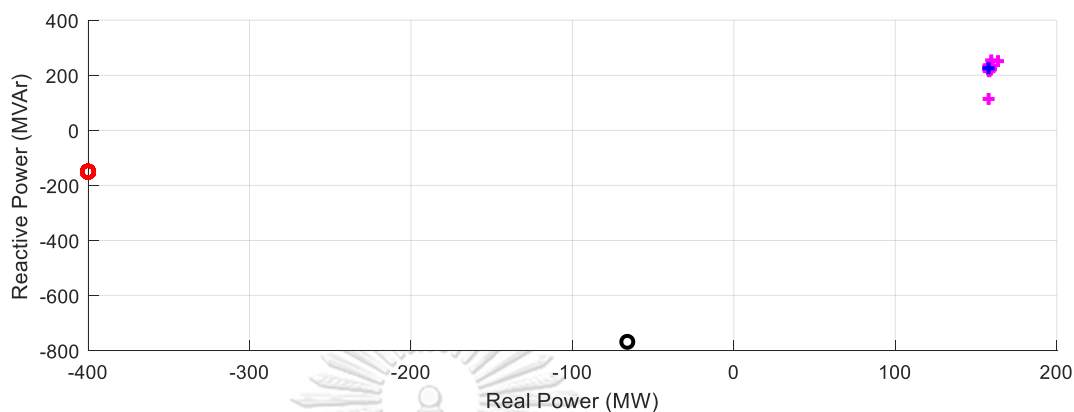
กรณีที่ 5 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 ใช้เวลาทั้งสิ้น 6.067592 วินาที



รูปที่ 4.11 วิธีการแกะรอยชอกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 16 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 8 บัส มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 150-530 MW และ ± 700 MVar เนื่องจากในบริเวณนี้อาจมีความแตกต่างของระดับโวลต์ในแต่ละบัสค่อนข้างมาก มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j180$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโวลต์ และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยชอคือ $-10-j790$ MVA ซึ่งเป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโวลต์

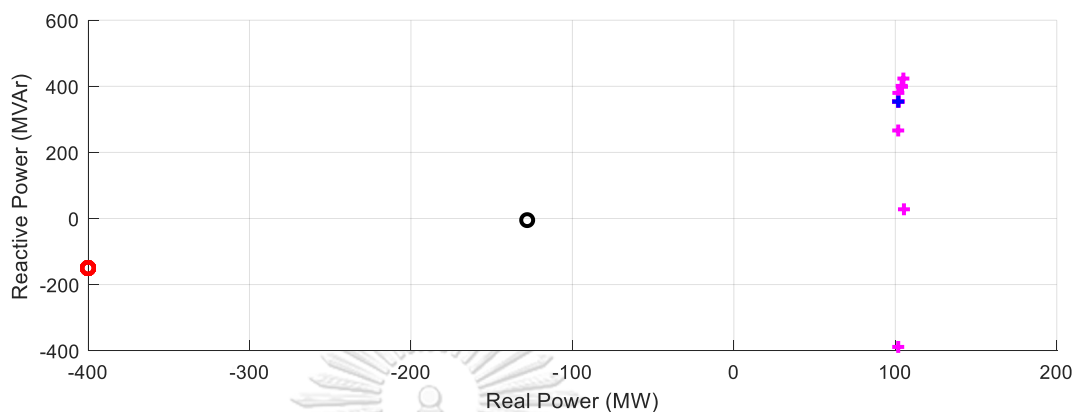
กรณีที่ 6 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 3 ใช้เวลาทั้งสิ้น 5.501238 วินาที



รูปที่ 4.12 วิธีการแกะรอยชอกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 3

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 5 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 19 บัส ซึ่งเป็นไปไม่ได้ แต่หากพิจารณาจากรูปแล้วจะพบว่า มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 150-160 MW และ ± 250 MVar มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j180$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโหลด และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยชอคือ $-60-j790$ MVA เป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโหลด ซึ่งเป็นไปได้ว่าบริเวณที่กลุ่มอนุภาคพิจารณาหาค่าตอบอาจจะอยู่นอกขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้ เพราะเนื่องจากบริเวณที่ 1 อาจจะมีบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลดในบริเวณที่ 3

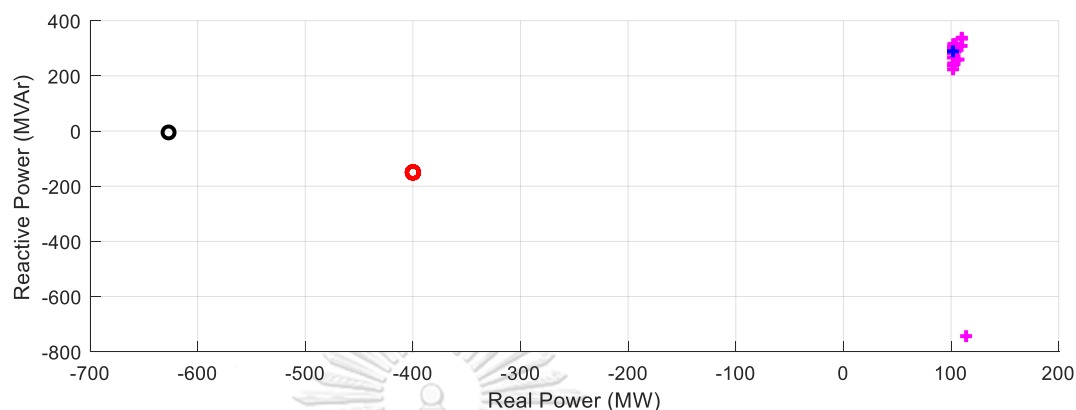
กรณีที่ 7 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 4 ไปยังพื้นที่ 2 ใช้เวลาทั้งสิ้น 5.630462 วินาที



รูปที่ 4.13 วิธีการแกะรอยชอกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 4 ไปยังพื้นที่ 2

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 9 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 15 บัส ซึ่งเป็นไปไม่ได้ แต่หากพิจารณาจากรูปแล้วจะพบว่า มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 100-110 MW และ ± 250 MVAR ซึ่งมีความแตกต่างกันไม่มาก เนื่องจากพื้นที่ 2 อาจมีโหลดอยู่น้อยและมีการบริโภคโหลดที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงและสม่ำเสมอ มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j180$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโหลด และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยชอคือ $-40-j0$ MVA เป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโหลด ซึ่งเป็นไปได้ว่าบริเวณที่กลุ่มอนุภาคพิจารณาหาค่าตอบอาจจะอยู่นอกขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้ เพราะเนื่องจากบริเวณที่ 2 อาจจะมีจำนวนบัสที่น้อยกว่าบริเวณพื้นที่ 3 อยู่มากส่งผลให้พารามิเตอร์ในการพิจารณาโหลดในบริเวณนั้นอยู่นอกบริเวณที่สามารถหาค่าได้

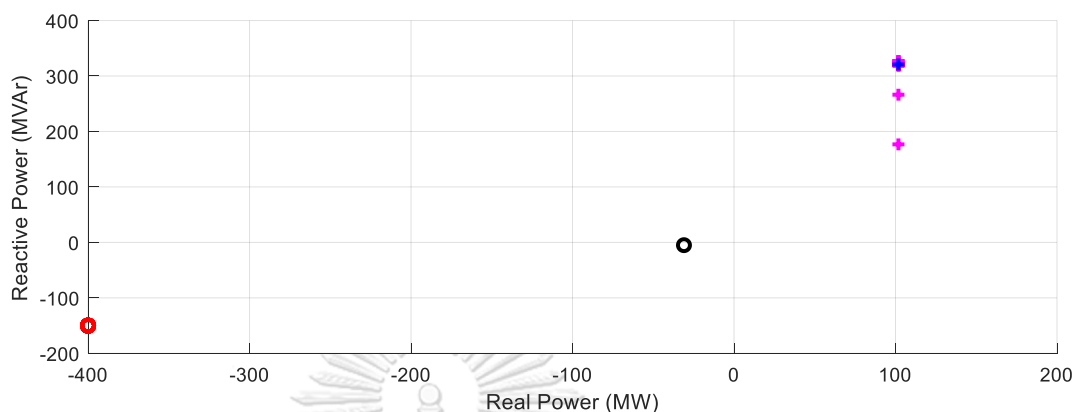
กรณีที่ 8 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 2 ใช้เวลาทั้งสิ้น 5.629762 วินาที



รูปที่ 4.14 วิธีการแกะรอยชอกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 2

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 9 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 15 บัส ซึ่งเป็นไปไม่ได้ แต่หากพิจารณาจากรูปแล้วจะพบว่า มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 100-110 MW และ ± 380 MVAR ซึ่งมีความแตกต่างกันไม่มาก เนื่องจากพื้นที่ 2 อาจมีโหลดอยู่น้อยและมีการบริโภคโหลดที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงและสม่ำเสมอ มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j180$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโหลด และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยชอคือ $-630-j0$ MVA เป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโหลด ซึ่งเป็นไปได้ว่าบริเวณที่กลุ่มอนุภาคพิจารณาค่าตอบอาจจะอยู่นอกขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้ เพราะเนื่องจากบริเวณที่ 2 อาจจะมีจำนวนบัสที่น้อยกว่าบริเวณพื้นที่ 3 อยู่มากส่งผลให้พารามิเตอร์ในการพิจารณาโหลดในบริเวณนั้นอยู่นอกบริเวณที่สามารถหาค่าได้

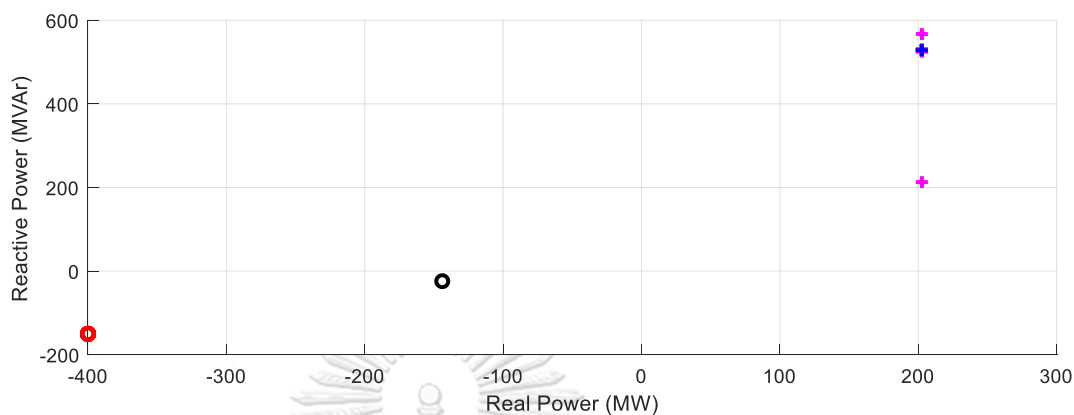
กรณีที่ 9 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 ใช้เวลาทั้งสิ้น 5.659762 วินาที



รูปที่ 4.15 วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 5 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 19 บัส ซึ่งเป็นไปไม่ได้ แต่หากพิจารณาจากรูปแล้วจะพบว่า มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 100-105 MW และ ± 320 MVar ซึ่งมีความแตกต่างกันไม่มาก เนื่องจากพื้นที่ 1 และบริเวณพื้นที่ 2 มีจำนวนบัสที่นำมาพิจารณาไม่มาก หรืออาจมีโหลดอยู่น้อยและมีการบริโภคโหลดที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงและสม่ำเสมอ มีจุดการทำงานจุดแรกอยู่ที่ $-400-j150$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโหลด และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยขอบคือ $-40-j0$ MVA เป็นจุดแรกในการทำการนายการเปลี่ยนแปลงของโหลด ซึ่งเป็นไปได้ว่าบริเวณที่กลุ่มอนุภาคพิจารณาหาค่าตอบอาจจะอยู่นอกขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้ เพราะเนื่องจากบริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 อาจจะมีจำนวนบัสที่น้อยกว่าบริเวณพื้นที่อื่นอยู่มากส่งผลให้พารามิเตอร์ในการพิจารณาโหลดในบริเวณนั้นอยู่นอกบริเวณที่สามารถหาค่าได้

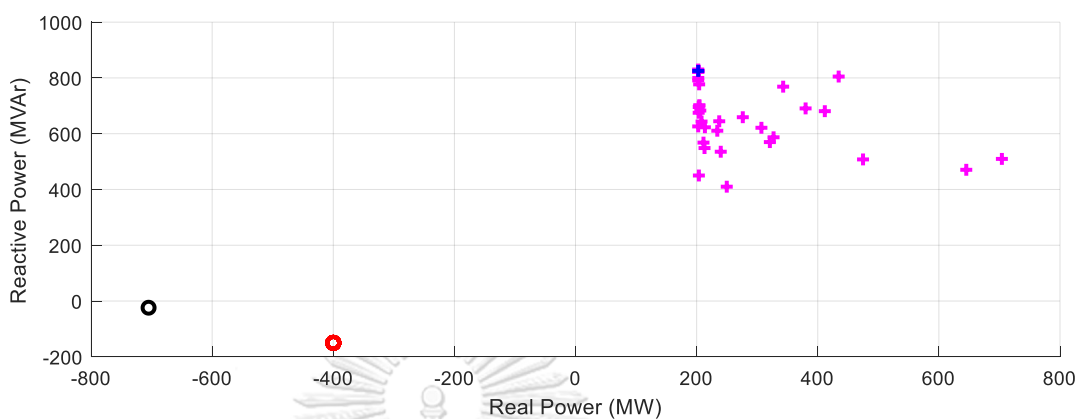
กรณีที่ 10 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 4 ไปยังพื้นที่ 1 ใช้เวลาทั้งสิ้น 5.423816 วินาที



รูปที่ 4.16 วิธีการแกะรอยชอกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 4 ไปยังพื้นที่ 1

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 5 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 16 บัส ซึ่งเป็นไปไม่ได้ แต่หากพิจารณาจากรูปแล้วจะพบว่า มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 100-105 MW และ ± 590 MVAR ซึ่งมีความแตกต่างกันไม่มาก เนื่องจากพื้นที่ 1 อาจมีโหลดอยู่น้อยและมีการบริโภคโหลดที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงและสม่ำเสมอ มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j180$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโหลด และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยชอคือ $-150-j10$ MVA เป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโหลด ซึ่งเป็นไปได้ว่าบริเวณที่กลุ่มอนุภาคพิจารณาค่าตอบอาจจะอยู่นอกขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้ เพราะเนื่องจากบริเวณที่ 1 อาจจะมีจำนวนบัสที่น้อยกว่าบริเวณพื้นที่ 4 อยู่มากส่งผลให้พารามิเตอร์ในการพิจารณาโหลดในบริเวณนั้นอยู่นอกบริเวณที่สามารถหาค่าได้

