การแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมเพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง
โดยวิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้

นายศรัณยู ตรียะโชติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMAL BUS SPLITTING FOR REDUCING SHORT CIRCUIT CURRENT

IN TRANSMISSION SYSTEM BY ADAPTIVE TABU SEARCH

Mr. Sarunyu Treyachot

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมเพื่อลดกระแสลัดวงจร ในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง โดยวิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้
โดย	นายศรัณยู ตรียะโชติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ฐิติพร สังข์เพชร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศรัณยู ตรียะโชติ : การแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมเพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง โดยวิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้. (OPTIMAL BUS SPLITTING FOR REDUCING SHORT CIRCUIT CURRENT IN TRANSMISSION SYSTEM BY ADAPTIVE TABU SEARCH) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. แนบบุญ หุนเจริญ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์, 169 หน้า.

การเติบโตของสภาพเศรษฐกิจและสังคมในปัจจุบัน ส่งผลให้ปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการขยายระบบผลิตและส่งกำลังไฟฟ้า เช่น การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การเพิ่มจำนวนสายส่ง การเพิ่มจำนวนหม้อแปลง หรือการจัดรูปแบบการจ่ายไฟเป็นระบบเครือข่าย จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อรองรับความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น การขยายระบบดังกล่าวส่งผลให้ความต้านทานรวมของระบบส่งไฟฟ้าลดลง เป็นเหตุให้ขนาดกระแสลัดวงจร ณ จุดต่างๆในระบบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสร้างความเสียหายให้เกิดขึ้นอย่างมากมาย เช่น ในกรณีของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) กระแสลัดวงจรค่าสูงได้สร้างความเสียหายแก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์

ด้วยเหตุนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการกำหนดตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง โดยพิจารณาเงื่อนไขจำกัดของระบบ เช่น พิกัดกระแสลัดวงจร พิกัดแรงดันบัส พิกัดสายส่ง การแยกตัวจากกันของระบบ ความมั่นคงของระบบ และข้อจำกัดของการแบ่งแยกบัสในทางปฏิบัติ โดยนำวิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้มาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่น้อยที่สุดซึ่งแปรผันตรงกับเงินลงทุนที่จะใช้ในการแก้ปัญหา นอกจากนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังพิจารณาการหาตำแหน่ง และจำนวนการแบ่งแยกบัส ร่วมกับการติดตั้ง Current Limiting Reactor ในขนาดที่น้อยที่สุด เพื่อความยืดหยุ่นในการพิจารณาเงื่อนไขบังคับ สำหรับกระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาอีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ศรัณยู ตรียะโชติ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

5270696921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS : POWER SYSTEM / TRANSMISSION SYSTEM / BUS SPLITTING / SHORT CIRCUIT CURRENT / TABU SEARCH

SARUNYU TREYACHOT : OPTIMAL BUS SPLITTING FOR REDUCING SHORT CIRCUIT CURRENT IN TRANSMISSION SYSTEM BY ADAPTIVE TABU SEARCH. ADVISOR : ASST. PROF. NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., CO-ADVISOR : SURACHAI CHAITUSANEY, Ph.D., 169 pp.

Nowadays, the growth of economy and society become a major factor influencing the higher electricity demand. Therefore, the expansion of electric power system, e.g. more generators, transmission lines, and transformers, is essential for supporting electricity demand growth. The expansion of system results in excessive short circuit currents compared to the interrupting capacity of circuit breakers. In case of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), high short circuit currents may cause damage to substation circuit breakers.

This thesis proposes a method for determining optimal number and locations for bus splitting. The proposed method reduces short circuit currents by applying adaptive tabu search algorithm to solve the nonlinear optimization problem along with the consideration of system operating constraints, including short circuit current limits, bus voltage limits, transmission line limits, network isolation prohibition, and contingency violation. In addition to bus splitting, this thesis also proposes optimal number, locations for bus installing, and the smallest size of Current Limiting Reactor (CLR) to increase the feasible region bound by system constraints.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Electrical Engineering	Student's Signature ....
Field of Study : Electrical Engineering	Advisor's Signature ....
Academic Year : 2010	Co-advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กระผมขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และอาจารย์ ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ พร้อมทั้งแรงกระตุ้นและแรงบันดาลใจในการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และ ดร. ฐิติพร สังข์เพชร ที่กรุณาสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบ และได้ให้ข้อเสนอเพิ่มเติมอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกๆ ท่านที่ให้ความรู้ในการศึกษา และคนรอบตัวผู้วิจัยทุกๆ คนสำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่อนุเคราะห์ทุนสนับสนุน และเอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ตลอดจนญาติทุกๆ ท่านที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฏ

สารบัญภาพ ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 3

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 5

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 กระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง 6

2.1.1 ความหมายและประเภทของฟอลต์ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า 6

2.1.2 การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง 8

2.1.3 การคำนวณกระแสลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ 9

2.2 วิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง 10

2.2.1 วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟ 11

2.2.1.1 การประยุกต์ใช้ Superconductor Fault Current Limiter 11

2.2.1.2 การประยุกต์ใช้ Solid-State Fault Current Limiter 13

2.2.1.3 การประยุกต์ใช้ Is-Limiter 14

2.2.2 วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟ 15

2.2.2.1 การแบ่งแยกบัส 16

2.2.2.2 การปลดวงจรสายส่ง 17

2.2.2.3 การประยุกต์ใช้ Current Limiting Reactor 18

2.2.2.4 การประยุกต์ใช้หม้อแปลงอิมพีแดนซ์สูง 20

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

2.2.2.5 การเพิ่มอิมพีแดนซ์สายดิน ... 20
2.2.3 วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบอื่นๆ ... 21
2.2.3.1 High Voltage Direct Current (HVDC) ... 21
2.2.3.2 การยกระดับแรงดัน ... 23
2.2.4 วิธีการลดกระแสลัดวงจรที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตนำมาประยุกต์ใช้ ... 23
2.3 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ... 24
2.4 วิธีค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึก (Heuristic Search) ... 26
2.4.1 จีนเนติกอัลกอริทึม ... 27
2.4.2 อัลกอริทึมการอบอ่อนจำแลง ... 27
2.4.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยคอโลนีมด ... 28
2.4.4 วิธีค้นหาตาบู ... 28
2.5 วิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Tabu Search) ... 29
2.5.1 แนวคิดพื้นฐานของวิธีค้นหาตาบู ... 30
2.5.2 องค์ประกอบพื้นฐานของวิธีค้นหาตาบู ... 31
2.5.3 วิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้ ... 33
2.5.4 อัลกอริธึมวิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้ ... 35
บทที่ 3 วิธีการแบ่งแยกบัสที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ... 39
3.1 หลักการของการแบ่งแยกบัสเพื่อลดกระแสลัดวงจร ... 39
3.2 วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวร ... 40
3.2.1 บัสที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก ... 41
3.2.2 บัสที่ไม่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก ... 42
3.3 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยกบัส ... 43
3.3.1 ผลกระทบต่อกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ... 43
3.3.2 ผลกระทบต่อการรักษาระดับแรงดัน ... 43
3.3.3 ผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบ ... 43
3.3.4 ผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบ ... 43
3.3.5 ผลกระทบต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบ ... 44
3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในสภาวะอยู่ตัว ... 44
3.4.1 Q-V Modal Analysis ... 44
3.4.2 ดัชนีเสถียรภาพแรงดัน PQ (PQVSI) ... 46

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

3.5 วิธีการติดตั้ง CLR แทนการแบ่งแยกบัส 47
3.6 ปัญหาการหาตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม 50
บทที่ 4 การกำหนดตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม เพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง 51
4.1 นิยามตัวแปร 51
4.2 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 52
4.2.1 รูปแบบของปัญหา สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 52
4.2.1.1 ฟังชันก์วัตถุประสงค์ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 53
4.2.1.2 เงื่อนไขบังคับ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 53
4.2.2 กระบวนการในการแก้ปัญหา สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 55
4.2.2.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยประยุกต์ ATS สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 55
4.2.2.1 ขั้นตอนวิเคราะห์คุณภาพคำตอบ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 61
4.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 66
4.3.1 รูปแบบของปัญหา สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 66
4.3.1.1 ฟังชันก์วัตถุประสงค์ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 66
4.3.1.2 เงื่อนไขบังคับ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 67
4.3.2 กระบวนการในการแก้ปัญหา สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 68
4.3.2.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยประยุกต์ ATS สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 68
4.3.2.2 ขั้นตอนวิเคราะห์คุณภาพคำตอบ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 72
บทที่ 5 การทดสอบสมรรถนะ 78
5.1 การทดสอบระบบ IEEE RTS-79 78
5.1.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 79
5.1.1.1 กรณีฐาน 79
5.1.1.2 กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกระแสลัดวงจรมากที่สุดในระบบ 80
5.1.1.3 กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมากที่สุดในระบบ 82