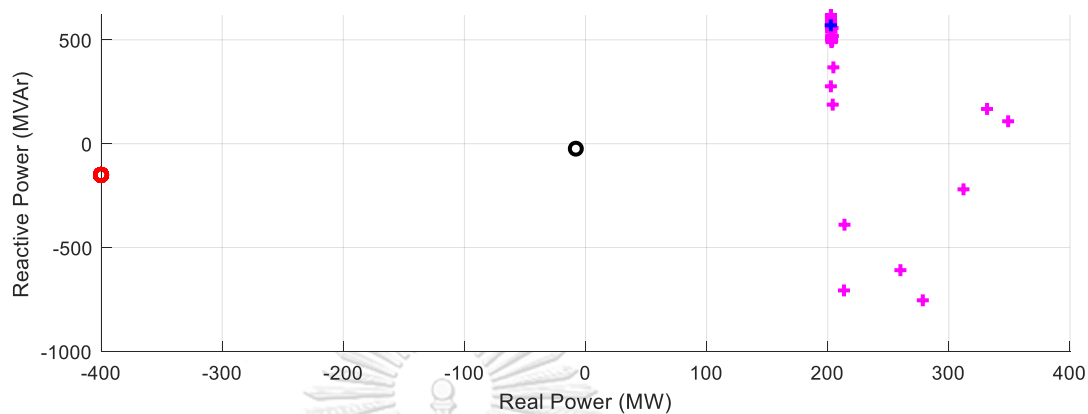
กรณีศึกษาที่ 11 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 ใช้เวลาทั้งสิ้น 5.761015 วินาที



รูปที่ 4.17 วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 22 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 2 บัส มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 200-650 MW และ ± 810 MVar เนื่องจากในบริเวณนี้อาจมีความแตกต่างของระดับโวลต์ในแต่ละบัสค่อนข้างมาก มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j180$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโวลต์ และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยขอบคือ $-700-j30$ MVA ซึ่งเป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโวลต์ หากสังเกตพฤติกรรมจากรูปสามารถวิเคราะห์ได้ว่าระบบค่อนข้างที่จะมีเสถียรภาพ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโวลต์ไม่มาก การผลิตพลังงานในพื้นที่ 3 เพียงพอต่อความต้องการของโวลต์ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในพื้นที่ 1 ไม่ทำงาน

กรณีที่ 12 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 1 ใช้เวลาทั้งสิ้น 5.821640 วินาที

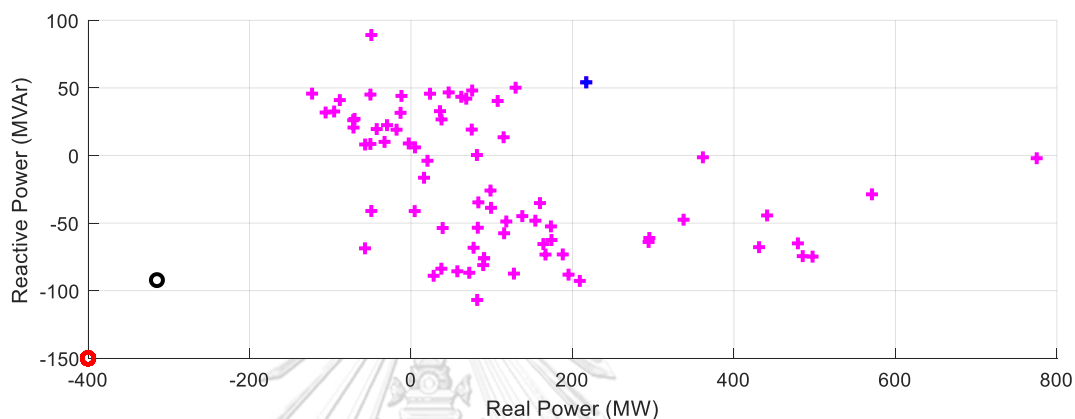


รูปที่ 4.18 วิธีการแกะรอยชอกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 1

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 16 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 8 บัส มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 200-350 MW และ ± 700 MVar เนื่องจากในบริเวณนี้อาจมีความแตกต่างของระดับโหนดในแต่ละบัสค่อนข้างมาก มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j180$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโหนด และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยชอคือ $-10-j30$ MVA ซึ่งเป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโหนด

4.3.2 วิธีการแกะรอยขอกับการประยุกต์วิธีการกลุ่มอนุภาค: ระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย

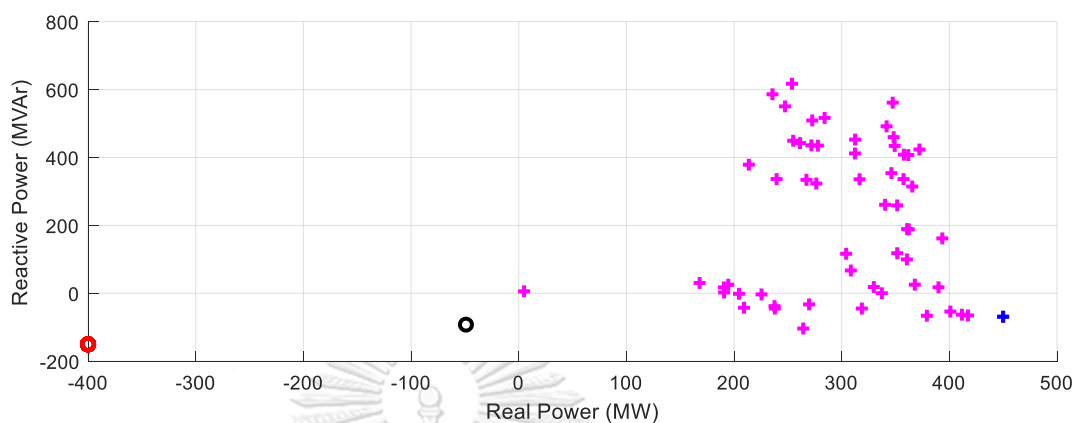
กรณีที่ 1 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 4 ใช้เวลาทั้งสิ้น 9.105336 วินาที



รูปที่ 4.19 วิธีการแกะรอยขอกับการประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 4

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 298 บัส ซึ่งหมายความว่า จะมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 15 บัส มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง $\pm 180-790$ MW และ ± 110 MVar เนื่องจากในบริเวณนี้อาจมีความแตกต่างของระดับโวลต์ในแต่ละบัสค่อนข้างมาก มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j150$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโวลต์ และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยขอคือ $-300-j90$ MVA ซึ่งเป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโวลต์ หากสังเกตพฤติกรรมจากรูปสามารถวิเคราะห์ได้ว่าระบบมีการบริโวลต์ที่ค่อนข้างหลากหลายและมีขนาดที่ค่อนข้างแตกต่างกัน การผลิตพลังงานในพื้นที่ 3 เพียงพอสอดคล้องความต้องการของโวลต์ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในพื้นที่ 4 ไม่ทำงาน เนื่องจากพารามิเตอร์ทุกตัวอยู่ในบริเวณที่สามารถหาค่าได้หรือในบริเวณที่เป็นไปได้

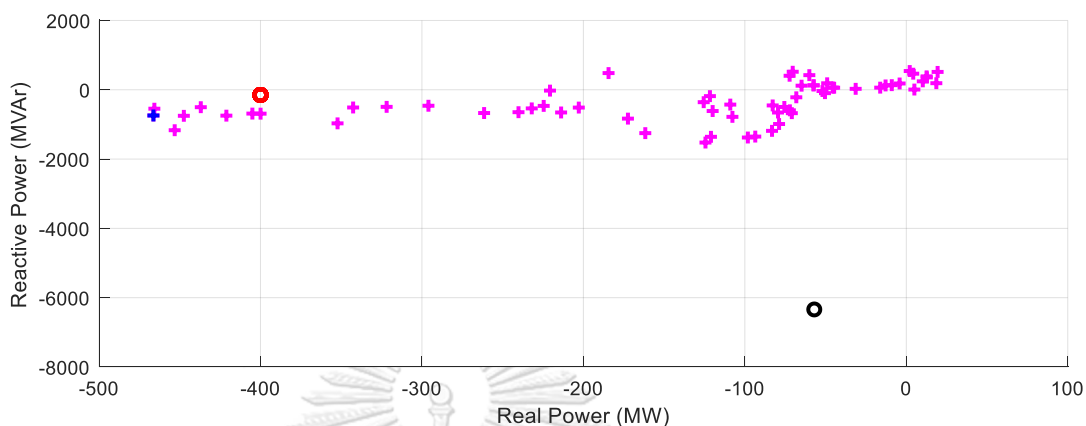
กรณีที่ 2 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 4 ใช้เวลาทั้งสิ้น 8.410019 วินาที



รูปที่ 4.20 วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 4

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 280 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 33 บัส มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 0-450 MW และ ± 620 MVar เนื่องจากในบริเวณนี้อาจมีความแตกต่างของระดับโวลต์ในแต่ละบัสค่อนข้างมาก มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j180$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโวลต์ และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยขอบคือ $-50-j100$ MVA ซึ่งเป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโวลต์ หากสังเกตพฤติกรรมจากรูปสามารถวิเคราะห์ได้ว่าระบบมีการบริโวลต์ที่ค่อนข้างหลากหลายและมีขนาดที่ค่อนข้างแตกต่าง การผลิตพลังงานในพื้นที่ 2 เพียงพอต่อความต้องการของโวลต์ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในพื้นที่ 4 ไม่ทำงาน เนื่องจากพารามิเตอร์ทุกตัวอยู่ในบริเวณที่สามารถหาค่าได้หรือในบริเวณที่เป็นไปได้

กรณีที่ 3 จากการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 ใช้เวลาทั้งสิ้น 8.731256 วินาที



รูปที่ 4.21 วิธีการแกะรอยขอบกับวิธีประยุกต์กลุ่มอนุภาคจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3

จากรูปแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่งจะต้องมีจำนวนบัสที่สามารถทำงานได้เป็นปกติทั้งหมด 300 บัส ซึ่งหมายความว่าต้องมีจำนวนบัสสูงสุดที่สามารถหลุดออกจากระบบได้ทั้งหมด 13 บัส มีพลังงานทั้งหมดอยู่ในช่วง -470 ถึง 30 MW และ ± 1800 MVar เนื่องจากในบริเวณนี้ส่วนมากค่าพลังงานติดลบเนื่องจากความต้องการของโหลดมีมากกว่าผลิต มีความแตกต่างของระดับโหลดในแต่ละบัสค่อนข้างมาก มีจุดการทำนายจุดแรกอยู่ที่ $-400-j0$ MVA เป็นจุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ของโหลด และจุดเริ่มต้นในการแกะรอยขอบคือ $-50-j90$ MVA ซึ่งเป็นจุดแรกในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโหลด หากสังเกตพฤติกรรมจากรูปสามารถวิเคราะห์ได้ว่าระบบมีการบริโหลดที่ค่อนข้างหลากหลายและมีขนาดที่ค่อนข้างแตกต่างกัน การผลิตพลังงานในพื้นที่ 2 ไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลดในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในพื้นที่ 3 ไม่ทำงาน

บทที่ 5.

สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในส่วนนี้จะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ในส่วนแรกจะกล่าวถึงข้อสรุปของผลการทดสอบที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 และในส่วนที่สอง จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะสำหรับการทดสอบในส่วนที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้ทำการพิจารณา

5.1 สรุปผลการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้เน้นผลการทดสอบที่แสดงผลด้วยวิธีการประยุกต์กลุ่มอนุภาคเข้ากับวิธีเดิมคือการแสดงผลด้วยวิธีการแกะรอยขอบ หาขอบเขตความเป็นไปได้ของจุดทำงานโหลด โดยการคำนวณเริ่มต้นจะพิจารณาจุดในบริเวณที่เป็นไปได้ของการทำงานโหลดในการส่งผ่านพลังงานระหว่างบริเวณสองพื้นที่คือบริเวณที่จ่ายพลังงานและบริเวณที่รับพลังงาน หรือบริเวณที่บริโภคโหลด ซึ่งเงื่อนไขในการหาจุดการทำงานจะต้องไม่ละเมิดเงื่อนไขการทำงานที่เป็นปกติของระบบ ในวิธีการที่ปรากฏอยู่ก่อนคือการแกะรอยขอบเขตจะต้องมีการหาจุดการทำงานเริ่มต้น เพื่อที่จะแกะรอยขอบหาจุดทำนายต่อไป โดยการใช้วิธีการดำเนินการทางเวกเตอร์จนเกิดเป็นขอบเขตถัดไป ในขณะที่จะมีกระบวนการคัดสรรเพื่อกำหนดจุดขอบวงถัดไปที่ใกล้เข้ามาโดยพิจารณาจากการหาระยะทางที่ใกล้ที่สุดจากจุดทำนายจุดก่อน ซึ่งจะเป็จุดที่อยู่ในบริเวณความเป็นไปได้ วิธีการใหม่ได้เพิ่มการประยุกต์ใช้วิธีการกลุ่มอนุภาคเข้ามาเพื่อที่จะค้นหาจำนวนบัสสูงสุดที่ยังสามารถทำงานได้หากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่ง ซึ่งเงื่อนไขบังคับได้แก่ สมการสมดุลกำลังไฟฟ้า ขนาดแรงดันบัส จำนวนบัสที่ยังคงสถานะการทำงานเป็นปกติ

5.1.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

ระบบที่ใช้ในการทดสอบคือระบบ IEEE 24 บัสและระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย สำหรับพารามิเตอร์ของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการหาผลเฉลย ได้กำหนดให้อนุภาคในกลุ่ม

ประกอบด้วย 350 อนุภาค และจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดเท่ากับ 100 รอบ การกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเกิดขึ้นเมื่อค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายใน 30 รอบการคำนวณ ความเร็วของกลุ่มอนุภาคเมื่อไม่มีการกระตุ้น ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อยมีค่าลดลงอย่างเชิงเส้นจาก 0.9 ในการคำนวณรอบแรกจนเหลือ 0.4 ในการคำนวณรอบสุดท้าย ใช้ c_1 และ c_2 มีค่าเท่ากับ 2.0 ซึ่งผลจากการทดสอบได้แสดงในตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการสอบระบบ IEEE 24 บัส

กรณี ที่	พื้นที่ จ่าย (Source Area)	พื้นที่ รับ (Sink Area)	Maximum Load (MW)	Minimum Load (MW)	เวลา (วินาที)	จำนวน บัสที่ ทำงาน	จุดเริ่มต้น การทำงาน (MVA)	เวลาที่ ใช้ต่อจุด (วินาที)
1	3	4	410	170	7.8707	16	-400-j150	0.4919
2	2	4	300	180	5.7323	17	-400-j150	0.3371
3	1	4	250	180	5.5689	8*	-400-j150	0.6961
4	4	3	640	180	5.2816	22	-400-j180	0.2400
5	2	3	530	150	6.0675	16	-400-j180	0.3792
6	1	3	160	150	5.5012	5*	-400-j180	1.1002
7	4	2	110	100	5.6304	9*	-400-j180	0.6256
8	3	2	110	100	5.6297	9*	-400-j180	0.6255
9	1	2	105	100	5.6597	5*	-400-j150	1.1319
10	4	1	105	100	5.4238	5*	-400-j180	0.6779
11	3	1	650	200	5.7610	22	-400-j180	0.2618
12	2	1	350	200	5.8216	16	-400-j180	0.3638