หน้า

5.1.1.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ 86
5.1.1.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ 89
5.1.2 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR 90
5.1.2.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ 90
5.1.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ 93
5.1.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 94
5.1.3.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ 94
5.1.3.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ 96
5.1.4 วิเคราะห์ผลคำตอบที่ได้ในแต่ละกรณีการทดสอบ 96
5.2 การทดสอบระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงในเขตกรุงเทพและปริมณฑลของ กฟผ. 98
5.2.1 ผลการทดสอบกรณีไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 100
5.2.1.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 101
5.2.1.1.1 กรณีฐาน 101
5.2.1.1.2 กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมาก 102
5.2.1.1.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ 103
5.2.1.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส ตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 106
5.2.1.2 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR 107
5.2.1.2.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ 107
5.2.1.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ 110
5.2.1.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 111
5.2.1.3.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ 111
5.2.1.3.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ 112
5.2.2 ผลการทดสอบกรณีพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 112
5.2.2.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 112

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

5.2.2.1.1 กรณีฐาน 113
5.2.2.1.2 กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมาก 113
5.2.2.1.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ 114
5.2.2.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับตามวิธีที่นำเสนอ 115
5.2.2.2 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR 116
5.2.2.2.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ 116
5.2.2.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ 119
5.2.2.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 120
5.2.2.3.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ 120
5.2.2.3.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ 123
5.2.3 วิเคราะห์ผลคำตอบที่ได้ในแต่ละกรณีการทดสอบ 124
5.2.3.1 กรณีไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 124
5.2.3.2 กรณีพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 126
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 129
6.1 สรุปผลการวิจัย 129
6.2 ข้อเสนอแนะ 131
รายการอ้างอิง 132
ภาคผนวก 135
ภาคผนวก ก ข้อมูลระบบทดสอบ 136
ภาคผนวก ข ผลสอบเทียบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า 154
ภาคผนวก ค ผลการคำนวณทุกรอบของโปรแกรมหาค่าเหมาะสม 158
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 169

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 5.1 ผลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 86
ตารางที่ 5.2 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ ด้วยวิธีแบ่งแยกบัส 89
ตารางที่ 5.3 ผลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR 91
ตารางที่ 5.4 ผลของคำตอบที่มีขนาดรวมของ CLR น้อยที่สุด โดยเรียงลำดับกระแสลัดวงจร ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR 91
ตารางที่ 5.5 ผลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 95
ตารางที่ 5.6 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ เมื่อทดสอบกับระบบ IEEE RTS-79 ... 97
ตารางที่ 5.7 ผลการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่สถานีไฟฟ้าในเขตกรุงเทพและปริมณฑล 100
ตารางที่ 5.8 ผลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส และไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 104
ตารางที่ 5.9 ผลการเรียงลำดับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส และไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 104
ตารางที่ 5.10 สรุปผลการทดสอบทุกกรณีของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส เมื่อทดสอบกับระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงในเขตกรุงเทพและปริมณฑล โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 107
ตารางที่ 5.11 ผลการเรียงลำดับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR และไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 108
ตารางที่ 5.12 ผลการเรียงลำดับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสหรือติดตั้ง CLR และไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 111
ตารางที่ 5.13 ผลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส และพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 114
ตารางที่ 5.14 สรุปผลการทดสอบทุกกรณีของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส เมื่อทดสอบกับระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงในเขตกรุงเทพและปริมณฑล โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 116
ตารางที่ 5.15 ผลการเรียงลำดับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR และพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 117

หน้า

ตารางที่ 5.16 ผลการเรียงลำดับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัส หรือติดตั้ง CLR และพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง.. 121

ตารางที่ 5.17 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง เมื่อทดสอบกับระบบจริงของ กฟผ... 124

ตารางที่ 5.18 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง เมื่อทดสอบกับระบบจริงของ กฟผ. และใช้ค่าดัชนีชี้วัดที่เหมาะสม 125

ตารางที่ 5.19 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง เมื่อทดสอบกับระบบจริงของ กฟผ. 126

ตารางที่ 5.20 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง เมื่อทดสอบกับระบบจริงของ กฟผ. และใช้ค่าดัชนีชี้วัดที่เหมาะสม 127

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบ IEEE-RTS79…..136

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ IEEE-RTS79 137

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบ IEEE-RTS79 138

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัสของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล 141

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล 145

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล 147

ตารางที่ ข.1 สรุปผลความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบผลการคำนวณกับ กฟผ. 157

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส ร่วมกับการติดตั้ง CLR 158

ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ 161

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ 164

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ Voltage & Current Waveforms เมื่อเกิดการลัดวงจรไฟฟ้า....... 7
รูปที่ 2.2 ค่ากระแสเทียบกับเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ที่เกิดลัดวงจรขณะไม่มีโหลด .. 8
รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้า k บัส 10
รูปที่ 2.4 วิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า........ 11
รูปที่ 2.5 คุณสมบัติของวัสดุตัวนำยิ่งยวด........ 12
รูปที่ 2.6 การประยุกต์ใช้ Superconductor fault current limiter 12
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Solid-State Fault Current Limiter 13
รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของ Is-Limiter 15
รูปที่ 2.9 การเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งที่ลดลง ภายหลังจากแบ่งแยกบัส 16
รูปที่ 2.10 จำนวนของแหล่งจ่ายที่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร ณ จุดที่เกิดลัดวงจร........ 16
รูปที่ 2.11 การแบ่งแยกบัสแบบถาวร และไม่ถาวร 16
รูปที่ 2.12 การปลดวงจรสายส่ง........ 17
รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของ CLR ชนิด Air core current-limiting reactor 18
รูปที่ 2.14 CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสบาร์........ 19
รูปที่ 2.15 CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาเข้า........ 19
รูปที่ 2.16 CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาออก 19
รูปที่ 2.17 การต่ออิมพีแดนซ์ลงกราวด์ผ่านสายนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า 21
รูปที่ 2.18 1000 MW, HVDC, 12-pulse, transmission system 22
รูปที่ 2.19 VDCOL characteristic........ 22
รูปที่ 2.20 ปฏิบัติการ ‘move’ หรือการเดิน เพื่อหาคำตอบใหม่จากคำตอบปัจจุบัน........ 31
รูปที่ 2.21 การค้นหาคำตอบเฉพาะที่........ 31
รูปที่ 2.22 การหลีกเลี่ยงคำตอบเหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น 32
รูปที่ 2.23 การเดินย้อนรอยใน ATS 34
รูปที่ 2.24 การค้นหาแบบตาบูชนิดปรับตัวได้ 35
รูปที่ 2.25 การสุ่มเลือกคำตอบเริ่มต้น (S0) 35
รูปที่ 2.26 ผลิตค่าใกล้เคียงแบบสุ่ม 36
รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบค่าใกล้เคียง........ 36
รูปที่ 2.28 ปรับค่าคำตอบเริ่มต้นใหม่ 36

หน้า

รูปที่ 2.29 ผลิตค่าใกล้เคียงแบบสุ่มรอบใหม่ 37
รูปที่ 2.30 กลไกย้อนรอยการค้นหา 37
รูปที่ 2.31 กลไกปรับรัศมีการค้นหา 38
รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งที่ลดลง ภายหลังจากแบ่งแยกบัส 39
รูปที่ 3.2 จำนวนของแหล่งจ่ายที่ใกล้เคียงกับจุดลัดวงจรลดลง ภายหลังจากแบ่งแยกบัส 39
รูปที่ 3.3 การแบ่งแยกบัสแบบถาวร และไม่ถาวร 40
รูปที่ 3.4 การแบ่งแยกบัสที่เป็นจุดเชื่อมต่อของระบบส่งกำลังไฟฟ้า 40
รูปที่ 3.5 การแบ่งแยกบัสชนิด PV 41
รูปที่ 3.6 การแบ่งแยกบัสชนิด PQ 41
รูปที่ 3.7 การแบ่งแยกบัสที่เป็นจุดเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้ากำลัง 41
รูปที่ 3.8 การแบ่งแยกบัสชนิด PV ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ที่บัส 1 เครื่อง 42
รูปที่ 3.9 การแบ่งแยกบัสชนิด PV หรือ PQ ที่มีสายส่งต่ออยู่ที่บัส 1 เส้น 42
รูปที่ 3.10 การแบ่งแยกบัสที่เป็นจุดเชื่อมในระบบส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งมีหม้อแปลงอยู่ที่บัส 1 ลูก 42
รูปที่ 3.11 การแบ่งแยกบัสที่มีอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันติดตั้งที่บัส 43
รูปที่ 3.12 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟ 46
รูปที่ 3.13 การติดตั้ง CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสบาร์ 48
รูปที่ 3.14 การประยุกต์ใช้ CLR แทนการแบ่งแยกบัส 48
รูปที่ 3.15 ผลของค่ากระแสลัดวงจร และแรงดันที่บัส เมื่อทำการติดตั้ง CLR 49
รูปที่ 4.1 รูปแบบการกำหนดตำแหน่งการแบ่งแยกบัสเริ่มต้น 56
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเก็บค่าของ Tabu_list 56
รูปที่ 4.3 รูปแบบการเก็บค่าของสมาชิกชุดคำตอบรอบข้าง ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส . 57
รูปที่ 4.4 รูปแบบการเก็บค่าของสมาชิกชุดคำตอบที่ดีที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส .. 57
รูปที่ 4.5 รูปแบบการเก็บค่าของ Ans_list 58
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการเลือกคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 59
รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงอัลกอริธึมของการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม 60
รูปที่ 4.8 แผนผังแสดงอัลกอริธึมการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส 65
รูปที่ 4.9 รูปแบบการเก็บค่าของ Locate_list 69
รูปที่ 4.10 รูปแบบการกำหนดตำแหน่ง และขนาดการติดตั้ง CLR เริ่มต้น 69