จากตารางจะสังเกตได้ว่ามีบริเวณที่ระบบยังสามารถทำได้เป็นปกติทั้งหมด 6 บริเวณจากทั้งหมด 12 บริเวณเนื่องจากอีก 6 บริเวณ กลุ่มอนุภาคไม่สามารถหาค่าตอบได้เนื่องจากอยู่นอกปริภูมิการค้นหาหรืออยู่บริเวณที่เรียกว่าไม่สามารถหาค่าได้ เป็นผลมาจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ไม่สมบูรณ์ เช่น บริเวณที่ส่งและบริเวณที่รับมีความไม่สัมพันธ์กันในด้านพลังงานที่ต้องการ คือ ด้านบริเวณที่ส่งอาจจะไม่สามารถผลิตได้เท่ากับความต้องการพลังงาน หรือด้านที่ส่งผลิตพลังงาน

เกินความต้องการของบริเวณที่รับ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้องเช่น บางกรณีสามารถหาค่าตอบได้ แต่ช่วงคำตอบอยู่ในบริเวณที่สามารถหาค่าได้และไม่สามารถหาค่าได้ทำให้วิธีการอนุภาคไม่สามารถหาค่าตอบที่ถูกต้องได้

ตารางที่ 5.2 ผลการสอบระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย

กรณี ที่	พื้นที่ จ่าย (Source Area)	พื้นที่ รับ (Sink Area)	Maximum Load (MW)	Minimum Load (MW)	เวลา (วินาที)	จำนวน บัสที่ ทำงาน	จุดเริ่มต้น การ ทำนาย (MVA)	เวลาที่ใช้ ต่อจุด (วินาที)
1	3	4	790	-180	9.1053	298	-400- j150	0.0305
2	2	4	450	0	5.7323	280	-400- j180	0.0204
3	2	3	30	-470	8.7312	300	-400-j0	0.0291

จากตารางระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยจะทำการคงสถานะบริเวณที่ 1 คือบริเวณภาคกลางไว้ เนื่องจากสมมติให้เป็นบริเวณที่เป็นแหล่งจ่ายเสมอ จึงพิจารณาการส่งผ่านอีก 3 บริเวณคือ อีสาน (พื้นที่ 2) ภาคใต้ (พื้นที่ 3) ภาคเหนือ (พื้นที่ 4) หากสังเกตพฤติกรรมจากรูปการส่งผ่านบริเวณพื้นที่ 3 ไปพื้นที่ 4 จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าระบบมีการบริโภคโหลดที่ค่อนข้างหลากหลายอันเนื่องมาจากเป็นพื้นที่ที่กว้าง และระยะทางค่อนข้างไกลคือจากภาคใต้ไปภาคเหนือ การผ่านพื้นที่ภาคกลางอาจทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดและมีขนาดค่อนข้างแตกต่าง การส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่หนึ่งไปอีกพื้นที่หนึ่งค่อนข้างจะมีเสถียรภาพสามารถหาค่าตอบได้เนื่องจากปริมาณการค้นหาอยู่ในขอบเขตความเป็นไปได้ และพลังงานที่ส่งผ่านในบริเวณพื้นที่ 3 พอเพียงพอต่อบริเวณพื้นที่ 4 และมีค่าพลังงานติดลบหมายถึงในบริเวณนั้นมีบางบัสต้องการพลังงานชดเชยเข้าไป

ผลลัพธ์ตัวเลขที่แสดงในงานวิจัยนี้ได้แสดงถึงความผันผวนของระบบในช่วงเวลาการส่งผ่านพลังงานในแต่ละพื้นที่ที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งได้จากวิธีการแกะรอยขอบประยุคต์วิธีกลุ่มอนุภาค โดยการใช้ระบบทดสอบทั้งหมด 2 ระบบคือระบบ IEEE 24 บัส และระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยในลักษณะกรณีที่แตกต่างกัน เพื่อสังเกตพฤติกรรมความผันผวนของคู่ที่ส่งผ่านพลังงานในแต่ละคู่

ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร หากมีการเปลี่ยนแปลงบริเวณการส่งผ่าน จุดการทำงานของบัสโหลดที่ได้รับเกิดจากการสุ่มอนุภาคเพื่อหาคำตอบบริเวณช่วงค่าพลังงานที่บัสนั้นยังคงสถานะการทำงานได้อย่างเป็นปรกติหากเกิดเหตุการณ์การหลุดออกของสายส่ง

5.1.2 ประโยชน์และการนำไปใช้

ประโยชน์ที่ได้รับจากหัวข้องานวิจัยนี้คือ การแสดงรูปแบบออกมาเป็นแผนภาพเพื่อวิเคราะห์ของความสามารถในการทำงานของระบบในแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาการส่งผ่านพลังงานในแต่ละพื้นที่แล้วสุ่มหาผลเฉลยคำตอบด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค ในช่วงปริภูมิการค้นหาที่อยู่ในขอบเขตค่าที่สามารถหาคำตอบได้ ซึ่งวิเคราะห์ในรูปแบบของการพิจารณาจุดความเป็นไปได้ของโหลดประยุกต์เข้ากับวิธีการเดิมคือการแกะรอยขอบเขต ซึ่งวิธีการเดิมหาขอบเขตโดยการจำลองเหตุการณ์การไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการหาเงื่อนไขการทำงานในระบบในสภาพะปรกติ โดยการพิจารณา ระดับแรงดัน กระแสที่ไหลผ่านสายส่งในแต่ละเส้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ คือจุดปริภูมิที่ใช้สำหรับการทำนายและแกะรอยขอบโดยใช้วิธีการ Repeated Power Flow และเป็นช่วงปริภูมิการพิจารณาหาคำตอบของวิธีการใหม่คือ Particle Swarm Optimization ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับการกำหนดจุดโหลดที่สามารถทำงานได้ เมื่อมีความผันผวนของระบบอย่างต่อเนื่องโดยการคงสถานะการทำงานจากระบบให้ทำงานเป็นปรกติ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงออกมาในรูปแบบจุดการทำงานของแต่ละบัสในระบบที่วิเคราะห์ จุดที่อยู่ในบริเวณที่เป็นไปได้สามารถหาค่าได้ ส่วนจุดที่อยู่นอกขอบเขตบริเวณที่สามารถหาค่าได้ ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลได้ บริเวณขอบเขตความเป็นไปได้คือบริเวณที่ระบบสามารถทำงานได้อย่างเป็นปรกติเมื่อเกิดการผันผวนซึ่งแสดงออกมาในรูปแบบของจุดความต้องการของโหลด (Load Margin) ซึ่งจะบอกถึงทิศทางการเปลี่ยนแปลงของโหลดบนระนาบแกน P และแกน Q รูปภาพของขอบเขตความเป็นไปได้บอกถึงขอบเขตที่ระบบอนุญาตให้สามารถทำงานได้เป็นปรกติ เมื่อมีความเป็นไปได้ที่จะมีการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างต่อเนื่องบริเวณที่มีการเชื่อมต่อและส่งผ่านพลังงาน ในขณะที่การกำหนดความต้องการของโหลดด้วยวิธีการเดิม มีการกำหนดรูปแบบแค่เส้นพลังงานจริงสูงสุดในทิศทางที่เฉพาะเจาะจงเพื่อกำหนดเป็นจุดโหลดเริ่มต้นในการทำนาย จุดโหลดสามารถเคลื่อนย้ายไปยังระดับแกนพลังงานจริงที่สูงขึ้นด้วยการชดเชยพลังงานเสมือนที่เหมาะสม ในบางครั้งจุดโหลดก็ยากที่จะเคลื่อนแกนพลังงานจริงที่สูงขึ้น เนื่องจากเงื่อนไขการกำหนดรูปร่างของบริเวณที่เป็นไปได้ ซึ่งรูปแบบของบริเวณที่เป็นไปได้เป็นการใช้เพื่อกำหนดรูปแบบการทำงานของระบบ

นอกจากนี้จุดขอบเขตนอกสุดจากวิธีการเดิมยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาข้อมูลการตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการค้นหาด้วยวิธีอนุภาคประยุกต์ให้มีทิศทางที่แม่นยำมากขึ้น เมื่อมีการจำลองเหตุการณ์การส่งผ่านพลังงาน นอกจากนี้จุดขอบเขตนอกสุดได้แสดงความเป็นไปได้ของการขยายจุดความเป็นไปได้เพื่อใช้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆอีกด้วย เช่น การตั้งค่าระดับแรงดันในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และอนุภาคเริ่มต้นในการค้นหาคำตอบ ซึ่งปัจจัยพารามิเตอร์เหล่านี้ต้องอาศัยการสังเกตโดยการพิจารณาเมื่อจำลองเหตุการณ์การส่งผ่านพลังงาน

แม้ว่าผลลัพธ์ในวิทยานิพนธ์นี้จะให้ข้อมูลมากกว่าผลลัพธ์ของการกำหนดโหลดโดยวิธีการทั่วไป แต่ข้อมูลที่มากขึ้นก็ยิ่งทำให้การคำนวณหรือการพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆเพิ่มขึ้นตามมาอีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวิธีการนี้ถูกประยุกต์ใช้เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยเฉพาะกับระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ นี่คือข้อเสียของวิธีการที่เสนอแต่อย่างไรก็ตามวิธีการใหม่นี้ใช้เวลาในการคำนวณผลน้อยกว่าวิธีการเดิม เนื่องจากมีวิธีกลุ่มอนุภาคช่วยเลือกสรรช่วงคำตอบและวิธีการนี้ก็ยังสามารถใช้ทดสอบกับระบบขนาดใหญ่ที่จะมีการปิดระบบเพื่อวางแผน (Off-line Planning)

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการพัฒนาวิธีการเดิมคือ การกำหนดบริเวณที่เป็นไปได้ของโหลดด้วยวิธีการตามรอยขอบเขต [21] เป็นวิธีการใหม่คือ การวางแผนที่เหมาะสมและการกำหนดบริเวณที่เป็นไปได้ของโหลดโดยการใช้ทฤษฎีตามรอยขอบเขตด้วยการประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเป็นวิธีการใหม่สำหรับการวิเคราะห์และแสดงตัวอย่างของโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง ถึงอย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้เจาะลึกถึงรายละเอียดของระบบ เช่น การแสดงหมายเลขบัส การพัฒนาต่อยอดวิธีการนี้ในอนาคตสามารถประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคกับบริเวณที่ไม่สามารถหาค่าได้ เพื่อหาขอบเขตปริภูมิที่ไกลออกไปอีกและเงื่อนไขการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง ข้อมูลของจุดในบริเวณที่เป็นไปได้ ยังใช้เป็นดัชนีชี้วัดสำหรับเปรียบเทียบรูปแบบการวางแผนหรือทำนายการบริโภคโหลดในอนาคตได้อีกด้วย ถึงอย่างไรก็ตามรูปแบบการแสดงผลโดยวิธีกลุ่มอนุภาคยังสามารถพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นได้อีก โดยการใช้คำสั่งแสดงผลหรือเครื่องมือวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในอนาคตมาประยุกต์ใช้เข้ากับเทคนิคเดิมได้อีกด้วย

บรรณานุกรม

- [1] V. Ajjarapu and C. Christy, "The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, Article vol. 7, no. 1, pp. 416-423, 1992, doi: 10.1109/59.141737.
- [2] H. D. Chiang, A. J. Flueck, K. S. Shah, and N. Balu, "CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations," *IEEE Transactions on Power Systems*, Article vol. 10, no. 2, pp. 623-634, 1995, doi: 10.1109/59.387897.
- [3] R. Maliszewski, G. Rozier, and R. Cummings, "Available transfer capability definitions and determination," *Princeton, NJ: North American Electric Reliability Council*, 1996.
- [4] A. B. Khairuddin, S. S. Ahmed, M. W. Mustafa, A. A. M. Zin, and H. Ahmad, "A novel method for ATC computations in a large-scale power system," *IEEE Transactions on Power Systems*, Article vol. 19, no. 2, pp. 1150-1158, 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825933.
- [5] Y. Ou and C. Singh, "Assessment of available transfer capability and margins," *IEEE Transactions on Power Systems*, Article vol. 17, no. 2, pp. 463-468, 2002, doi: 10.1109/TPWRS.2002.1007919.
- [6] W. Li, P. Wang, and Z. Guo, "Determination of optimal total transfer capability using a probabilistic approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, Article vol. 21, no. 2, pp. 862-868, 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.873106.
- [7] L. Min and A. Abur, "Total transfer capability computation for multi-area power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Article vol. 21, no. 3, pp. 1141-1147, 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.876690.
- [8] Y. Del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, and R. G. Harley, "Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 12, no. 2, pp. 171-195, 2008.
- [9] T. J. Overbye, "A Power Flow Measure for Unsolvable Cases," *IEEE Transactions*

- on *Power Systems*, Article vol. 9, no. 3, pp. 1359-1365, 1994, doi: 10.1109/59.336130.
- [10] T. J. Overbye, "Computation of a practical method to restore power flow solvability," *IEEE Transactions on Power Systems*, Article vol. 10, no. 1, pp. 280-287, 1995, doi: 10.1109/59.373951.
- [11] S. N. Singh and S. C. Srivastava, "Corrective action planning to achieve a feasible optimal power flow solution," *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, Article vol. 142, no. 6, pp. 576-582, 1995, doi: 10.1049/ip-gtd:19952216.
- [12] S. Granville, J. C. O. Mello, and A. C. G. Melo, "Application of interior point methods to power flow unsolvability," *IEEE Transactions on Power Systems*, Article vol. 11, no. 2, pp. 1096-1103, 1996, doi: 10.1109/59.496200.
- [13] A. G. C. Conceição and C. A. Castro, "A new approach to defining corrective control actions in case of infeasible operating situations," in *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings*, 2001, vol. 3, pp. 46-51, doi: 10.1109/PTC.2001.964880. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80053370065&doi=10.1109%2fPTC.2001.964880&partnerID=40&md5=5c322feab630ac17151a06ad78a70493>
- [14] I. A. Hiskens and R. J. Davy, "Exploring the power flow solution space boundary," *IEEE Transactions on Power Systems*, Article vol. 16, no. 3, pp. 389-395, 2001, doi: 10.1109/59.932273.
- [15] C. A. Cañizares and F. L. Alvarado, "Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Article vol. 8, no. 1, pp. 1-8, 1993, doi: 10.1109/59.221241.
- [16] Y. V. Makarov, D. J. Hill, and E. Zhao-Yang Dong, "Computation of bifurcation boundaries for power systems: A new a-plane method," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, Article vol. 47, no. 4, pp. 536-544, 2000, doi: 10.1109/81.841855.
- [17] V. Ajarapu, *Computational techniques for voltage stability assessment and control*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [18] Y. Yu, P. Li, H. Jia, S. T. Lee, and P. Zhang, "Computation of boundary of power

flow feasible region with hybrid method," in 2004 *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, 2004, vol. 1, pp. 137-143. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-15944376598&partnerID=40&md5=f6dc53faed8bd30fb335cf2fa9929db2>.

[Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-15944376598&partnerID=40&md5=f6dc53faed8bd30fb335cf2fa9929db2>

- [19] S. Auchariyamet, "Optimal Planning and Operation of Reactive Power Management in Distribution Systems by Particle Swarm Optimization," Ph.D., Electrical Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2010.
- [20] S. Limpatthamapanee, "LOAD FEASIBLE REGION DETERMINATION USING BOUNDARY TRACING METHOD," Ph.D., Electrical Engineering, Chulalongkorn University, 2011.
- [21] S. Limpatthamapanee, "Visualization of Load Security Region Bounded by Operational Constraints of Power Systems," *Engineering Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 59-73, 2011.
- [22] C. Grigg *et al.*, "Reliability test system task force: 'The IEEE reliability test system 1996'," *IEEE Trans Power Syst*, vol. 14, no. 3, pp. 1010-1020, 1999.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลระบบ IEEE 24 บัส

Bus	Bus Type	P_d	Q_d	G_s	B_s	Area	kV	V^{max}	V^{min}
1	2	108	22	0	0	1	138	1.05	0.95
2	2	97	20	0	0	1	138	1.05	0.95
3	1	180	37	0	0	1	138	1.05	0.95
4	1	74	15	0	0	1	138	1.05	0.95
5	1	71	14	0	0	1	138	1.05	0.95
6	1	136	28	0	-100	2	138	1.05	0.95
7	2	125	25	0	0	2	138	1.05	0.95
8	1	171	35	0	0	2	138	1.05	0.95
9	1	175	36	0	0	1	138	1.05	0.95
10	1	195	40	0	0	2	138	1.05	0.95
11	1	0	0	0	0	3	230	1.05	0.95
12	1	0	0	0	0	3	230	1.05	0.95
13	3	265	54	0	0	3	230	1.05	0.95
14	2	194	39	0	0	3	230	1.05	0.95
15	2	317	64	0	0	4	230	1.05	0.95
16	2	100	20	0	0	4	230	1.05	0.95
17	1	0	0	0	0	4	230	1.05	0.95
18	2	333	68	0	0	4	230	1.05	0.95
19	1	181	37	0	0	3	230	1.05	0.95
20	1	128	26	0	0	3	230	1.05	0.95
21	2	0	0	0	0	4	230	1.05	0.95
22	2	0	0	0	0	4	230	1.05	0.95
23	2	0	0	0	0	3	230	1.05	0.95
24	1	0	0	0	0	4	230	1.05	0.95

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE 24 บัส

Gen	Bus	P_g	Q_g^{\max}	Q_g^{\min}	Vg	Base	P_g^{\max}	P_g^{\min}
1	1	172	80	-50	1.035	100	192	0
2	2	172	80	-50	1.035	100	192	0
3	7	240	180	0	1.025	100	300	0
4	13	187.25	240	0	1.02	100	591	0
5	14	0	200	-50	0.98	100	0	0
6	15	215	110	-50	1.014	100	215	0
7	16	155	80	-50	1.017	100	155	0
8	18	400	200	-50	1.05	100	400	0
9	21	400	200	-50	1.05	100	400	0
10	22	300	96	-60	1.05	100	300	0
11	23	660	310	-125	1.05	100	660	0

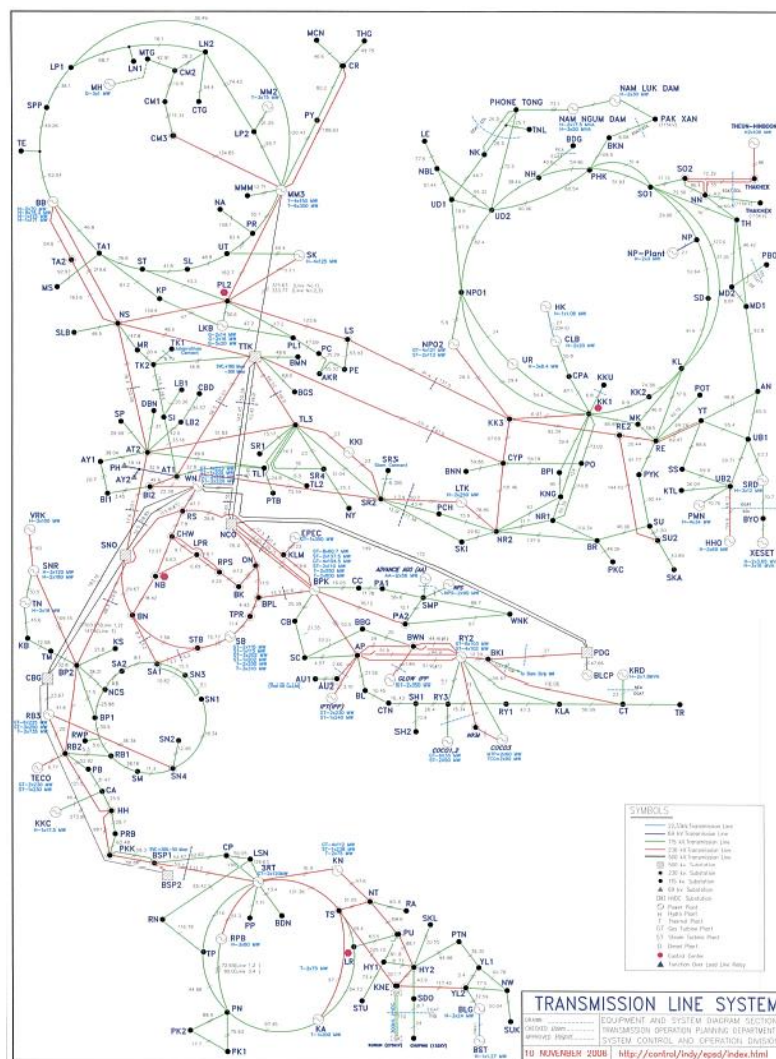
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลระบบทดสอบสายส่ง IEEE 24 บัส

Line	From Bus	To Bus	r	x	b	Rating	Ratio
1	1	2	0.0026	0.0139	0.4611	250	0
2	1	3	0.0546	0.2112	0.0572	208	0
3	1	5	0.0218	0.0845	0.0229	208	0
4	2	4	0.0328	0.1267	0.0343	208	0
5	2	6	0.0497	0.192	0.052	208	0
6	3	9	0.0308	0.119	0.0322	208	0
7	3	24	0.0023	0.0839	0	510	1.03
8	4	9	0.0268	0.1037	0.0281	208	0
9	5	10	0.0228	0.0883	0.0239	208	0

10	6	10	0.0139	0.0605	2.459	193	0
11	7	8	0.0159	0.0614	0.0166	208	0
12	8	9	0.0427	0.1651	0.0447	208	0
13	8	10	0.0427	0.1651	0.0447	208	0
14	9	11	0.0023	0.0839	0	510	1.03
15	9	12	0.0023	0.0839	0	510	1.03
16	10	11	0.0023	0.0839	0	510	1.02
17	10	12	0.0023	0.0839	0	510	1.02
18	11	13	0.0061	0.0476	0.0999	600	0
19	11	14	0.0054	0.0418	0.0879	625	0
20	12	13	0.0061	0.0476	0.0999	625	0
21	12	23	0.0124	0.0966	0.203	625	0
22	13	23	0.0111	0.0865	0.1818	625	0
23	14	16	0.005	0.0389	0.0818	625	0
24	15	16	0.0022	0.0173	0.0364	600	0
25	15	21	0.0063	0.049	0.103	600	0
26	15	21	0.0063	0.049	0.103	600	0
27	15	24	0.0067	0.0519	0.1091	600	0
28	16	17	0.0033	0.0259	0.0545	600	0
29	16	19	0.003	0.0231	0.0485	600	0
30	17	18	0.0018	0.0144	0.0303	600	0
31	17	22	0.0135	0.1053	0.2212	600	0
32	18	21	0.0033	0.0259	0.0545	600	0
33	18	21	0.0033	0.0259	0.0545	600	0
34	19	20	0.0051	0.0396	0.0833	600	0
35	19	20	0.0051	0.0396	0.0833	600	0
36	20	23	0.0028	0.0216	0.0455	600	0
37	20	23	0.0028	0.0216	0.0455	600	0
38	21	22	0.0087	0.0678	0.1424	600	0

ข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย

ระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 4 ส่วนนั้นคือ ภาคกลาง (พื้นที่ 1) ภาคอีสาน (พื้นที่ 2) ภาคใต้ (พื้นที่ 3) ภาคเหนือ (พื้นที่ 4) ข้อมูลของระบบแสดงดังตารางที่ 4.4-4.6



รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย

Bus	Type	P_d	Q_d	G_s	B_s	Area	kV	V^{max}	V^{min}
1	1	293.85	-22.00	0	0	1	69	1.05	0.98
2	2	250.70	-11.81	0	0	1	69	1.063	0.993
3	1	191.25	-3.15	0	0	1	69	1.05	0.98
4	1	265.85	14.28	0	0	1	69	1.05	0.98
5	1	232.40	2.59	0	0	1	69	1.05	0.98
6	1	400.86	17.48	0	0	1	69	1.05	0.98
7	1	232.40	128.58	0	0	1	69	1.05	0.98
8	1	273.70	27.19	0	0	1	69	1.05	0.98
9	1	195.70	6.12	0	0	1	69	1.05	0.98
10	1	202.10	29.40	0	0	1	69	1.05	0.98
11	1	293.85	-7.68	0	0	1	69	1.05	0.98
12	1	191.25	3.66	0	0	1	69	1.05	0.98
13	1	265.85	16.60	0	0	1	69	1.05	0.98
14	1	232.40	10.67	0	0	1	69	1.05	0.98
15	1	273.70	15.22	0	0	1	69	1.05	0.98
16	1	195.70	-35.09	0	0	1	69	1.05	0.98
17	1	358.20	-17.47	0	0	1	115	1.05	0.98
18	1	132.70	5.32	0	0	1	115	1.05	0.98
19	1	318.10	38.65	0	0	1	115	1.05	0.98
20	1	189.67	-6.71	0	0	1	115	1.05	0.98
21	1	189.20	13.11	0	0	1	115	1.05	0.98
22	1	122.00	-0.60	0	0	1	115	1.05	0.98
23	1	319.15	69.00	0	0	1	115	1.05	0.98
24	1	164.10	-8.21	0	0	1	115	1.05	0.98
25	1	271.00	24.03	0	0	1	115	1.05	0.98

26	1	219.23	53.20	0	0	1	115	1.05	0.98
27	2	160.82	-18.60	0	0	1	115	1.064	0.994
28	1	346.10	57.51	0	0	1	230	1.05	0.98
29	1	61.10	-33.19	0	0	1	230	1.05	0.98
30	1	0.00	-133.98	0	0	1	230	1.05	0.98
31	1	0.00	0.00	0	0	1	230	1.05	0.98
32	1	296.80	-21.19	0	0	1	230	1.05	0.98
33	1	0.00	-123.60	0	0	1	230	1.05	0.98
34	1	0.00	-66.99	0	0	1	230	1.05	0.98
35	1	0.00	0.00	0	0	1	230	1.05	0.98
36	1	0.00	0.00	0	0	1	230	1.05	0.98
37	1	0.00	0.00	0	0	1	230	1.05	0.98
38	1	0.00	0.00	0	0	1	230	1.05	0.98
39	2	0.00	-133.98	0	0	1	230	1.05	0.98
40	1	396.30	157.47	0	0	1	230	1.05	0.98
41	1	0.00	0.00	0	0	1	230	1.05	0.98
42	1	0.00	-61.80	0	0	1	230	1.05	0.98
43	1	0.00	0.00	0	0	1	500	1.05	0.98
44	1	0.00	0.00	0	0	1	500	1.05	0.98
45	2	0.00	0.00	0	0	2	69	1.05	0.98
46	1	26.21	-8.20	0	0	2	115	1.05	0.98
47	1	22.64	3.10	0	0	2	115	1.05	0.98
48	1	4.50	2.49	0	0	2	115	1.05	0.98
49	1	29.95	4.01	0	0	2	115	1.05	0.98
50	1	15.80	-0.64	0	0	2	115	1.05	0.98
51	1	61.91	-41.52	0	0	2	115	1.05	0.98
52	1	61.99	19.16	0	0	2	115	1.05	0.98
53	2	0.00	0.00	0	0	2	115	1.05	0.98
54	1	34.47	15.95	0	0	2	115	1.05	0.98

55	1	48.41	11.18	0	0	2	115	1.05	0.98
56	1	14.86	8.22	0	0	2	115	1.05	0.98
57	1	89.77	30.59	0	0	2	115	1.05	0.98
58	1	41.42	22.92	0	0	2	115	1.05	0.98
59	1	65.18	-6.18	0	0	2	115	1.05	0.98
60	1	47.30	-10.85	0	0	2	115	1.05	0.98
61	1	60.77	-7.71	0	0	2	115	1.05	0.98
62	1	50.84	-6.70	0	0	2	115	1.05	0.98
63	1	20.06	11.10	0	0	2	115	1.05	0.98
64	1	74.35	-47.07	0	0	2	115	1.05	0.98
65	1	155.72	33.03	0	0	2	115	1.05	0.98
66	1	75.59	12.64	0	0	2	115	1.05	0.98
67	1	0.00	0.00	0	0	2	115	1.05	0.98
68	1	4.66	2.58	0	0	2	115	1.05	0.98
69	1	33.78	-13.38	0	0	2	115	1.05	0.98
70	1	31.43	-4.60	0	0	2	115	1.05	0.98
71	1	58.91	20.73	0	0	2	115	1.05	0.98
72	1	48.69	-2.24	0	0	2	115	1.05	0.98
73	2	0.00	0.00	0	0	2	115	1.05	0.98
74	1	76.59	1.24	0	0	2	115	1.05	0.98
75	1	75.65	-10.18	0	0	2	115	1.05	0.98
76	1	21.63	2.60	0	0	2	115	1.05	0.98
77	1	23.97	0.70	0	0	2	115	1.05	0.98
78	1	32.25	8.48	0	0	2	115	1.05	0.98
79	1	53.26	1.54	0	0	2	115	1.05	0.98
80	1	19.82	10.97	0	0	2	115	1.05	0.98
81	1	0.00	0.00	0	0	2	115	1.05	0.98
82	1	18.09	10.01	0	0	2	115	1.05	0.98
83	1	93.39	-15.27	0	0	2	115	1.05	0.98