หน้า

รูปที่ 4.11 รูปแบบการเก็บค่าของสมาชิกชุดคำตอบรอบข้าง ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR..70
รูปที่ 4.12 รูปแบบการเก็บค่าของสมาชิกชุดคำตอบที่ดีที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR..70
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างการเลือกคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR 72
รูปที่ 4.14 แผนผังแสดงอัลกอริธึมการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR..77
รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบ IEEE RTS-79..78
รูปที่ 5.2 ขนาดกระแสลัดวงจรของกรณีฐาน ซึ่งยังไม่มีการแบ่งแยกบัส 80
รูปที่ 5.3 ขนาดแรงดันที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกระแสลัดวงจรมากที่สุดในระบบ.......81
รูปที่ 5.4 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกระแสลัดวงจรมากที่สุดในระบบ 81
รูปที่ 5.5 ขนาดแรงดันที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 1 บัส.............82
รูปที่ 5.6 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 1 บัส..83
รูปที่ 5.7 ขนาดแรงดันที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 4 บัส.............84
รูปที่ 5.8 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่ง และหม้อแปลง เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 4 บัส..84
รูปที่ 5.9 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 4 บัส 85
รูปที่ 5.10 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 4 บัส 85
รูปที่ 5.11 ขนาดแรงดันที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ.........87
รูปที่ 5.12 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่ง และหม้อแปลง เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ 87
รูปที่ 5.13 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ 88
รูปที่ 5.14 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ 88
รูปที่ 5.15 ขนาดแรงดันที่บัส จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ 92

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ 5.16 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่ง และหม้อแปลง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ 92
รูปที่ 5.17 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ 93
รูปที่ 5.18 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ 93
รูปที่ 5.19 จุดการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงในเขตกรุงเทพ และปริมณฑล 98
รูปที่ 5.20 แผนภาพเส้นเดียวของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในเขตกรุงเทพ และปริมณฑล 99
รูปที่ 5.21 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงของกรณีฐาน 101
รูปที่ 5.22 ขนาดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมาก 102
รูปที่ 5.23 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมาก .. 103
รูปที่ 5.24 ขนาดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 105
รูปที่ 5.25 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลง จากการแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 105
รูปที่ 5.26 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 106
รูปที่ 5.27 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 106
รูปที่ 5.28 ขนาดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 109
รูปที่ 5.29 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 109
รูปที่ 5.30 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 110
รูปที่ 5.31 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 110
รูปที่ 5.32 การละเมิดเงื่อนไขกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการแบ่งแยกบัสตามหลักปฏิบัติของ กฟผ. โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 113
รูปที่ 5.33 การละเมิดเงื่อนไขกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 115

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ 5.34 ขนาดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 118
รูปที่ 5.35 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 118
รูปที่ 5.36 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 119
รูปที่ 5.37 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 119
รูปที่ 5.38 ขนาดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการแบ่งแยกบัสและติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 122
รูปที่ 5.39 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลง จากการแบ่งแยกบัสและติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 122
รูปที่ 5.40 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการแบ่งแยกบัสและติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 123
รูปที่ 5.41 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการแบ่งแยกบัสและติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง 123
รูปที่ ก.1 จุดการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงของเขตกรุงเทพ และปริมณฑล กับพื้นที่ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก 139
รูปที่ ก.2 แผนภาพเส้นเดียวแสดงการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงของเขตกรุงเทพ แลปริมณฑล กับพื้นที่ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก 140
รูปที่ ข.1 เปรียบเทียบผลคำนวณกำลังไฟฟ้าจริง ในกรณีไม่แบ่งแยกบัส 154
รูปที่ ข.2 เปรียบเทียบผลคำนวณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในกรณีไม่แบ่งแยกบัส 155
รูปที่ ข.3 เปรียบเทียบผลคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล ในกรณีไม่แบ่งแยกบัส 155
รูปที่ ข.4 เปรียบเทียบผลคำนวณกำลังไฟฟ้าจริง ในกรณีแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และพระนครใต้ 156
รูปที่ ข.5 เปรียบเทียบผลคำนวณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในกรณีแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และพระนครใต้ 156
รูปที่ ข.6 เปรียบเทียบผลคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล ในกรณีแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และพระนครใต้ 157

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาของบทนี้เป็นบทนำ โดยจะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตและข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ สำหรับส่วนสุดท้ายของบทนี้ จะนำเสนอเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การเติบโตของสภาพเศรษฐกิจและสังคมในปัจจุบัน ส่งผลให้ปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย จากข้อมูลของ [1] แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยฉบับล่าสุด พ.ศ. 2553 - 2573 ระบุว่า ณ ปี 2573 ความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดของทั้งประเทศมีค่าประมาณ 52,890 MW หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 2.37 เท่าของปี 2552 โดยมีอัตราการเพิ่มเฉลี่ยในปี 2553 – 2573 ประมาณร้อยละ 4.19 ต่อปี ดังนั้นการขยายระบบผลิตและส่งกำลังไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อรองรับความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน โดยเฉพาะในเขตกรุงเทพและปริมณฑล ซึ่งมีจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าอย่างหนาแน่น และมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่สูง จากข้อมูลของ [2] แผนปรับปรุงและขยายระบบจำหน่าย ฉบับที่ 10 พ.ศ. 2551 - 2554 ของการไฟฟ้านครหลวง ระบุว่าจะมีความต้องการพลังไฟฟ้าในเขตบริการของ กฟน. เพิ่มขึ้นประมาณ 1,443 MW หรือมีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 4.71 ต่อปี และมีจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 273,109 ราย หรือมีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 2.51 ต่อปี

การขยายระบบผลิตและส่งกำลังไฟฟ้า เช่น การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การเพิ่มจำนวนสายส่ง การเพิ่มจำนวนหม้อแปลง หรือการจัดรูปแบบการจ่ายไฟเป็นระบบเครือข่าย ซึ่งการขยายระบบดังกล่าวส่งผลให้ค่าความต้านทานรวมของระบบส่งไฟฟ้าลดลง เป็นเหตุให้ขนาดของกระแสลัดวงจร ณ จุดต่างๆในระบบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสร้างความเสียหายให้เกิดขึ้นอย่างมากมาย [3]

ปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริงกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ในพื้นที่เขตกรุงเทพและปริมณฑล ซึ่งมีปริมาณความต้องการไฟฟ้าหรือโหลดสูงมาก อีกทั้งเป็นโหลดที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศมากที่สุด ระบบไฟฟ้าในเขตดังกล่าวจึงมีลักษณะการเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายที่ซับซ้อน เพื่อรักษาระดับความมั่นคงและความน่าเชื่อถือให้สามารถจ่ายไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตามมาตรฐาน ซึ่งการขยายและปรับปรุงระบบส่งไฟฟ้าดังกล่าว ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงบางแห่งมีค่าสูงเกินพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน คือ เกิน 5,000

MVA หรือ 25 kA สำหรับระดับแรงดัน 115 kV และเกิน เกิน 20,000 MVA หรือ 50 kA สำหรับระดับแรงดัน 230 kV และ 500 kV [2] ซึ่งสร้างความเสียหายแก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ณ สถานีไฟฟ้านั้นๆ