84	1	54.49	0.97	0	0	2	115	1.05	0.98
85	2	27.88	15.43	0	0	2	115	1.06	0.99
86	1	36.28	7.55	0	0	2	115	1.05	0.98
87	1	42.22	-26.66	0	0	2	115	1.05	0.98
88	1	19.11	1.21	0	0	2	115	1.05	0.98
89	2	0.00	0.00	0	0	2	115	1.05	0.98
90	1	58.48	32.36	0	0	2	115	1.05	0.98
91	1	73.52	17.98	0	0	2	115	1.05	0.98
92	1	53.04	-13.99	0	0	2	115	1.05	0.98
93	1	50.20	-15.36	0	0	2	115	1.05	0.98
94	1	43.25	-36.77	0	0	2	115	1.05	0.98
95	1	0.00	0.00	0	0	2	230	1.05	0.98
96	1	0.00	0.00	0	0	2	230	1.05	0.98
97	1	0.00	0.00	0	0	2	230	1.05	0.98
98	2	0.00	0.00	0	0	2	230	1.05	0.98
99	1	0.00	0.00	0	0	2	230	1.05	0.98
100	1	0.00	0.00	0	0	2	230	1.05	0.98
101	2	0.00	0.00	0	0	2	230	1.05	0.98
102	1	0.00	0.00	0	0	2	230	1.05	0.98
103	1	0.00	0.00	0	0	2	230	1.05	0.98
104	1	0.00	0.00	0	0	2	230	1.05	0.98
105	2	0.00	0.00	0	0	2	115	1.05	0.98
106	1	0.00	0.00	0	0	2	115	1.05	0.98
107	1	0.00	0.00	0	0	2	115	1.05	0.98
108	2	0.00	0.00	0	0	2	115	1.06	0.98
109	2	0.00	20.60	0	0	2	230	1.05	0.98
110	1	0.00	0.00	0	0	2	230	1.05	0.98
111	2	0.00	20.60	0	0	2	230	1.05	0.98
112	1	44.42	24.58	0	0	3	115	1.05	0.98

113	2	10.10	5.59	0	0	3	115	1.05	0.98
114	1	41.36	-1.90	0	0	3	115	1.05	0.98
115	1	59.65	7.00	0	0	3	115	1.05	0.98
116	1	150.24	16.13	0	0	3	115	1.05	0.98
117	2	65.70	36.35	0	0	3	115	1.05	0.98
118	1	50.86	28.14	0	0	3	115	1.05	0.98
119	1	84.46	6.67	0	0	3	115	1.05	0.98
120	1	19.38	1.30	0	0	3	115	1.05	0.98
121	1	89.87	21.15	0	0	3	115	1.05	0.98
122	1	29.65	1.57	0	0	3	115	1.05	0.98
123	1	67.13	-0.55	0	0	3	115	1.05	0.98
124	1	27.62	-7.05	0	0	3	115	1.05	0.98
125	1	39.54	21.88	0	0	3	115	1.05	0.98
126	1	35.21	-25.92	0	0	3	115	1.05	0.98
127	1	96.11	30.48	0	0	3	115	1.05	0.98
128	1	35.90	19.86	0	0	3	115	1.05	0.98
129	1	6.22	3.44	0	0	3	115	1.05	0.98
130	1	38.27	-23.95	0	0	3	115	1.05	0.98
131	1	29.23	9.93	0	0	3	115	1.05	0.98
132	1	28.91	0.46	0	0	3	115	1.05	0.98
133	1	39.19	-13.19	0	0	3	115	1.05	0.98
134	1	71.10	-3.46	0	0	3	115	1.05	0.98
135	1	20.54	0.24	0	0	3	115	1.05	0.98
136	1	17.62	9.75	0	0	3	115	1.05	0.98
137	1	22.07	-6.64	0	0	3	115	1.05	0.98
138	1	141.21	55.80	0	0	3	115	1.05	0.98
139	1	48.49	26.83	0	0	3	115	1.05	0.98
140	1	0.00	0.00	0	0	3	115	1.05	0.98
141	1	0.00	0.00	0	0	3	230	1.05	0.98

142	2	0.00	0.00	0	0	3	230	1.05	0.98
143	1	0.00	0.00	0	0	3	230	1.05	0.98
144	2	0.00	0.00	0	0	3	230	1.05	0.98
145	1	0.00	0.00	0	0	3	230	1.05	0.98
146	1	0.00	0.00	0	0	3	230	1.05	0.98
147	2	0.00	0.00	0	0	3	230	1.05	0.98
148	2	0.00	0.00	0	0	3	230	1.05	0.98
149	1	0.00	0.00	0	0	3	230	1.05	0.98
150	1	0.00	0.00	0	0	3	230	1.05	0.98
151	1	44.24	11.91	0	0	4	115	1.05	0.98
152	1	3.87	2.14	0	0	4	115	1.05	0.98
153	1	21.75	5.75	0	0	4	115	1.05	0.98
154	1	51.03	-6.95	0	0	4	115	1.05	0.98
155	1	70.34	-16.19	0	0	4	115	1.05	0.98
156	1	156.24	30.92	0	0	4	115	1.05	0.98
157	1	73.44	19.87	0	0	4	115	1.05	0.98
158	1	37.37	-7.43	0	0	4	115	1.05	0.98
159	1	38.27	-12.91	0	0	4	115	1.05	0.98
160	1	43.78	24.22	0	0	4	115	1.05	0.98
161	1	65.31	26.77	0	0	4	115	1.05	0.98
162	1	19.45	10.76	0	0	4	115	1.05	0.98
163	1	46.70	-26.83	0	0	4	115	1.05	0.98
164	2	16.25	8.99	0	0	4	115	1.05	0.98
165	1	31.20	17.26	0	0	4	115	1.05	0.98
166	1	41.06	13.31	0	0	4	115	1.05	0.98
167	1	12.16	6.73	0	0	4	115	1.05	0.98
168	1	0.00	0.00	0	0	4	115	1.05	0.98
169	1	44.80	24.78	0	0	4	115	1.05	0.98
170	1	21.96	-0.34	0	0	4	115	1.05	0.98

171	1	61.83	5.27	0	0	4	115	1.05	0.98
172	1	77.55	42.91	0	0	4	115	1.05	0.98
173	1	36.96	-13.88	0	0	4	115	1.05	0.98
174	1	33.50	-2.66	0	0	4	115	1.05	0.98
175	1	28.95	-6.08	0	0	4	115	1.05	0.98
176	1	27.25	-7.62	0	0	4	115	1.05	0.98
177	1	50.20	27.78	0	0	4	115	1.05	0.98
178	1	62.06	34.34	0	0	4	115	1.05	0.98
179	1	46.66	19.53	0	0	4	115	1.05	0.98
180	1	22.42	12.40	0	0	4	115	1.05	0.98
181	1	26.98	2.36	0	0	4	115	1.05	0.98
182	1	13.28	7.35	0	0	4	115	1.05	0.98
183	1	5.93	3.28	0	0	4	115	1.05	0.98
184	1	30.52	10.60	0	0	4	115	1.05	0.98
185	1	19.47	10.77	0	0	4	115	1.05	0.98
186	1	33.92	12.68	0	0	4	115	1.05	0.98
187	1	12.95	7.16	0	0	4	115	1.05	0.98
188	1	9.61	5.31	0	0	4	115	1.05	0.98
189	1	27.93	9.19	0	0	4	115	1.05	0.98
190	1	33.47	12.23	0	0	4	115	1.05	0.98
191	2	0.00	0.00	0	0	4	230	1.05	0.98
192	1	0.00	0.00	0	0	4	230	1.05	0.98
193	1	0.00	0.00	0	0	4	230	1.05	0.98
194	1	0.00	0.00	0	0	4	230	1.05	0.98
195	2	0.00	0.00	0	0	4	230	1.05	0.98
196	1	0.00	0.00	0	0	4	230	1.05	0.98
197	1	0.00	0.00	0	0	4	230	1.05	0.98
198	2	0.00	0.00	0	0	4	230	1.05	0.98
199	1	45.05	24.93	0	0	4	230	1.05	0.98

200	2	0.00	0.00	0	0	4	230	1.05	0.98
201	2	0.00	0.00	0	0	4	500	1.05	0.98
202	1	0.00	0.00	0	0	4	500	1.06	0.98
203	1	29.32	16.22	0	0	5	69	1.05	0.98
204	1	0.00	0.00	0	0	5	69	1.05	0.98
205	1	0.80	0.44	0	0	5	69	1.05	0.98
206	1	26.37	14.59	0	0	5	115	1.05	0.98
207	1	110.53	15.36	0	0	5	115	1.05	0.98
208	1	45.50	9.57	0	0	5	115	1.05	0.98
209	1	35.86	7.36	0	0	5	115	1.05	0.98
210	1	58.93	25.32	0	0	5	115	1.05	0.98
211	2	343.96	42.75	0	0	5	115	1.066	0.996
212	1	32.50	-6.98	0	0	5	115	1.05	0.98
213	1	27.07	11.86	0	0	5	115	1.05	0.98
214	1	30.50	-13.41	0	0	5	115	1.05	0.98
215	1	43.84	1.55	0	0	5	115	1.05	0.98
216	1	33.87	6.26	0	0	5	115	1.05	0.98
217	1	35.00	-9.58	0	0	5	115	1.05	0.98
218	1	18.71	-6.30	0	0	5	115	1.05	0.98
219	1	412.14	45.26	0	0	5	115	1.05	0.98
220	1	86.55	2.49	0	0	5	115	1.05	0.98
221	1	45.13	-7.09	0	0	5	115	1.05	0.98
222	1	18.44	-5.40	0	0	5	115	1.05	0.98
223	1	74.41	41.17	0	0	5	115	1.05	0.98
224	1	60.00	4.02	0	0	5	115	1.05	0.98
225	2	208.10	47.04	0	0	5	115	1.05	0.98
226	1	0.00	0.00	0	0	5	230	1.05	0.98
227	1	0.00	-66.99	0	0	5	230	1.05	0.98
228	1	0.00	0.00	0	0	5	230	1.05	0.98

229	1	0.00	0.00	0	0	5	230	1.05	0.98
230	1	0.00	0.00	0	0	5	230	1.05	0.98
231	2	0.00	0.00	0	0	5	230	1.05	0.98
232	2	0.00	0.00	0	0	5	230	1.05	0.98
233	1	0.00	0.00	0	0	5	500	1.06	0.98
234	2	245.91	45.26	0	0	6	115	1.068	0.998
235	1	73.66	-4.17	0	0	6	115	1.05	0.98
236	1	81.50	45.10	0	0	6	115	1.05	0.98
237	1	103.93	24.32	0	0	6	115	1.05	0.98
238	1	0.00	0.00	0	0	6	115	1.05	0.98
239	2	266.03	101.79	0	0	6	115	1.071	1.001
240	1	34.29	-3.73	0	0	6	115	1.05	0.98
241	1	95.49	-6.35	0	0	6	115	1.05	0.98
242	1	27.06	14.97	0	0	6	115	1.05	0.98
243	1	45.06	17.52	0	0	6	115	1.05	0.98
244	2	398.41	153.44	0	0	6	115	1.05	0.98
245	2	0.00	0.00	0	0	6	115	1.05	0.98
246	1	41.05	-11.34	0	0	6	115	1.05	0.98
247	1	41.14	1.22	0	0	6	115	1.05	0.98
248	2	131.30	38.59	0	0	6	115	1.067	0.997
249	2	121.78	25.68	0	0	6	115	1.0555	0.986
250	1	0.00	0.00	0	0	6	115	1.05	0.98
251	2	67.06	3.05	0	0	6	115	1.063	0.993
252	1	9.60	5.31	0	0	6	115	1.05	0.98
253	1	28.48	8.34	0	0	6	115	1.05	0.98
254	2	0.00	0.00	0	0	6	115	1.05	0.98
255	1	48.62	-1.48	0	0	6	115	1.05	0.98
256	1	38.92	-9.92	0	0	6	115	1.05	0.98
257	1	18.90	-5.15	0	0	6	115	1.05	0.98

258	2	0.00	0.00	0	0	6	115	1.05	0.98
259	2	267.28	40.68	0	0	6	115	1.07	1
260	1	0.00	-66.99	0	0	6	230	1.05	0.98
261	2	120.00	66.39	0	0	6	230	1.05	0.98
262	2	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
263	2	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
264	1	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
265	1	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
266	2	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
267	1	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
268	2	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
269	1	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
270	1	0.00	0.00	0	0	6	500	1.05	0.98
271	2	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
272	2	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
273	2	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
274	2	0.00	0.00	0	0	6	115	1.05	0.98
275	1	0.00	0.00	0	0	6	230	1.05	0.98
276	1	58.40	27.78	0	0	7	115	1.05	0.98
277	1	171.40	49.04	0	0	7	115	1.05	0.98
278	1	92.60	51.23	0	0	7	115	1.05	0.98
279	1	36.63	20.27	0	0	7	115	1.05	0.98
280	1	29.68	-5.91	0	0	7	115	1.05	0.98
281	2	8.02	4.44	0	0	7	115	1.05	0.98
282	1	23.34	6.67	0	0	7	115	1.05	0.98
283	1	70.17	-25.30	0	0	7	115	1.05	0.98
284	1	7.74	4.28	0	0	7	115	1.05	0.98
285	1	116.76	-11.45	0	0	7	115	1.05	0.98
286	1	42.90	11.25	0	0	7	115	1.05	0.98

287	1	30.04	16.62	0	0	7	115	1.05	0.98
288	1	26.31	10.31	0	0	7	115	1.05	0.98
289	1	30.30	7.44	0	0	7	115	1.05	0.98
290	1	164.67	35.28	0	0	7	115	1.05	0.98
291	1	430.53	-15.09	0	0	7	115	1.05	0.98
292	1	64.75	-9.58	0	0	7	115	1.05	0.98
293	1	62.04	0.87	0	0	7	115	1.05	0.98
294	1	79.66	-42.38	0	0	7	115	1.05	0.98
295	1	54.39	-14.94	0	0	7	115	1.05	0.98
296	1	137.46	53.16	0	0	7	115	1.05	0.98
297	1	44.15	5.70	0	0	7	115	1.05	0.98
298	1	0.78	0.43	0	0	7	115	1.05	0.98
299	1	33.02	18.27	0	0	7	115	1.05	0.98
300	2	2.34	1.29	0	0	7	115	1.05	0.98
301	1	0.00	0.00	0	0	7	230	1.05	0.98
302	2	0.00	0.00	0	0	7	230	1.05	0.98
303	1	0.00	0.00	0	0	7	230	1.05	0.98
304	2	0.00	0.00	0	0	7	230	1.05	0.98
305	1	0.00	0.00	0	0	7	230	1.05	0.98
306	1	0.00	0.00	0	0	7	230	1.05	0.98
307	2	0.00	0.00	0	0	7	230	1.05	0.98
308	1	0.00	0.00	0	0	7	230	1.05	0.98
309	1	0.00	0.00	0	0	7	230	1.05	0.98
310	2	0.00	0.00	0	0	7	230	1.05	0.98
311	1	0.00	0.00	0	0	7	500	1.05	0.98
312	3	0.00	0.00	0	0	7	500	1.05	0.98
313	2	0.00	0.00	0	0	7	230	1.05	0.98