เนื่องจากการเปลี่ยนเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้มีพิกัดของกระแสลัดวงจรที่สูงขึ้น อาจไม่ใช่วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม เนื่องจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีพิกัดกระแสลัดวงจรสูง นั้นมีผู้ผลิตและจำหน่ายไม่กี่ราย ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับเหตุผลในด้านการจัดซื้อและการสำรองอุปกรณ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการลดค่ากระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้น โดยที่ระบบยังสามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการได้ ซึ่งวิธีแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงในระบบไฟฟ้ามีอยู่หลายวิธี เช่น การใช้ High Impedance Transformers [4] หรือ Current Limiting Reactors (CLR) [3,5] ซึ่งมีข้อด้อยในเรื่องของแรงดันตกคร่อมและกำลังสูญเสียในสภาวะการทำงานปกติ การใช้ Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) [6-8] หรือ Solid-State Fault Current Limiter (SSFCL) [9] สามารถลดกระแสลัดวงจรได้ดีและมีผลกระทบกับระบบในสภาวะปกติน้อย แต่ยังไม่เป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่อยู่ในระหว่างการพัฒนา และมีข้อจำกัดในเรื่องของระดับแรงดันและราคาค่อนข้างสูง การใช้สายส่งแบบ High Voltage Direct Current (HVDC) [5,10] ต้องประยุกต์ใช้ในสายส่งที่มีระยะทางยาวเนื่องจากเป็นการแก้ปัญหาที่ใช้เงินลงทุนที่สูง จึงมีข้อจำกัดในเรื่องระยะทางความคุ้มทุน สำหรับวิธีการแบ่งแยกบัส (Bus splitting) มีการนำไปศึกษาการใช้งานในประเทศคูเวต [10] และเกาหลีใต้ [11] ซึ่งได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาได้จริงโดยใช้ระยะเวลาไม่นาน และมีราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ [4,9] ทั้งนี้ กฟผ. ได้มีการนำวิธีการแบ่งแยกบัสไปใช้แก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้น โดยมีแผนการที่จะทำการแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และสถานีไฟฟ้าพระนครใต้ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีกำลังการผลิตมากที่สุดในพื้นที่ที่เกิดปัญหา โดยตำแหน่งดังกล่าวอาจยังไม่ใช่ตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแก้ปัญหา

อย่างไรก็ตาม ควรนำการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส การส่งผ่านกำลัง สภาวะความมั่นคง ความน่าเชื่อถือ ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยกบัส [9,12-13] มาร่วมพิจารณาหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม ซึ่งถือเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบไม่เชิงเส้นที่มีความซับซ้อน จึงต้องประยุกต์ใช้การค้นหาคำตอบแบบ Heuristic Search (HS) [14-15]ช่วยในการแก้ไขปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด

วิธีค้นหาคำตอบโดยใช้พื้นฐาน HS ที่กำลังเป็นที่นิยมในการใช้แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด เช่น วิธีค้นหาคำตอบแบบตาบูชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Tabu Search) [15-17], วิธีหาคำตอบเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) [18-19] หรืออัลกอริทึมการอบอ่อนจำแลง

(Simulated annealing) [20-21] ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบจุดเด่นของวิธีค้นหาคำตอบแบบตาบูชนิดปรับตัวได้กับวิธีอื่นๆ [22-24] พบว่าใช้เวลาค้นหาคำตอบน้อยกว่า และนำไปประยุกต์ใช้งานได้สะดวกกว่า สามารถไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global optimum) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามยังมีข้อด้อยเมื่อนำไปใช้แก้รูปแบบปัญหาที่มีการรบกวนสูง

ด้วยเหตุนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการกำหนดตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง โดยพิจารณาเงื่อนไขจำกัดของระบบ ได้แก่ พิกัดกระแสลัดวงจร พิกัดแรงดันบัส พิกัดสายส่ง การแยกตัวจากกันของระบบ และความมั่นคงของระบบ โดยใช้วิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้มาช่วยในการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่น้อยที่สุดซึ่งแปรผันตรงกับเงินลงทุนที่จะใช้ในการแก้ปัญหา นอกจากนี้ยังพิจารณาการหาตำแหน่ง และจำนวนการแบ่งแยกบัส ร่วมกับการติดตั้ง CLR ในขนาดที่น้อยที่สุด เพื่อความยืดหยุ่นในการพิจารณาเงื่อนไขบังคับ สำหรับการหาคำตอบที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

นำเสนอกระบวนการกำหนดตำแหน่งและจำนวนบัสที่น้อยที่สุดที่จะทำการแบ่งแยกในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อลดขนาดกระแสลัดวงจรสูงที่เกินขีดจำกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยที่ไม่มีการละเมิดสภาวะการทำงานต่างๆ ของระบบ

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาระบบส่งไฟฟ้ากำลังในสภาวะอยู่ตัว (Steady-State)
2. พิจารณาเงื่อนไขการทำงานของระบบ เช่น พิกัดของกระแสลัดวงจร พิกัดของแรงดันที่บัส พิกัดของสายส่ง พิกัดของหม้อแปลง และพิกัดการจ่ายกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. ไม่ยอมรับให้มีการแยกตัวของระบบเกิดขึ้น เนื่องจากการแบ่งแยกบัส
4. พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง n-1 ของระบบ (Contingency) แต่ไม่นำเงื่อนไขความน่าเชื่อถือ (Reliability) มาพิจารณาหาตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม
5. พิจารณาเฉพาะการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล โดยพิจารณากระแสในช่วง Sub transient
6. ใช้วิธีการค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้ ในการหาตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม
7. พิจารณาเสถียรภาพแรงดันในสภาวะอยู่ตัว โดยใช้ดัชนี PQVSI และ วิธี Modal analysis
8. ทดสอบสมรรถนะของวิธีการแบ่งแยกบัสกับระบบทดสอบ RBTS 24 bus และระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริง ในเขตกรุงเทพและปริมณฑล ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาปัญหาและผลกระทบของกระแสลัดวงจรสูงในระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มีต่ออุปกรณ์ป้องกัน
2. ศึกษาวิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มีการนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจริง
3. ศึกษาวิธีการแบ่งแยกบัสเพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า และผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยกบัส
4. ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ความมั่นคง และเสถียรภาพทางแรงดันในสภาวะอยู่ตัว ของระบบส่งกำลังไฟฟ้า
5. ศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้วิธีค้นหาคำตอบแบบตาบูชนิดปรับตัวได้ ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด
6. พัฒนากระบวนการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้วิธีค้นหาคำตอบแบบตาบูชนิดปรับตัวได้ ตามวิธีการที่ได้ออกแบบไว้ โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB
7. พัฒนากระบวนการหาตำแหน่งและขนาดในการติดตั้ง CLR ที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้วิธีค้นหาคำตอบแบบตาบูชนิดปรับตัวได้ ตามวิธีการที่ได้ออกแบบไว้ โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB
8. ทดสอบสมรรถนะของโปรแกรมการแบ่งแยกบัสที่ออกแบบไว้กับระบบทดสอบมาตรฐานและระบบจริง
9. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ
10. ปรับปรุงโปรแกรมและกระบวนการแบ่งแยกบัสที่ออกแบบไว้ เพื่อให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น
11. สรุปผลการวิจัย
12. เรียบเรียงผลการวิจัยและจัดทำเป็นรูปเล่มวิทยานิพนธ์
13. เขียนบทความวิชาการเพื่อเผยแพร่วิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดต้นทุนในการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนเซอร์กิตเบรกเกอร์ใหม่ให้มีพิกัดที่สูงขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ยืดระยะเวลาการเกิดปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในพื้นที่เขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล เนื่องจากการขยายระบบผลิตและส่งกำลังไฟฟ้า และความต้องการของโหลดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยแต่ละบทมีเนื้อหาดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึง ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งในเรื่องของกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง วิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลังที่นิยมใช้ในปัจจุบัน วิธีการลดกระแสลัดวงจรที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตนำมาประยุกต์ใช้ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และรวมถึงกระบวนการในการหาค่าที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้การค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึก โดยวิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้

บทที่ 3 อธิบายถึงวิธีการแบ่งแยกบัสที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยกบัส และวิธีการติดตั้ง Current Limiting Reactor (CLR) แทนการแบ่งแยกบัสแบบถาวร และนำเสนอการพิจารณาเสถียรภาพทางแรงดันของระบบในสภาวะอยู่ตัว รวมไปถึงชี้ให้เห็นถึงปัญหาของการหาตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม

บทที่ 4 กล่าวถึงการกำหนดตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม เพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง โดยนำเสนอรูปแบบของปัญหา และกระบวนในการแก้ปัญหา สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวรเพียงอย่างเดียว และกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวร ร่วมกับการติดตั้ง CLR

บทที่ 5 นำเสนอการทดสอบสมรรถนะของกระบวนการแบ่งแยกบัสที่นำเสนอ

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปของวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งในเรื่องของกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง วิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลังที่นิยมใช้ในปัจจุบัน และวิธีการลดกระแสลัดวงจรที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตนำมาประยุกต์ใช้จริงในทางปฏิบัติ โดยยังได้นำเสนองานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และในส่วนท้ายได้แนะนำกระบวนการในการหาค่าที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้การค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึก โดยวิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้