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังประเทศไทย

Gen	Bus	P_g	Q_g^{\max}	Q_g^{\min}	Vg	Base	P_g^{\max}	P_g^{\min}
1	39	1756	1310	-660	1.02	2910.5	2271	0
2	2	90	55	-27	1.028	188.6	180	0
3	53	39.5	19.4	-8	1.049	45	40	0
4	98	249.5	242	-120	1.02	556	500	0
5	45	5.5	3.6	0	1.025	7	6	0
6	101	509	372	-240	1.04	902	710	0
7	73	59	64	-44	1.045	144	136	0
8	85	29.5	18.6	-9	1.025	42	36	0
9	89	15.5	12.9	-9	1.045	31.5	30	0
10	109	125	60	-30	1.048	144	138	0
11	105	79	93	-44	1.049	185	160	0
12	111	209	130	-64	1.048	252	220	0
13	108	24	32.09	-14	1.05	55.3	45	0
14	113	59	44.7	-21	1.043	84.72	72	0
15	144	225	180	-90	1.04	446	300	0
16	117	71.5	46.5	-23	1.02	88.33	75	0
17	142	718.5	464.1	-229	1.037	973.33	761	0
18	147	159	141	-222	1.04	267	240	0
19	148	346	186	-120	1.04	451.5	360	0
20	191	419	257.4	-125	1.045	750.53	730	0
21	164	128.5	96.1	-47	1.045	201.04	160	0
22	195	440	372	-200	1.04	668	600	0
23	201	1140	1116	-600	1.042	2000	1800	0
24	198	314	166.4	-80	1.03	528	500	0
25	200	0	160	-300	1.04	460	0	0
26	231	984	806	-402	1.03	1534.4	1302	0

27	232	552	451	-225	1.03	857.65	728	0
28	27	10	6.2	-3	1.034	47.1	47	0
29	225	90	55	-27	1.01	130.59	119	0
30	211	180	110	-54	1.04	328.85	309	0
31	263	1052	1114	-612	1.04	2216.4	1915	0
32	262	850	1128.4	-558	1.04	2324	1177	0
33	245	11.5	7.6	-6	1.025	15.6	13.6	0
34	268	1164	744	-480	1.035	1496.2	1297.1	0
35	273	700	516	-255	1.04	982	836	0
36	272	350	260	-130	1.045	500	428	0
37	271	712	520	-260	1.038	1000	855	0
38	254	221.87	135	-66.5	1.036	491.28	472	0
39	248	25	22	-11	1.032	55.76	51.2	0
40	251	180	110	-54	1.028	402.6	387	0
41	259	302	186.4	-91	1.032	651.78	621	0
42	266	300	184	-90	1.036	626.7	598	0
43	274	41	25	-12	1.04	137.88	136	0
44	258	70	43	-21	1.046	247	243	0
45	261	60	37	-18	1.029	352.9	351	0
46	244	180	110	-54	1.018	352.94	335	0
47	234	150	92	-45	1.033	263.04	246	0
48	239	90	55	-27	1.036	159.29	150	0
49	249	45	27	-13	1.0205	168.24	166	0
50	302	0	300	-50	1.03	350	0	0
51	304	199	114	-57	1.047	333.3	300	0
52	281	12.8	9	-4	1.01	21.2	17.5	0
53	307	1123.6	896	-448	1.03	1705.9	1451	0
54	312	881.25	1358	-678	1.033	2833	2484	0
55	310	349	342	-171	1.04	850	720	0

56	300	37.5	12.6	-6	1.035	41	38	0
57	313	700	495	-242	1.025	944	800	0

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลระบบทดสอบสายส่งไฟฟ้ากำลังประเทศไทย

Line	From Bus	To Bus	r	x	b	Rating	Ratio
1	28	1	0	0.055	0	300	1.000
2	28	1	0	0.055	0	300	1.000
3	29	2	0	0.065	0	200	1.000
4	29	2	0	0.065	0	200	1.000
5	29	2	0	0.065	0	200	1.000
6	29	2	0	0.065	0	200	1.000
7	30	3	0	0.064	0	200	1.000
8	30	3	0	0.065	0	200	1.000
9	32	4	0	0.04635	0	200	0.988
10	32	4	0	0.04685	0	200	0.988
11	34	5	0	0.0625	0	200	0.988
12	34	5	0	0.06583	0	200	0.988
13	36	6	0	0.0655	0	200	1.000
14	36	6	0	0.065	0	200	1.000
15	36	6	0	0.065	0	200	1.000
16	36	6	0	0.065	0	200	1.000
17	37	7	0	0.055	0	300	1.000
18	37	7	0	0.055	0	300	1.000
19	39	8	0	0.055	0	300	0.988
20	39	8	0	0.055	0	300	0.988
21	40	9	0	0.065	0	200	1.000

22	40	9	0	0.065	0	200	1.000
23	41	10	0	0.055	0	300	0.988
24	41	10	0	0.055	0	300	0.988
25	28	11	0	0.06465	0	200	1.000
26	28	11	0	0.06465	0	200	1.000
27	30	12	0	0.06625	0	200	1.000
28	30	12	0	0.065	0	200	1.000
29	32	13	0	0.06635	0	200	0.988
30	32	13	0	0.06758	0	200	0.988
31	34	14	0	0.0705	0	200	0.988
32	34	14	0	0.069	0	200	0.988
33	39	15	0	0.055	0	300	0.988
34	39	15	0	0.055	0	300	0.988
35	40	16	0	0.065	0	200	1.000
36	40	16	0	0.06525	0	200	1.000
37	29	17	0	0.06225	0	200	1.000
38	29	17	0	0.065	0	200	1.000
39	29	17	0	0.065	0	200	1.000
40	30	18	0	0.06	0	200	1.000
41	30	18	0	0.06	0	200	1.000
42	31	19	0	0.055	0	300	0.988
43	31	19	0	0.055	0	300	0.988
44	31	19	0	0.055	0	300	0.988
45	33	20	0	0.061	0	200	1.000
46	33	20	0	0.061	0	200	1.000
47	35	21	0	0.055	0	300	1.000
48	35	21	0	0.055	0	300	1.000
49	36	22	0	0.065	0	200	1.000
50	36	22	0	0.065	0	200	1.000

51	38	23	0	0.055	0	300	1.000
52	38	23	0	0.055	0	300	1.000
53	39	24	0	0.055	0	300	0.988
54	39	24	0	0.055	0	300	0.988
55	41	25	0	0.055	0	300	0.988
56	41	25	0	0.055	0	300	0.988
57	42	26	0	0.06045	0	200	1.000
58	42	26	0	0.06045	0	200	1.000
59	36	27	0	0.055	0	300	1.000
60	36	27	0	0.055	0	300	1.000
61	28	35	0.00045	0.00478	0.01949	858	0.000
62	28	35	0.00045	0.00478	0.01949	858	0.000
63	28	35	0.00045	0.00478	0.01949	858	0.000
64	28	35	0.00045	0.00478	0.01949	858	0.000
65	28	37	0.00022	0.00232	0.00981	858	0.000
66	28	37	0.00022	0.00232	0.00981	858	0.000
67	29	35	0.00115	0.00826	0.01824	429	0.000
68	29	35	0.00115	0.00826	0.01824	429	0.000
69	29	41	0.00022	0.00227	0.0096	858	0.000
70	29	41	0.00022	0.00227	0.0096	858	0.000
71	29	262	0.0022	0.02316	0.09447	858	0.000
72	29	262	0.0022	0.02316	0.09447	858	0.000
73	30	34	0.00092	0.01073	0.0354	858	0.000
74	30	34	0.00092	0.01073	0.0354	858	0.000
75	30	38	0.00074	0.01381	0.07009	1716	0.000
76	30	38	0.00074	0.01381	0.07009	1716	0.000
77	30	40	0.00038	0.0039	0.01712	858	0.000
78	30	40	0.00038	0.0039	0.01712	858	0.000
79	30	308	0.00058	0.00599	0.02528	858	0.000

80	31	32	0.00024	0.00402	0.02611	1716	0.000
81	31	32	0.00024	0.00402	0.02611	1716	0.000
82	31	32	0.00024	0.00402	0.02611	1716	0.000
83	31	34	0.00028	0.00472	0.03069	1716	0.000
84	31	38	0.00081	0.01526	0.07746	1716	0.000
85	31	38	0.00081	0.01526	0.07746	1716	0.000
86	32	34	0.00017	0.0029	0.01884	1716	0.000
87	33	35	0.00046	0.00861	0.04372	1716	0.000
88	43	33	0	0.02348	0	600	0.975
89	33	263	0.0021	0.02203	0.0905	858	0.000
90	35	42	0.00046	0.00861	0.04372	1716	0.000
91	35	263	0.00289	0.02995	0.12637	858	0.000
92	35	263	0.00289	0.02995	0.12637	858	0.000
93	36	231	0.00249	0.02625	0.10711	858	0.000
94	36	231	0.00249	0.02625	0.10711	858	0.000
95	36	232	0.00249	0.02625	0.10711	858	0.000
96	36	232	0.00249	0.02625	0.10711	858	0.000
97	36	265	0.0037	0.03899	0.15921	858	0.000
98	36	265	0.0037	0.03899	0.15921	858	0.000
99	44	38	0	0.024	0	750	1.000
100	44	38	0	0.024	0	750	1.000
101	44	38	0	0.024	0	750	1.000
102	38	227	0.00706	0.05079	0.11233	429	0.000
103	38	227	0.00706	0.05079	0.11233	429	0.000
104	38	301	0.00134	0.02218	0.14432	1716	0.000
105	38	301	0.00134	0.02218	0.14432	1716	0.000
106	39	40	0.00079	0.00762	0.03693	858	0.000
107	39	40	0.00079	0.008	0.03514	858	0.000
108	39	40	0.00079	0.008	0.03514	858	0.000

109	40	308	0.00089	0.00919	0.03879	858	0.000
110	43	42	0	0.02355	0	600	0.975
111	42	263	0.0021	0.02203	0.0905	858	0.000
112	43	202	0.0018	0.02341	2.2139	2832	0.000
113	43	233	0.00044	0.00521	0.57658	2832	0.000
114	43	233	0.00044	0.00521	0.57658	2832	0.000
115	43	233	0.00048	0.00571	0.63205	2832	0.000
116	43	270	0.00076	0.01337	1.5146	3736	0.000
117	44	233	0.00051	0.00617	0.67934	2832	0.000
118	44	233	0.00051	0.00617	0.67934	2832	0.000
119	44	311	0.00055	0.01038	1.1801	3736	0.000
120	44	311	0.00055	0.01038	1.1801	3736	0.000
121	68	45	0	0.26583	0	40	1.000
122	46	62	0.2399	0.30186	0.03228	67	0.000
123	46	90	0.04208	0.18498	0.02773	163	0.000
124	46	94	0.04948	0.13894	0.01947	120	0.000
125	46	94	0.04948	0.13894	0.01947	120	0.000
126	47	52	0.03644	0.16016	0.024	163	0.000
127	48	70	0.04118	0.12123	0.01542	120	0.000
128	49	57	0.03986	0.11191	0.01568	120	0.000
129	49	59	0.09749	0.27416	0.03849	120	0.000
130	50	74	0.11062	0.32597	0.04169	120	0.000
131	51	64	0.15785	0.33573	0.04104	96	0.000
132	51	65	0.13994	0.39437	0.05551	120	0.000
133	51	65	0.13994	0.39437	0.05551	120	0.000
134	51	78	0.04675	0.1312	0.0184	120	0.000
135	51	87	0.06623	0.14053	0.01714	96	0.000
136	52	76	0.05494	0.16165	0.02061	120	0.000
137	95	52	0	0.06255	0	200	1.000

138	95	52	0	0.065	0	200	1.000
139	53	54	0.0515	0.15233	0.01921	120	0.000
140	54	57	0.08824	0.26126	0.03299	120	0.000
141	55	58	0.07535	0.21139	0.02974	120	0.000
142	55	58	0.07535	0.21139	0.02974	120	0.000
143	55	61	0.11921	0.1497	0.01599	67	0.000
144	55	79	0.03814	0.10702	0.01501	120	0.000
145	55	79	0.03814	0.10702	0.01501	120	0.000
146	55	80	0.07749	0.34157	0.05131	163	0.000
147	55	86	0.02634	0.11579	0.01733	163	0.000
148	56	91	0.03456	0.15189	0.02276	163	0.000
149	57	58	0.0071	0.01991	0.0028	120	0.000
150	57	58	0.0071	0.01991	0.0028	120	0.000
151	57	59	0.13646	0.38449	0.05411	120	0.000
152	57	61	0.22217	0.27944	0.02988	67	0.000
153	57	66	0.02983	0.08373	0.01173	120	0.000
154	57	66	0.02983	0.08373	0.01173	120	0.000
155	57	76	0.18895	0.23751	0.02538	67	0.000
156	57	89	0.14093	0.17702	0.01891	67	0.000
157	96	57	0	0.06	0	200	0.988
158	96	57	0	0.05858	0	200	0.988
159	96	57	0	0.05858	0	200	0.988
160	59	64	0.04624	0.12984	0.01819	120	0.000
161	59	65	0.05009	0.14065	0.01971	120	0.000
162	60	69	0.07868	0.23161	0.02956	120	0.000
163	61	79	0.0985	0.12308	0.01327	67	0.000
164	62	88	0.02818	0.12376	0.01854	163	0.000
165	63	81	0.18817	0.20989	0.02861	67	0.000
166	63	88	0.03707	0.16292	0.02442	163	0.000

167	99	63	0	0.065	0	200	1.000
168	64	65	0.00629	0.02764	0.00413	163	0.000
169	64	65	0.00629	0.02764	0.00413	163	0.000
170	64	76	0.28604	0.36032	0.03855	67	0.000
171	65	72	0.07414	0.21354	0.02873	118	0.000
172	65	84	0.03028	0.08712	0.01171	118	0.000
173	100	65	0	0.06265	0	200	0.988
174	100	65	0	0.06065	0	200	0.988
175	100	65	0	0.0625	0	200	0.988
176	66	67	0.00186	0.01236	0.00317	326	0.000
177	66	67	0.00186	0.01236	0.00317	326	0.000
178	66	89	0.06223	0.07811	0.00834	67	0.000
179	66	92	0.0991	0.28137	0.03875	120	0.000
180	66	92	0.0991	0.28137	0.03875	120	0.000
181	66	93	0.08321	0.23387	0.03281	120	0.000
182	66	93	0.08321	0.23387	0.03281	120	0.000
183	101	67	0	0.065	0	200	1.000
184	101	67	0	0.06205	0	200	1.000
185	68	80	0.01824	0.08016	0.01199	163	0.000
186	68	86	0.03306	0.14534	0.02176	163	0.000
187	69	92	0.05211	0.1533	0.01955	120	0.000
188	69	93	0.03832	0.16843	0.02525	163	0.000
189	70	74	0.05575	0.16577	0.02069	120	0.000
190	70	93	0.03905	0.11607	0.01448	120	0.000
191	71	92	0.04543	0.1275	0.01788	120	0.000
192	71	92	0.1161	0.14579	0.01557	67	0.000
193	71	107	0.02608	0.07316	0.01026	120	0.000
194	71	107	0.06664	0.08364	0.00893	67	0.000
195	72	219	0.05816	0.16744	0.02251	118	0.000

196	73	91	0.07162	0.20112	0.02823	120	0.000
197	73	91	0.07162	0.20112	0.02823	120	0.000
198	74	80	0.05211	0.15345	0.01953	120	0.000
199	74	80	0.08514	0.18359	0.02169	96	0.000
200	74	93	0.14593	0.31516	0.0373	96	0.000
201	75	79	0.0527	0.2318	0.03478	163	0.000
202	75	79	0.0527	0.2318	0.03478	163	0.000
203	75	87	0.05021	0.22079	0.03312	163	0.000
204	77	79	0.02829	0.12429	0.01862	163	0.000
205	79	94	0.0701	0.19686	0.02763	120	0.000
206	79	94	0.0701	0.19686	0.02763	120	0.000
207	79	94	0.17734	0.22181	0.02394	67	0.000
208	102	79	0	0.065	0	200	1.000
209	102	79	0	0.06185	0	200	1.000
210	102	79	0	0.065	0	200	1.000
211	80	81	0.00503	0.03143	0.00919	326	0.000
212	80	81	0.00503	0.03143	0.00919	326	0.000
213	80	88	0.27801	0.24842	0.02458	81	0.000
214	103	81	0	0.065	0	200	1.000
215	103	81	0	0.065	0	200	1.000
216	103	81	0	0.065	0	200	1.000
217	82	87	0.02954	0.12981	0.01945	163	0.000
218	83	91	0.06586	0.18493	0.02595	120	0.000
219	83	91	0.06586	0.18493	0.02595	120	0.000
220	83	94	0.08965	0.25164	0.03543	120	0.000
221	83	94	0.08965	0.25164	0.03543	120	0.000
222	84	219	0.10265	0.29597	0.03987	118	0.000
223	85	90	0.16392	0.19049	0.02386	67	0.000
224	85	90	0.16392	0.19049	0.02386	67	0.000

225	85	106	0.06081	0.17892	0.02282	120	0.000
226	90	91	0.02537	0.07117	0.00998	120	0.000
227	90	91	0.02537	0.07117	0.00998	120	0.000
228	90	94	0.09649	0.28487	0.03622	120	0.000
229	104	91	0	0.065	0	200	1.000
230	104	91	0	0.065	0	200	1.000
231	92	93	0.01108	0.03194	0.00427	118	0.000
232	93	107	0.07898	0.22195	0.03113	120	0.000
233	95	97	0.00972	0.07024	0.15458	429	0.000
234	95	97	0.00972	0.07024	0.15458	429	0.000
235	95	100	0.01009	0.07296	0.16061	429	0.000
236	95	100	0.01009	0.07296	0.16061	429	0.000
237	95	200	0.01852	0.13457	0.29807	429	0.000
238	95	200	0.01852	0.13457	0.29807	429	0.000
239	96	97	0.0007	0.00504	0.01106	429	0.000
240	96	97	0.0007	0.00504	0.01106	429	0.000
241	97	101	0.00146	0.01539	0.06276	858	0.000
242	97	101	0.00146	0.01539	0.06276	858	0.000
243	97	102	0.01115	0.08062	0.17758	429	0.000
244	97	102	0.01115	0.08062	0.17758	429	0.000
245	97	194	0.01765	0.12813	0.28355	429	0.000
246	97	194	0.01765	0.12813	0.28355	429	0.000
247	98	100	0.00649	0.04685	0.10295	429	0.000
248	98	100	0.00649	0.04685	0.10295	429	0.000
249	98	229	0.00641	0.04627	0.10168	429	0.000
250	98	229	0.00641	0.04627	0.10168	429	0.000
251	99	103	0.00876	0.06318	0.13947	429	0.000
252	99	110	0.00175	0.01258	0.02772	429	0.000
253	103	110	0.00831	0.05995	0.13233	429	0.000

254	104	109	0.0225	0.16373	0.36609	429	0.000
255	104	109	0.0225	0.16373	0.36609	429	0.000
256	105	107	0.07404	0.20803	0.02918	120	0.000
257	105	107	0.07404	0.20803	0.02918	120	0.000
258	105	107	0.18921	0.23784	0.02542	67	0.000
259	106	108	0.07091	0.2087	0.02663	120	0.000
260	110	111	0.00995	0.07176	0.15852	429	0.000
261	110	111	0.00995	0.07176	0.15852	429	0.000
262	112	136	0.0136	0.03937	0.00518	120	0.000
263	112	136	0.0136	0.03937	0.00518	120	0.000
264	113	140	0.05389	0.10905	0.01464	96	0.000
265	113	140	0.05389	0.10905	0.01464	96	0.000
266	114	120	0.05879	0.16502	0.02316	120	0.000
267	114	136	0.17662	0.49874	0.0705	120	0.000
268	114	278	0.11783	0.35912	0.04293	120	0.000
269	114	278	0.11783	0.35912	0.04293	120	0.000
270	115	116	0.01136	0.02421	0.00292	96	0.000
271	115	116	0.00893	0.02625	0.00335	120	0.000
272	115	125	0.15526	0.26493	0.0288	82	0.000
273	115	133	0.07434	0.21874	0.02793	120	0.000
274	116	123	0.09608	0.26999	0.03796	120	0.000
275	116	123	0.09608	0.26999	0.03796	120	0.000
276	116	132	0.04452	0.13091	0.0167	120	0.000
277	116	134	0.0209	0.05863	0.00822	120	0.000
278	116	134	0.0209	0.05863	0.00822	120	0.000
279	141	116	0	0.065	0	200	1.000
280	141	116	0	0.06692	0	200	1.000
281	141	116	0	0.06658	0	200	1.000
282	142	117	0	0.13	0	100	1.000

283	142	117	0	0.11833	0	100	1.000
284	118	119	0.16073	0.27696	0.02953	82	0.000
285	118	124	0.18486	0.31872	0.034	82	0.000
286	144	118	0	0.065	0	200	1.000
287	144	118	0	0.065	0	200	1.000
288	119	125	0.12065	0.20573	0.02235	82	0.000
289	119	138	0.03105	0.13644	0.02044	163	0.000
290	120	136	0.1278	0.35972	0.05065	120	0.000
291	121	131	0.05146	0.22641	0.03393	163	0.000
292	121	131	0.05146	0.22641	0.03393	163	0.000
293	145	121	0	0.0647	0	200	1.000
294	145	121	0	0.06495	0	200	1.000
295	122	135	0.04695	0.13183	0.01847	120	0.000
296	122	139	0.08729	0.18627	0.02248	96	0.000
297	122	140	0.03983	0.17505	0.02624	163	0.000
298	123	139	0.03996	0.11749	0.01499	120	0.000
299	124	126	0.07686	0.21799	0.03001	120	0.000
300	124	126	0.07686	0.21799	0.03001	120	0.000
301	124	127	0.03407	0.23506	0.03257	215	0.000
302	124	127	0.03407	0.23506	0.03257	215	0.000
303	124	129	0.07363	0.20696	0.02901	120	0.000
304	124	129	0.07363	0.20696	0.02901	120	0.000
305	124	129	0.04958	0.21804	0.0327	163	0.000
306	124	129	0.04958	0.21804	0.0327	163	0.000
307	124	137	0.08537	0.14551	0.0158	82	0.000
308	146	125	0	0.065	0	200	1.000
309	146	125	0	0.065	0	200	1.000
310	126	127	0.01806	0.05117	0.00703	120	0.000
311	128	136	0.00629	0.01822	0.0024	120	0.000

312	128	136	0.00629	0.01822	0.0024	120	0.000
313	147	129	0	0.06965	0	200	1.000
314	147	129	0	0.065	0	200	1.000
315	130	137	0.16706	0.35834	0.0431	96	0.000
316	136	137	0.21604	0.36926	0.0402	82	0.000
317	148	136	0	0.11817	0	100	0.988
318	148	136	0	0.125	0	100	0.988
319	148	136	0	0.125	0	100	0.988
320	149	138	0	0.065	0	200	1.000
321	149	138	0	0.065	0	200	1.000
322	139	140	0.00075	0.00472	0.00138	326	0.000
323	139	140	0.00075	0.00472	0.00138	326	0.000
324	150	140	0	0.065	0	200	1.000
325	150	140	0	0.065	0	200	1.000
326	141	143	0.0015	0.01168	0.0875	858	0.000
327	141	143	0.0015	0.01168	0.0875	858	0.000
328	141	146	0.00877	0.06327	0.13957	429	0.000
329	141	146	0.00877	0.06327	0.13957	429	0.000
330	142	145	0.00971	0.07048	0.15372	429	0.000
331	142	145	0.00971	0.07048	0.15372	429	0.000
332	142	148	0.00762	0.05519	0.12066	429	0.000
333	142	148	0.00762	0.05519	0.12066	429	0.000
334	143	149	0.01031	0.10941	0.45164	858	0.000
335	143	149	0.01031	0.10941	0.45164	858	0.000
336	143	150	0.01215	0.08775	0.19412	429	0.000
337	143	150	0.01215	0.08775	0.19412	429	0.000
338	144	149	0.00965	0.06962	0.15376	429	0.000
339	144	149	0.00965	0.06962	0.15376	429	0.000
340	145	146	0.00892	0.06472	0.1411	429	0.000

341	145	146	0.00892	0.06472	0.1411	429	0.000
342	145	149	0.00539	0.0388	0.08554	429	0.000
343	145	149	0.00539	0.0388	0.08554	429	0.000
344	147	148	0.00512	0.03688	0.08123	429	0.000
345	147	148	0.00512	0.03688	0.08123	429	0.000
346	148	149	0.00606	0.06391	0.26166	858	0.000
347	148	149	0.00606	0.06391	0.26166	858	0.000
348	148	302	0.02782	0.20472	0.45648	429	0.000
349	148	302	0.02782	0.20472	0.45648	429	0.000
350	151	187	0.03055	0.13423	0.02011	163	0.000
351	152	185	0.04742	0.13958	0.01792	118	0.000
352	152	188	0.06292	0.18458	0.02389	118	0.000
353	191	152	0	0.11883	0	100	1.000
354	191	152	0	0.1185	0	100	1.000
355	153	187	0.06808	0.19117	0.02683	120	0.000
356	154	155	0.01157	0.03245	0.00455	120	0.000
357	154	155	0.01157	0.03245	0.00455	120	0.000
358	154	156	0.00503	0.03352	0.00861	326	0.000
359	154	156	0.00503	0.03352	0.00861	326	0.000
360	155	163	0.02648	0.07433	0.01041	120	0.000
361	155	163	0.02648	0.07433	0.01041	120	0.000
362	192	156	0	0.065	0	200	0.975
363	192	156	0	0.061	0	200	0.975
364	192	156	0	0.065	0	200	0.975
365	157	166	0.02766	0.12153	0.01821	163	0.000
366	157	174	0.08119	0.23905	0.03051	120	0.000
367	157	189	0.04271	0.18773	0.02814	163	0.000
368	193	157	0	0.065	0	200	0.975
369	193	157	0	0.065	0	200	0.975

370	158	163	0.05505	0.16189	0.02066	120	0.000
371	159	164	0.02954	0.12981	0.01945	163	0.000
372	159	164	0.02954	0.12981	0.01945	163	0.000
373	159	185	0.06211	0.18664	0.02299	118	0.000
374	160	162	0.09902	0.21113	0.02584	95	0.000
375	160	168	0.04184	0.12204	0.01594	118	0.000
376	160	183	0.05361	0.15722	0.02034	118	0.000
377	161	163	0.07454	0.20945	0.02938	120	0.000
378	161	163	0.07454	0.20945	0.02938	120	0.000
379	161	167	0.02161	0.06066	0.0085	120	0.000
380	161	167	0.02161	0.06066	0.0085	120	0.000
381	161	168	0.00849	0.05304	0.01552	326	0.000
382	161	168	0.00849	0.05304	0.01552	326	0.000
383	162	163	0.01634	0.04586	0.00642	120	0.000
384	164	177	0.04793	0.1411	0.01811	118	0.000
385	164	178	0.05272	0.15509	0.01977	120	0.000
386	165	175	0.05464	0.1607	0.0205	120	0.000
387	194	165	0	0.125	0	100	1.000
388	194	165	0	0.125	0	100	1.000
389	168	169	0.00799	0.03509	0.00525	163	0.000
390	168	169	0.00799	0.03509	0.00525	163	0.000
391	168	174	0.12152	0.34195	0.04812	120	0.000
392	168	174	0.12152	0.34195	0.04812	120	0.000
393	168	179	0.05585	0.15664	0.02202	120	0.000
394	168	179	0.05585	0.15664	0.02202	120	0.000
395	195	168	0	0.065	0	200	0.988
396	195	168	0	0.0627	0	200	0.988
397	195	168	0	0.06235	0	200	0.988
398	170	185	0.05832	0.25656	0.03851	163	0.000

399	171	172	0.03005	0.13209	0.01977	163	0.000
400	171	186	0.0546	0.072	0.00747	72	0.000
401	172	180	0.04918	0.14461	0.01845	120	0.000
402	196	172	0	0.06495	0	200	0.975
403	196	172	0	0.0651	0	200	0.975
404	173	179	0.10912	0.32152	0.04112	120	0.000
405	175	176	0.09448	0.27881	0.03547	120	0.000
406	176	177	0.04776	0.14075	0.01788	120	0.000
407	177	178	0.01748	0.05143	0.0066	118	0.000
408	178	184	0.04083	0.12016	0.01543	118	0.000
409	197	178	0	0.0625	0	200	0.963
410	197	178	0	0.065	0	200	0.963
411	179	190	0.06323	0.17737	0.02494	120	0.000
412	179	190	0.06323	0.17737	0.02494	120	0.000
413	181	184	0.04246	0.12494	0.01604	118	0.000
414	181	190	0.04955	0.14585	0.01873	118	0.000
415	182	190	0.0613	0.17592	0.02381	118	0.000
416	182	190	0.0613	0.17592	0.02381	118	0.000
417	198	182	0	0.065	0	200	1.000
418	198	182	0	0.065	0	200	1.000
419	183	188	0.04063	0.11913	0.01541	118	0.000
420	184	185	0.07768	0.22881	0.02941	118	0.000
421	186	187	0.04746	0.13319	0.01868	120	0.000
422	186	187	0.04746	0.13319	0.01868	120	0.000
423	186	221	0.04513	0.13269	0.01693	120	0.000
424	200	187	0	0.0604	0	200	0.988
425	200	187	0	0.065	0	200	0.988
426	191	196	0.02153	0.15627	0.34985	429	0.000
427	191	196	0.02153	0.15627	0.34985	429	0.000