2.1 กระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง

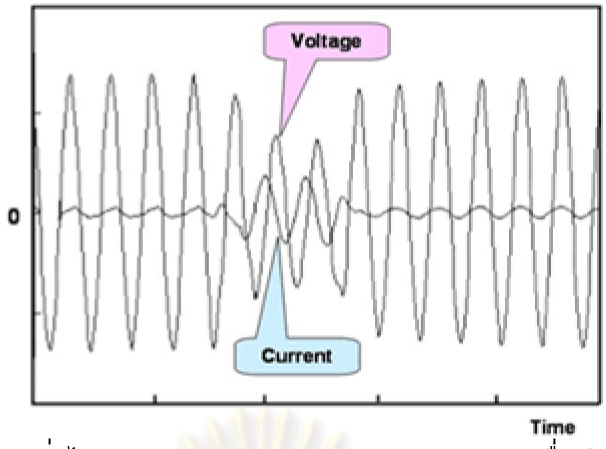
ในหัวข้อนี้จะแนะนำให้ทราบถึงความสำคัญของการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า [25-26] รวมถึงวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ความหมายและประเภทของฟอลต์ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า วิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 ความหมายและประเภทของฟอลต์ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

โดยปกติระบบไฟฟ้ากำลังจะจ่ายกระแสไฟฟ้า 3 เฟสอย่างสมดุลกัน ความหมายของฟอลต์ (Fault) ในระบบไฟฟ้าคือ ความบกพร่องหรือล้มเหลว (Failure) ที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ตามปกติ การวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้าก็คือ การพิจารณาเหตุการณ์ที่เกิดสภาวะการลัดวงจรไฟฟ้า (Short circuit condition) หรือเหตุการณ์ที่เกิดการเปิดวงจรไฟฟ้าเนื่องจากอุบัติเหตุที่ทำให้สายไฟฟ้าขาด

ลำดับ เหตุการณ์ของการเกิดไฟฟ้าลัดวงจร มักจะเริ่มจาก ฉนวนไฟฟ้าเกิดความเสียหาย จากนั้นจะเกิดการอาร์คจนทำให้ตัวนำไฟฟ้าหลอมละลาย และสุดท้ายอาจจะทำให้เกิดไฟไหม้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ Voltage & Current Waveforms เมื่อเกิดการลัดวงจรไฟฟ้า

เมื่อมีการลัดวงจรไฟฟ้าเกิดขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในเฟสที่เกิดฟอลต์มักจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไป อย่างมาก ตามลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าของเฟสที่เกิดฟอลต์ มักจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงอย่างมาก ขณะที่แรงดันไฟฟ้าในเฟสอื่น ๆ ที่เป็นปกติดีอาจจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่าเดิม หรืออาจจะมีค่ามากขึ้น ในกรณีที่เป็นระบบไฟฟ้าที่มีวิธีการต่อลงดินแบบ Unground หรือ High-impedance ground

ซึ่งผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะทำให้เกิดความไม่สมดุลกันของค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (Unbalance currents and voltages) ในระบบไฟฟ้าสามเฟส ยกเว้นกรณีที่เกิดฟอลต์พร้อมกันทั้งสามเฟสในจุดเดียวกัน ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1) ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical faults) จะเป็นการลัดวงจรแบบ 3 เฟสพร้อมกัน หรือการเกิดฟอลต์พร้อมกันทั้งสามเฟสในจุดเดียวกัน ซึ่งก็คือฟอลต์ชนิด 3 เฟสสมดุล

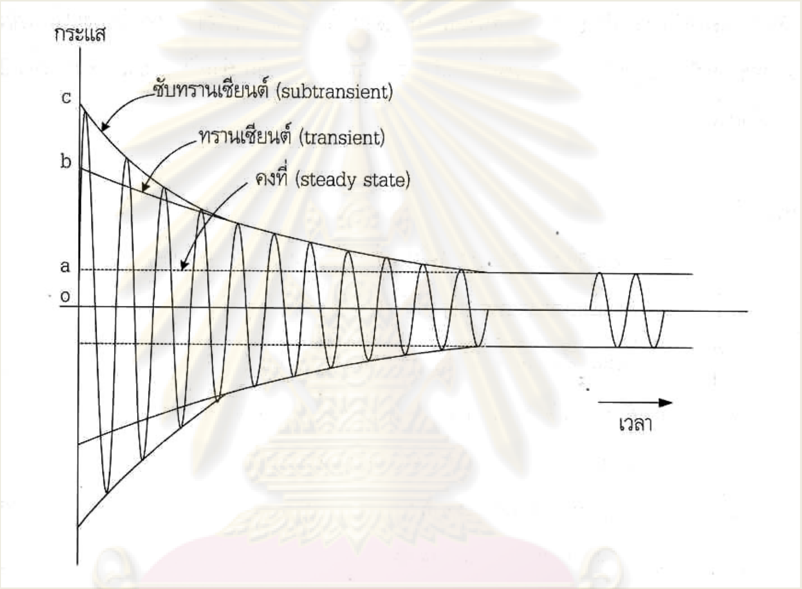
2) ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical faults) จะเป็นฟอลต์ที่เกิดขึ้นแล้วทำให้ขนาดมุมของกระแสหรือแรงดันต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา แบ่งเป็น 1) ฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (Single line to ground faults) 2) ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (Double line to ground faults) 3) ฟอลต์ 2 เฟส (Double line faults)

โดยฟอลต์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในระบบจะเป็นฟอลต์แบบไม่สมมาตร แบบฟอลต์เฟสเดียวลงดิน เนื่องจากการลัดวงจรไฟฟ้าอย่างรุนแรงอาจจะทำให้สายไฟฟ้าขาด หรือการเกิดอุบัติเหตุที่ทำให้สายไฟฟ้าขาดและตกลงมาพาดที่พื้นดิน ซึ่งเหตุการณ์ในลักษณะนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเหตุการณ์อื่นๆ อย่างไรก็ตาม ฟอลต์แบบสมมาตรแม้ว่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นน้อย แต่เมื่อเกิดแล้วจะมีความรุนแรงของปัญหาสูงที่สุด ดังนั้นในการพิจารณาผลกระทบของกระแสลัดวงจรที่มีค่าสูงเกินพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันในระบบส่งกำลังไฟฟ้า จะพิจารณากระแสลัดวงจรที่เกิดจากฟอลต์ชนิด 3 เฟสสมดุล

2.1.2 การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง

การวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้า มีจุดประสงค์เพื่อหาข้อมูลของกระแสลัดวงจร สำหรับเลือกพิกัดของอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ที่เหมาะสม และกำหนดค่า Setting ให้กับรีเลย์ป้องกัน และใช้ในการวางแผนขั้นตอนการทำงานของระบบไฟฟ้า

การพิจารณากระแสลัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นว่ากระแสทั้ง 3 เฟสมีค่าสูงขึ้นอย่างมากในช่วงไซเคิลแรก ค่ากระแสที่สูงกว่าค่าปกติเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า กระแสทรานเซียนต์ และจะลดลงอย่างรวดเร็วใน 2-3 ไซเคิลถัดมา อัตราการลดลงจะช้าลงจนประมาณไซเคิลที่ 5 เป็นต้นไปก็จะหาย กระแสจะเป็นปกติคงที่ (Steady state)



รูปที่ 2.2 ค่ากระแสเทียบกับเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ที่เกิดลัดวงจรขณะไม่มีโหลด

จากรูปที่ 2.2 แสดงรูปคลื่นกระแสลัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สมมุติเวลาเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะไม่มีค่าประกอบของกระแสตรง (D.C.component) ในเครื่องจักรซิงโครนัสค่าฟลักซ์ที่ตกคร่อมช่องว่างอากาศ (Air gap) จะมีค่ามากในช่วงที่เกิดการลัดวงจร การลดลงของฟลักซ์เป็นสาเหตุจากค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของกระแสในอาร์เมเจอร์ หรืออาร์เมเจอร์รีแอกชัน (Armature reaction) ซึ่งรูปคลื่นกระแสลัดวงจรจะมีส่วนสำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ

1) ช่วง oc เป็นช่วงที่มีความชันมากที่สุด เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงซับทรานเซียนต์ (Subtransient state)

2) ช่วง ob เป็นช่วงที่มีความชันน้อยกว่าเส้น oc เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงทรานเซียนต์ (Transient state)

3) ช่วง oa เป็นช่วงที่มีความชัน เท่ากับศูนย์ เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงคงที่ (Steady state)

สำหรับการเกิดกระแสช่วงของซับทรานเซียนต์ ทรานเซียนต์ และช่วงคงที่ มีสาเหตุเนื่องมาจากผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชันในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทั้งนี้ในการศึกษาเกี่ยวกับฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เราจะพิจารณากระแสที่เกิดขึ้นทันทีหลังจากมีฟอลต์ที่ไม่ใช่ค่ากระแสคงที่

ค่ารีแอกแตนซ์ที่ใช้คำนวณหากระแสจะแสดงในรูปรีแอกแตนซ์แนวในแกนขั้วแม่เหล็ก (Direct-axis reactance) โดยค่าความต้านทาน ขณะเกิดฟอลต์จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (Inductive reactance) ซึ่งจะคิดเฉพาะค่าอินดักทีฟขณะเกิดการลัดวงจรของเครื่องจักรซิงโครนัส โดยค่ารีแอกแตนซ์ในแต่ละช่วงจะมีชื่อเรียกและค่าที่ต่างกันไปดังนี้

1) ช่วง oc ค่ารีแอกแตนซ์ช่วงนี้จะเรียกว่า ซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์แนวแกนขั้วแม่เหล็ก (Subtransient direct axis reactance) หรือ $X_d^{''}$

2) ช่วง ob ค่ารีแอกแตนซ์ช่วงนี้จะเรียกว่า ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์แนวแกนขั้วแม่เหล็ก (Transient direct axis reactance) หรือ $X_d^{'}$

3) ช่วง oa ค่ารีแอกแตนซ์ช่วงนี้จะเรียกว่า รีแอกแตนซ์แนวแกนขั้วแม่เหล็ก (Direct axis reactance) หรือ X_d

ค่ากระแสลัดวงจรสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเช่นกัน โดยในการนำไปใช้เลือกอุปกรณ์ป้องกันจะพิจารณากระแสในช่วงซับทรานเซียนต์ ซึ่งมีขนาดของกระแสลัดวงจรสูงที่สุดโดยช่วงที่เซอร์กิตเบรกเกอร์หรือฟิวส์เปิดวงจร จะเป็นเวลาที่เกิดการลัดวงจรไปแล้วประมาณ 2-3 ไซเคิล

2.1.3 การคำนวณกระแสลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

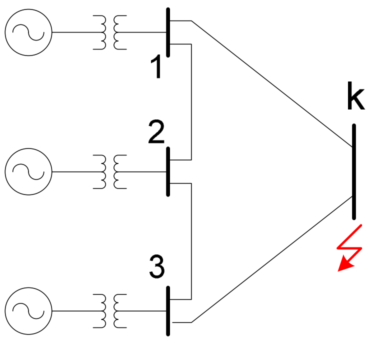
การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ จำเป็นต้องมีวิธีการที่เหมาะสมเนื่องจากในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ๆ เป็นการยากที่จะเขียนไดอะแกรมเส้นเดี่ยว การแก้ปัญหาดังกล่าวยังใช้หลักการของเทวินินในการคำนวณ เพียงแต่ต้องจัดรูปของระบบให้อยู่ในรูปแบบที่จะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณได้ คือ จัดให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งอาจจะเป็น Y_{bus} ,Z_{bus} ,Z_{loop} ,Y_{loop} ,Z_{branch} ,Y_{branch} แต่เมทริกซ์ที่นิยมใช้กันมาก และสะดวกมากที่สุดในการคำนวณกระแสลัดวงจร ได้แก่ Z_{bus} ซึ่งการคำนวณ Z_{bus} นิยมแปลงมาจากการอินเวอร์ส Y_{bus} นั่นเอง

ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่บัสเป็นไปตามสมการที่ 2.1

$$V_{bus} = Z_{bus} \bullet I_{bus} \tag{2.1}$$

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส

I_{bus} คือ กระแสจากแหล่งจ่ายเข้าที่บัส ซึ่งบัสใดไม่มีแหล่งจ่าย บัสนั้นมี I เท่ากับ 0



รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้า k บัส

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ V_{pre,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{1k} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{2k} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{3k} \\ Z_{k1} & Z_{k2} & Z_{k3} & Z_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I''_f \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

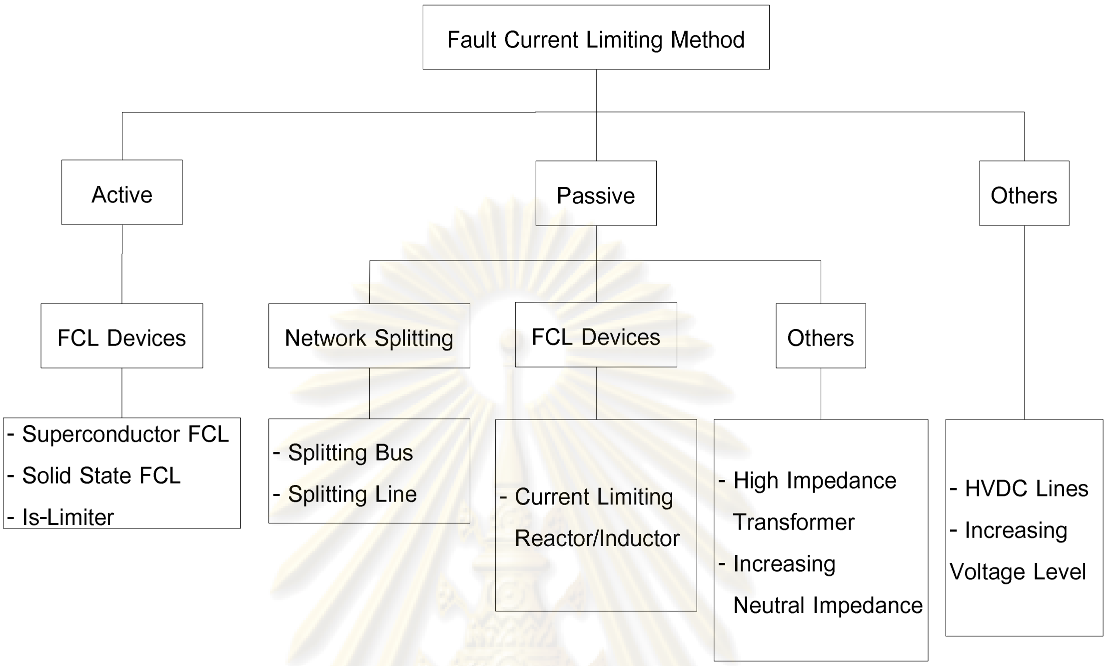
$$I_f = \frac{V_{pre,k}}{Z_{kk}} \tag{2.3}$$

จากรูปที่ 2.3 ถ้าเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุลที่บัส k จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่บัสดังสมการที่ 2.2 และเมื่อสมมุติให้ค่าแรงดันก่อนเกิดฟอลต์ที่บัส k มีค่าเท่ากับ $V_{pre,k}$ นั่นคือเราจะได้สมการทั่วไปในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่บัส k และไม่คิดกระแสก่อนเกิดฟอลต์ ดังสมการที่ 2.3

2.2 วิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง

เมื่อเกิดปัญหาขนาดของกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้าสูงเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ขึ้น การแก้ปัญหาด้วยวิธีการเปลี่ยนเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้มีพิกัดของกระแสลัดวงจรสูงขึ้นอาจไม่ใช่วิธีการที่เหมาะสม เนื่องจากการเพิ่มขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับการไฟฟ้านั้น ในทางปฏิบัติค่อนข้างจะทำได้ยาก เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ของผู้ใช้ไฟที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ที่เชื่อมต่อกับการไฟฟ้าทั่วประเทศ ทำให้เกิดผลกระทบแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าในวงกว้าง และ ต้องมีการลงทุนค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีลดค่ากระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้น โดยที่ระบบยังสามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการได้

วิธีลดค่ากระแสลัดวงจรสูงในระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี สามารถแบ่งแยกตามลักษณะของค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการทำงานของระบบ [3-5] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้



รูปที่ 2.4 วิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

2.2.1 **วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟ**

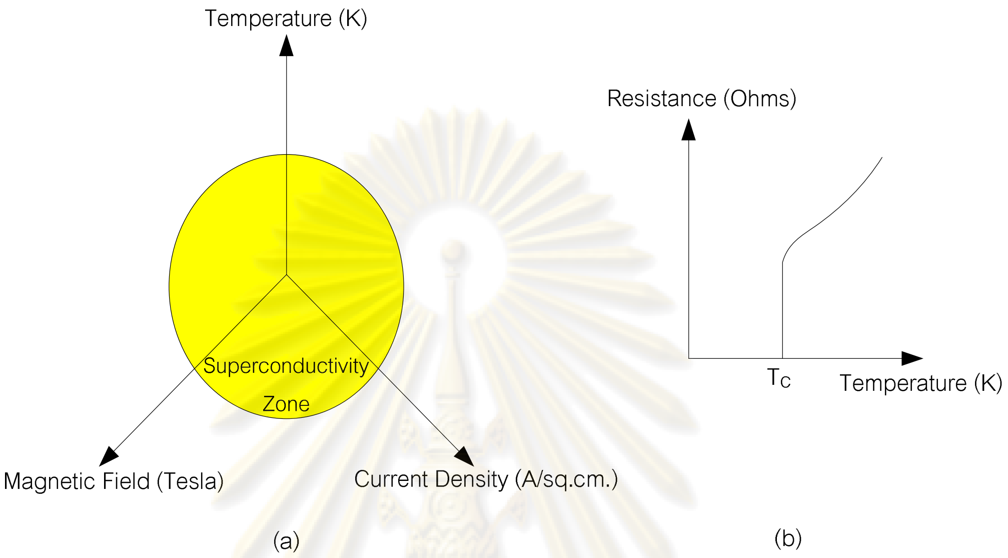
วิธีการแบบแอคทีฟที่มีการประยุกต์ใช้ลดกระแสลัดวงจรในปัจจุบัน จะมีลักษณะเป็นการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ในการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ จะมีคุณสมบัติพิเศษ คือ ในสภาวะที่ระบบทำงานปกติ (Normal condition) อุปกรณ์จะมีค่าอิมพีแดนซ์น้อยมากจนไม่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ ส่วนในสภาวะที่ระบบเกิดลัดวงจร (Fault condition) อุปกรณ์จะเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์อย่างรวดเร็วเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นให้มีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงานของระบบ ทำให้ไม่ส่งผลกระทบกับการทำงานของระบบในสภาวะปกติ ซึ่งเป็นจุดเด่นของวิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟ

วิธีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีดังนี้

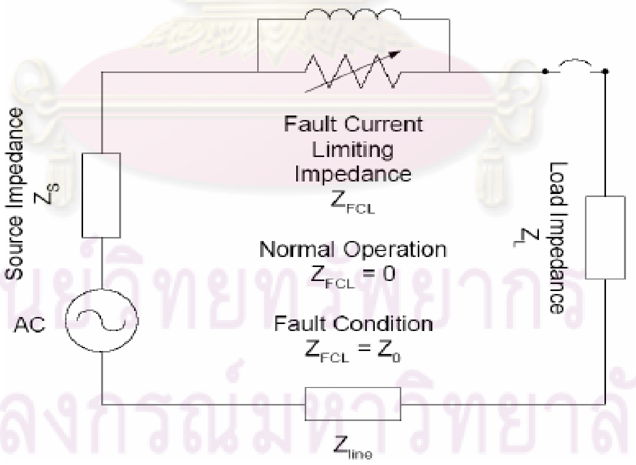
2.2.1.1 **การประยุกต์ใช้** Superconductor Fault Current Limiter [6-8]

Superconductor Fault Current Limiter (SCFCL) เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่อาศัยหลักการทำงานของวัสดุตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าโดยปราศจากความต้านทาน ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิค่าหนึ่งที่เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) รวมถึงปัจจัยของปริมาณกระแส และสนามแม่เหล็ก ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่า

ค่ากระแสวิกฤต (Critical current level) และค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical field) โดยถ้าอุปกรณ์มีค่าใดค่าหนึ่งเกินค่าวิกฤต จะทำให้อุปกรณ์เกิดการเปลี่ยนสภาวะ (Quenching) จากสภาวะตัวนำยิ่งยวด (Superconductor state) เป็นสภาวะความต้านทาน (Resistive state) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติของวัสดุตัวนำยิ่งยวด [7]



รูปที่ 2.6 การประยุกต์ใช้ Superconductor fault current limiter [6]

หลักการลดกระแสลัดวงจรของวิธีการนี้ จะอาศัยคุณสมบัติพิเศษของวัสดุตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) ซึ่งแสดงการประยุกต์ใช้งานได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบด้วยวัสดุตัวนำยิ่งยวดเชื่อมต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) โดยในสภาวะการทำงานปกติ (Normal condition) ค่ากระแสซึ่งไม่เกินค่าวิกฤต จะไหลผ่านวัสดุตัวนำยิ่งยวด ซึ่งอุปกรณ์จะไม่ปรากฏค่าอิมพีแดนซ์ที่ส่งผลต่อระบบ เนื่องจากอุปกรณ์อยู่ในสภาวะตัวนำยิ่งยวด แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(Fault condition) ทำให้กระแสลัดวงจรมีค่าเกินค่ากระแสวิกฤต ซึ่งส่งผลให้สภาวะของวัสดุตัวนำยิ่งยวดเปลี่ยนเป็นสภาวะความต้านทาน (Z_0) จึงทำให้ค่ากระแสลัดวงจรไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่จำกัดกระแสลัดวงจร ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง โดยวิธีการประยุกต์ใช้ SCFCL มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

<u>ข้อดี</u>

1) อุปกรณ์ไม่ปรากฏค่าอิมพีแดนซ์ในระบบ เมื่อระบบอยู่ในช่วงสภาวะทำงานปกติ จึงไม่มีผลต่อการ

ทำงานของระบบไฟฟ้า

2) ช่วงอุณหภูมิการทำงานมีความยืดหยุ่นสูง

3) มีประสิทธิภาพในการลดกระแสลัดวงจรได้ดี

<u>ข้อเสีย</u>

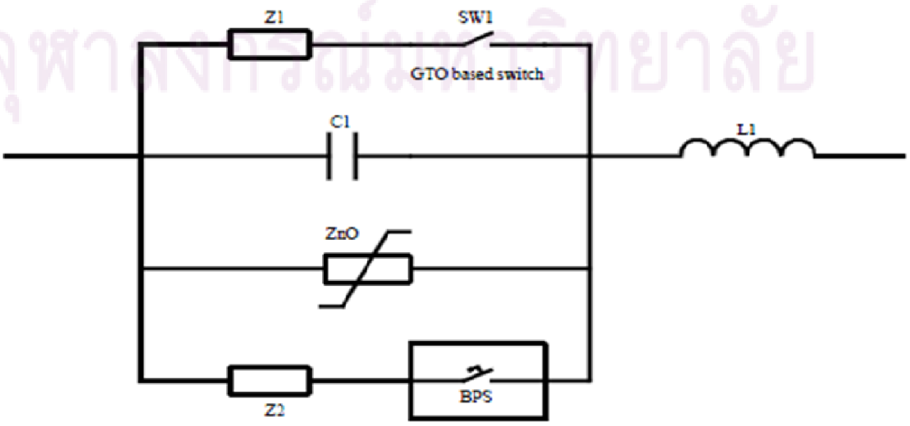
1) ปัจจุบันระดับแรงดันในช่วงทำงานสูงสุด เท่ากับ 145 kV จึงทำให้ไม่สามารถใช้ในระดับแรงดัน 230 kV หรือมากกว่านั้นได้

2) มีการนำมาใช้ไม่แพร่หลาย เนื่องจากอยู่ในช่วงวิจัยและพัฒนา

3) มีราคาสูงเนื่องจากทำมาจากวัสดุประเภท Superconductor จึงอาจไม่คุ้มกับการลงทุน

2.2.1.2 **การประยุกต์ใช้** Solid-State Fault Current Limiter [9]

Solid-State Fault Current Limiter (SSFCL) เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่มีโครงสร้างโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่จำกัดกระแสและแรงดัน และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วย Solid-state switch เช่น GTO (Gate Turn-off) หรือ Thyristors ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานของสวิทซ์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ ซึ่งรายละเอียดโครงสร้างของ Solid-State Fault Current Limiter แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Solid-State Fault Current Limiter [9]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนประกอบหลักของ Solid-State Fault Current Limiter ประกอบไปด้วย คาร์ปาซิเตอร์ (C1) และ รีแอคเตอร์ (L1) ซึ่งทำหน้าที่จำกัดกระแสลัดวงจร และ GTO หรือ Fast-closing switch (SW1) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจร โดยในช่วงสภาวะการทำงานปกติ กระแสจะไหลผ่าน C1 และ L1 ซึ่งเปรียบเสมือนไหลผ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่น้อยมาก เนื่องจากผลของ C1 และ L1 หักล้างกัน ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อระบบในสภาวะการทำงานปกติ ส่วนในสภาวะที่เกิดการลัดวงจร กลไกการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์จะทำงานอย่างรวดเร็วโดย SW1 จะทำการปิดวงจรภายใน 3 ms ซึ่งจะตัดผล (Bypasses) ของ C1 ออกไป ทำให้กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นไหลผ่าน Z1 และ L1 จึงทำให้กระแสลัดวงจรมีค่าลดลง

นอกจากนี้ Solid-State Fault Current Limiter ยังสามารถลดค่ากระแสไหลพุ่ง (Inrush current) ที่ไหลผ่าน SW1 ได้ จากการที่กระแสไหลผ่าน Z1 และยังสามารถป้องกันการเกิดแรงดันเกินขึ้นได้ จากการที่มีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน หรือ ZnO (Zinc-Oxide Arrester) ที่เชื่อมต่อแบบขนานกัน สำหรับการทำงานของ BPS จะมีหน้าที่สำรองการทำงานของ SW1 โดยจะทำการ Close switch ต่อเมื่อ SW1 ไม่ทำงาน ซึ่งมี Z2 ทำหน้าที่ลดค่ากระแสไหลพุ่งเช่นเดียวกับ Z1

วิธีการลดกระแสลัดวงจร โดยประยุกต์ใช้ Solid-State Fault Current Limiter มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

<u>ข้อดี</u>

1) อุปกรณ์ไม่ปรากฏค่าอิมพีแดนซ์ในระบบ เมื่อระบบอยู่ในช่วงสภาวะทำงานปกติ
2) มีประสิทธิภาพในการลดกระแสลัดวงจรได้ดี
3) ทำให้คุณภาพไฟฟ้ากำลังดีขึ้น จากการช่วยลดขนาดของกระแสไหลพุ่ง (Inrush current) ที่เกิดจาก การสับต่อหม้อแปลงเข้าไปในระบบ

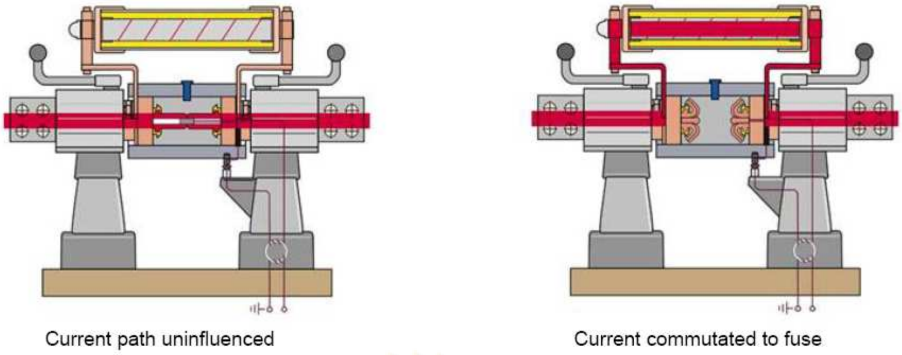
<u>ข้อเสีย</u>

1) ราคาสูงมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ
2) มีความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์
3) มีการนำมาใช้ไม่แพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเชื่อถือได้ในการแก้ปัญหาต่ำ

2.2.1.3 **การประยุกต์ใช้** Is-Limiter [3-4]

Is-Limiter เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่มีกลไกการจำกัดกระแสลัดวงจรถูกพัฒนาและผลิตขึ้นโดยบริษัท ABB ซึ่งแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



a) b)

รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของ Is-Limiter [1-2]

Is-Limiter ประกอบด้วยตัวนำ 2 ชนิดขนานกัน จะเห็นว่าในสภาวะการทำงานปกติดังรูปที่ 2.8 a) กระแสจะไหลผ่านอุปกรณ์ โดยผ่านตัวนำหลักซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมาก ทำให้มีผลกระทบต่อระบบน้อยมาก ส่วนในสภาวะที่เกิดการลัดวงจรดังรูปที่ 2.8 b) กลไกการทริปของอุปกรณ์จะทำงาน ทำให้กระแสไหลผ่านตัวนำที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งส่งผลให้กระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านอุปกรณ์มีค่าลดลง ซึ่งวิธีการประยุกต์ใช้ Is-limiter มีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

<u>ข้อดี</u>

1) เป็นวิธีที่ใช้เงินลงทุนไม่สูงมาก
2) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีความเชื่อถือได้สูง

<u>ข้อเสีย</u>

1) ระดับแรงดันการใช้งานไม่สูง จึงมักประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่าย

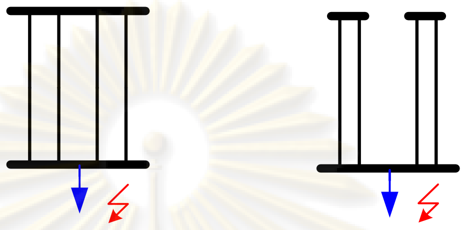
2.2.2 วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการแบบพาสซีฟมีคุณสมบัติ คือ จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเปลี่ยนแปลงไปทั้งในสภาวะที่ระบบทำงานปกติ และสภาวะที่ระบบเกิดลัดวงจร โดยค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจะเพิ่มขึ้นเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นให้มีค่าลดลง ซึ่งจะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงานของระบบ ทำให้ส่งผลกระทบกับการทำงานของระบบในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาการทำงานของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรอบคอบก่อนนำมาใช้งาน ซึ่งวิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบพาสซีฟที่มีการนำมาใช้ในปัจจุบัน มี ดังนี้

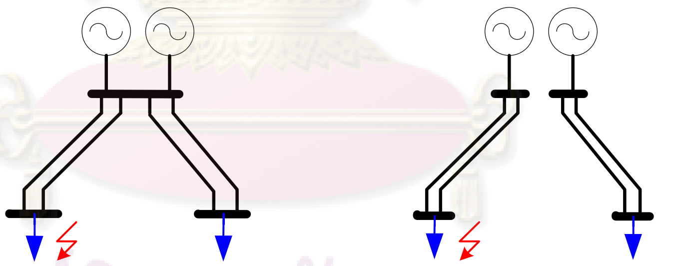
2.2.2.1 **การแบ่งแยกบัส** [4,9]

การปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าโดยวิธีการแบ่งแยกบัสในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเป็นหนึ่งในวิธีการลดกระแสลัดวงจร โดยเทคนิคการลดกระแสลัดวงจรที่สำคัญ คือ การเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบ [3] ซึ่งการแบ่งแยกบัสสามารถเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบได้ โดยลดการเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าลง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์บริเวณจุดที่เกิดการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังจากการแบ่งแยกบัส แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.9



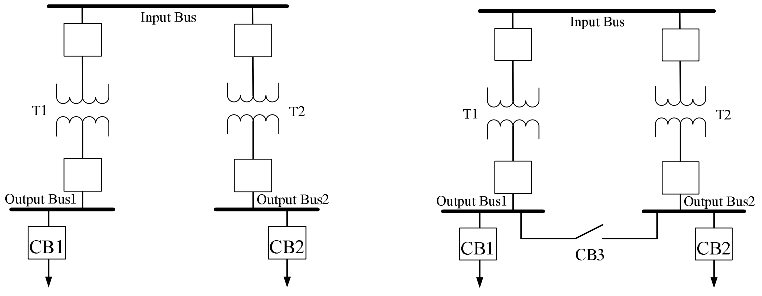
รูปที่ 2.9 การเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งที่ลดลง ภายหลังจากแบ่งแยกบัส

นอกจากนี้การแบ่งแยกบัส ยังทำให้บัสที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสลัดวงจรมีความสามารถในการจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง เนื่องจากจำนวนของแหล่งจ่ายที่ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดการลัดวงจรลดลง แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 จำนวนของแหล่งจ่ายที่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร ณ จุดที่เกิดลัดวงจร ทั้งก่อนและหลังแบ่งแยกบัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 การแบ่งแยกบัสแบบถาวร และไม่ถาวร

การแบ่งแยกบัสจะกระทำที่บัสภายในสถานีไฟฟ้า โดยทั่วไปการแยกบัสจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การแบ่งแยกบัสแบบถาวร และไม่ถาวร ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยการแบ่งแยกบัสแบบไม่ถาวรจะมี Tie circuit breaker ไว้ทำการเชื่อมต่อบัสในกรณีฉุกเฉิน ซึ่งข้อดีและข้อเสียของวิธีการลดกระแสลัดวงจรโดยวิธีแบ่งแยกบัสมีดังนี้

ข้อดี

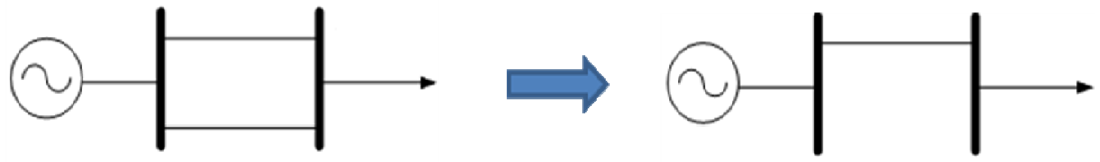
1) ลดความรุนแรงของกระแสลัดวงจร โดยแบ่งแยกแหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร
2) ไม่ต้องนำอุปกรณ์จำกัดกระแสมาเชื่อมต่อส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบ
3) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีความเชื่อถือได้สูง
4) เป็นวิธีที่สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในปัจจุบัน โดยใช้เวลาดำเนินการไม่มาก
5) ค่าใช้จ่ายต่ำมากเมื่อเทียบกับการแก้ปัญหาด้วยการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรต่างๆ

ข้อเสีย

1) ต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่แบ่งแยก (Bus transfer equipment)
2) เมื่อบัสที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายหลักให้โหลดจุดหนึ่งในระบบถูกแบ่งแยก จะทำให้ความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลดนั้นลดลง จึงต้องทำการศึกษาผลกระทบในส่วนของโหลดอย่างรอบคอบ
3) ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง ในกรณีที่ต้องทำการเปลี่ยนชุดบัสบาร์ใหม่ หากชุดบัสบาร์เดิมไม่สามารถทำการแบ่งแยกได้

2.2.2.2 การปลดวงจรสายส่ง

วิธีการลดกระแสลัดวงจรโดยการปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าด้วยการปลดวงจรสายส่งในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะสั้น และในสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดการเชื่อมต่อขนานของสายส่งในระบบดังรูปที่ 2.12 