428	191	199	0.00545	0.04175	0.0811	429	0.000
429	192	195	0.01373	0.09943	0.21925	429	0.000
430	192	195	0.01373	0.09943	0.21925	429	0.000
431	193	195	0.01967	0.14297	0.31736	429	0.000
432	193	195	0.01967	0.14297	0.31736	429	0.000
433	194	197	0.01231	0.08909	0.19622	429	0.000
434	194	197	0.01231	0.08909	0.19622	429	0.000
435	195	197	0.01608	0.11664	0.25775	429	0.000
436	195	197	0.01608	0.11664	0.25775	429	0.000
437	201	195	0	0.02167	0	600	0.988
438	201	195	0	0.02167	0	600	0.988
439	196	197	0.02176	0.10422	0.21206	326	0.000
440	196	197	0.02176	0.10422	0.21206	326	0.000
441	196	199	0.01617	0.12454	0.24355	429	0.000
442	196	200	0.00484	0.03481	0.07693	429	0.000
443	196	200	0.00484	0.03481	0.07693	429	0.000
444	196	227	0.01255	0.09034	0.20142	429	0.000
445	196	227	0.01255	0.09034	0.20142	429	0.000
446	197	198	0.01832	0.08764	0.17804	326	0.000
447	197	198	0.01832	0.08764	0.17804	326	0.000
448	202	200	0	0.02223	0	600	0.988
449	202	200	0	0.02244	0	600	0.988
450	202	200	0	0.02239	0	600	0.988
451	200	226	0.01462	0.10555	0.23455	429	0.000
452	200	226	0.01462	0.10555	0.23455	429	0.000
453	200	230	0.00724	0.07654	0.31397	858	0.000
454	200	230	0.00724	0.07654	0.31397	858	0.000
455	201	202	0.00264	0.03482	3.348	2832	0.000
456	201	202	0.0027	0.03566	3.434	2832	0.000

457	201	202	0.0027	0.03566	3.434	2832	0.000
458	202	233	0.00138	0.01646	1.8337	2832	0.000
459	202	233	0.00138	0.01646	1.8337	2832	0.000
460	226	203	0	0.106	0	100	1.000
461	204	205	0.14206	0.19104	0.00246	43	0.000
462	209	204	0	0.2996	0	25	1.000
463	206	208	0.07324	0.09492	0.01023	72	0.000
464	206	223	0.03332	0.09588	0.01288	118	0.000
465	206	223	0.03332	0.09588	0.01288	118	0.000
466	206	223	0.03393	0.09948	0.01287	118	0.000
467	226	206	0	0.061	0	200	0.975
468	226	206	0	0.065	0	200	0.975
469	226	206	0	0.065	0	200	0.975
470	207	208	0.03854	0.10813	0.01517	120	0.000
471	207	208	0.03854	0.10813	0.01517	120	0.000
472	207	213	0.03753	0.11034	0.01407	120	0.000
473	207	215	0.0432	0.12121	0.01701	120	0.000
474	207	215	0.0432	0.12121	0.01701	120	0.000
475	207	222	0.07989	0.10782	0.01064	72	0.000
476	207	223	0.1304	0.17208	0.01786	72	0.000
477	227	207	0	0.06205	0	200	0.963
478	227	207	0	0.06065	0	200	0.963
479	208	209	0.00346	0.0152	0.00228	163	0.000
480	208	209	0.00346	0.0152	0.00228	163	0.000
481	208	210	0.021	0.05893	0.00826	120	0.000
482	208	210	0.021	0.05893	0.00826	120	0.000
483	210	211	0.00107	0.00712	0.00183	326	0.000
484	210	211	0.00107	0.00712	0.00183	326	0.000
485	228	211	0	0.0605	0	200	0.988

486	228	211	0	0.0605	0	200	0.988
487	228	211	0	0.0625	0	200	0.988
488	228	211	0	0.0625	0	200	0.988
489	212	215	0.0826	0.24313	0.03105	120	0.000
490	214	221	0.07004	0.09718	0.00904	72	0.000
491	216	220	0.02577	0.07576	0.00966	120	0.000
492	217	223	0.0207	0.06085	0.00776	120	0.000
493	218	223	0.04795	0.06651	0.00618	72	0.000
494	219	225	0.03287	0.09244	0.0129	118	0.000
495	219	225	0.03287	0.09244	0.0129	118	0.000
496	229	219	0	0.0585	0	200	0.988
497	229	219	0	0.06108	0	200	0.988
498	229	219	0	0.06042	0	200	0.988
499	220	225	0.01447	0.06358	0.00951	163	0.000
500	220	225	0.01447	0.06358	0.00951	163	0.000
501	220	225	0.02689	0.07885	0.0101	120	0.000
502	224	225	0.00547	0.01753	0.00244	118	0.000
503	230	225	0	0.065	0	200	0.988
504	230	225	0	0.065	0	200	0.988
505	230	225	0	0.0625	0	200	0.988
506	230	225	0	0.065	0	200	0.988
507	226	228	0.00493	0.03545	0.07836	429	0.000
508	226	228	0.00493	0.03545	0.07836	429	0.000
509	227	230	0.00518	0.03736	0.08206	429	0.000
510	227	230	0.00518	0.03736	0.08206	429	0.000
511	228	231	0.00112	0.01177	0.04798	858	0.000
512	228	231	0.00112	0.01177	0.04798	858	0.000
513	229	230	0.00309	0.02232	0.04901	429	0.000
514	229	230	0.00309	0.02232	0.04901	429	0.000

515	233	231	0	0.024	0	750	1.000
516	233	232	0	0.024	0	750	1.000
517	233	270	0.00095	0.01568	1.7691	3736	0.000
518	233	311	0.00096	0.01812	2.0724	3736	0.000
519	233	311	0.0011	0.02083	2.3903	3736	0.000
520	234	237	0.00676	0.04504	0.01156	326	0.000
521	234	237	0.00676	0.04504	0.01156	326	0.000
522	234	255	0.00315	0.01382	0.00207	163	0.000
523	234	255	0.00315	0.01382	0.00207	163	0.000
524	260	234	0	0.065	0	200	0.988
525	260	234	0	0.0601	0	200	0.988
526	260	234	0	0.0595	0	200	0.988
527	235	239	0.00849	0.05304	0.01552	326	0.000
528	235	239	0.00849	0.05304	0.01552	326	0.000
529	235	255	0.03368	0.09878	0.01266	120	0.000
530	261	236	0	0.065	0	200	1.000
531	261	236	0	0.065	0	200	1.000
532	237	242	0.01067	0.03201	0.00395	118	0.000
533	238	240	0.01634	0.04583	0.00643	120	0.000
534	238	240	0.01634	0.04583	0.00643	120	0.000
535	238	243	0.01598	0.07017	0.01051	163	0.000
536	238	243	0.01598	0.07017	0.01051	163	0.000
537	263	238	0	0.0464	0	200	1.000
538	263	238	0	0.04625	0	200	1.000
539	264	239	0	0.0625	0	200	0.988
540	264	239	0	0.0625	0	200	0.988
541	264	239	0	0.065	0	200	0.988
542	264	239	0	0.065	0	200	0.988
543	240	258	0.03048	0.09145	0.01128	118	0.000

544	241	245	0.04789	0.07487	0.00857	78	0.000
545	241	246	0.05687	0.16714	0.02136	120	0.000
546	241	256	0.06243	0.18363	0.02344	120	0.000
547	241	259	0.04609	0.33245	0.04603	215	0.000
548	241	259	0.04609	0.33245	0.04603	215	0.000
549	242	252	0.01057	0.03171	0.00391	118	0.000
550	243	255	0.01346	0.05912	0.00885	163	0.000
551	265	244	0	0.065	0	200	0.988
552	265	244	0	0.065	0	200	0.988
553	265	244	0	0.065	0	200	0.988
554	246	249	0.04806	0.14124	0.01804	120	0.000
555	246	259	0.05747	0.16143	0.02262	120	0.000
556	246	259	0.05747	0.16143	0.02262	120	0.000
557	247	254	0.05737	0.16874	0.02153	120	0.000
558	247	258	0.04266	0.12801	0.01579	118	0.000
559	248	254	0.00377	0.02358	0.0069	326	0.000
560	248	254	0.00377	0.02358	0.0069	326	0.000
561	248	257	0.02479	0.15503	0.04542	326	0.000
562	267	248	0	0.065	0	200	1.000
563	267	248	0	0.065	0	200	1.000
564	249	251	0.00936	0.04113	0.00659	163	0.000
565	249	251	0.00936	0.04113	0.00659	163	0.000
566	250	251	0.00098	0.00964	0.00281	430	0.000
567	250	251	0.00098	0.00964	0.00281	430	0.000
568	268	250	0	0.0652	0	200	0.988
569	251	252	0.0166	0.07294	0.01092	163	0.000
570	252	253	0.01118	0.03354	0.00414	118	0.000
571	254	257	0.08975	0.26423	0.03376	120	0.000
572	268	259	0	0.06	0	200	1.000

573	268	259	0	0.06167	0	200	1.000
574	268	259	0	0.06558	0	200	1.000
575	260	263	0.00524	0.03769	0.08325	429	0.000
576	260	263	0.00524	0.03769	0.08325	429	0.000
577	260	263	0.00509	0.03665	0.08079	429	0.000
578	260	263	0.00509	0.03665	0.08079	429	0.000
579	260	264	0.0029	0.0209	0.04613	429	0.000
580	260	264	0.0029	0.0209	0.04613	429	0.000
581	260	273	0.00016	0.00166	0.00695	858	0.000
582	260	273	0.00016	0.00166	0.00695	858	0.000
583	260	275	0.00016	0.00166	0.00695	858	0.000
584	260	275	0.00016	0.00166	0.00695	858	0.000
585	261	268	0.00065	0.00683	0.02784	858	0.000
586	261	268	0.00065	0.00683	0.02784	858	0.000
587	261	269	0.00077	0.01283	0.08345	1716	0.000
588	261	269	0.00077	0.01283	0.08345	1716	0.000
589	262	265	0.00044	0.00462	0.01885	858	0.000
590	262	265	0.00044	0.00462	0.01885	858	0.000
591	263	267	0.00379	0.03993	0.16308	858	0.000
592	263	267	0.00379	0.03993	0.16308	858	0.000
593	264	271	9.00E-05	0.001	0.00407	858	0.000
594	264	271	9.00E-05	0.001	0.00407	858	0.000
595	265	272	0.0022	0.01582	0.03484	429	0.000
596	265	272	0.0022	0.01582	0.03484	429	0.000
597	266	268	0.00062	0.00651	0.02656	858	0.000
598	266	268	0.00062	0.00651	0.02656	858	0.000
599	270	269	0	0.018	0	1000	1.000
600	270	269	0	0.018	0	1000	1.000
601	275	274	0	0.065	0	200	1.000

602	275	274	0	0.065	0	200	1.000
603	276	277	0.01184	0.03476	0.00428	179	0.000
604	276	277	0.0024	0.02521	0.00643	430	0.000
605	276	285	0.00519	0.05115	0.01489	430	0.000
606	276	289	0.03647	0.10943	0.0135	118	0.000
607	277	282	0.02212	0.06511	0.00828	120	0.000
608	277	285	0.00758	0.07982	0.02035	430	0.000
609	277	299	0.03327	0.09768	0.01249	120	0.000
610	301	277	0	0.06285	0	200	0.975
611	301	277	0	0.062	0	200	0.975
612	301	277	0	0.06183	0	200	0.975
613	278	287	0.0597	0.16757	0.02352	120	0.000
614	278	287	0.0597	0.16757	0.02352	120	0.000
615	302	278	0	0.065	0	200	1.000
616	302	278	0	0.065	0	200	1.000
617	279	280	0.02912	0.08554	0.01092	120	0.000
618	279	281	0.05805	0.1247	0.01483	96	0.000
619	279	286	0.032	0.09602	0.01184	118	0.000
620	280	288	0.02587	0.076	0.00971	120	0.000
621	303	280	0	0.065	0	200	1.000
622	303	280	0	0.065	0	200	1.000
623	283	299	0.01279	0.03753	0.0048	120	0.000
624	283	300	0.04624	0.13565	0.01739	120	0.000
625	304	284	0	0.1949	0	66.7	1.000
626	304	284	0	0.1949	0	66.7	1.000
627	285	292	0.001	0.01051	0.00268	430	0.000
628	285	292	0.001	0.01051	0.00268	430	0.000
629	286	290	0.01697	0.10603	0.03104	326	0.000
630	286	290	0.01697	0.10603	0.03104	326	0.000

631	287	288	0.06334	0.17956	0.0247	120	0.000
632	305	287	0	0.123	0	100	0.975
633	305	287	0	0.123	0	100	0.975
634	289	290	0.00333	0.01465	0.00219	163	0.000
635	289	290	0.00333	0.01465	0.00219	163	0.000
636	289	297	0.0388	0.11828	0.01413	118	0.000
637	306	290	0	0.065	0	200	1.000
638	306	290	0	0.0625	0	200	1.000
639	291	295	0.00491	0.03268	0.00839	326	0.000
640	291	295	0.00491	0.03268	0.00839	326	0.000
641	308	291	0	0.0595	0	200	1.000
642	308	291	0	0.058	0	200	1.000
643	308	291	0	0.0595	0	200	1.000
644	308	291	0	0.0585	0	200	1.000
645	293	296	0.00762	0.0381	0.00795	163	0.000
646	293	296	0.00762	0.0381	0.00795	163	0.000
647	294	296	0.00347	0.01987	0.00522	326	0.000
648	294	296	0.00347	0.01987	0.00522	326	0.000
649	296	297	0.01626	0.04955	0.00592	118	0.000
650	309	296	0	0.065	0	200	1.000
651	309	296	0	0.065	0	200	1.000
652	309	296	0	0.065	0	200	1.000
653	298	300	0.03094	0.09075	0.01163	120	0.000
654	310	298	0	0.11967	0	100	1.000
655	301	306	0.00104	0.01726	0.11226	1716	0.000
656	301	306	0.00104	0.01726	0.11226	1716	0.000
657	301	310	0.01085	0.07847	0.17282	429	0.000
658	301	310	0.01085	0.07847	0.17282	429	0.000
659	301	310	0.01085	0.07847	0.17282	429	0.000

660	301	310	0.01085	0.07847	0.17282	429	0.000
661	302	305	0.00587	0.04255	0.09278	429	0.000
662	302	305	0.00587	0.04255	0.09278	429	0.000
663	303	305	0.00975	0.07046	0.15506	429	0.000
664	303	305	0.00975	0.07046	0.15506	429	0.000
665	303	306	0.01207	0.08734	0.19249	429	0.000
666	303	306	0.01207	0.08734	0.19249	429	0.000
667	304	310	0.00827	0.06016	0.13024	429	0.000
668	304	310	0.00827	0.06016	0.13024	429	0.000
669	306	307	0.0005	0.00828	0.05384	1716	0.000
670	306	307	0.0005	0.00828	0.05384	1716	0.000
671	306	313	0.00035	0.00368	0.01499	858	0.000
672	306	313	0.00035	0.00368	0.01499	858	0.000
673	307	309	0.0018	0.01891	0.07711	858	0.000
674	307	309	0.0018	0.01891	0.07711	858	0.000
675	312	307	0	0.024	0	750	0.975
676	312	307	0	0.024	0	750	0.975
677	311	312	0.00012	0.00218	0.24702	3736	0.000
678	311	312	0.00012	0.00218	0.24702	3736	0.000

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วรพงษ์ วงศ์ไชย
วัน เดือน ปี เกิด	18 สิงหาคม 2531
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงใหม่
ที่อยู่ปัจจุบัน	17/3 หมู่ 9 ตำบลคลองข่อย อำเภอปากเกร็ด ถนนประตุน้ำ-วัดศรีเขต จังหวัดนนทบุรี 11120



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY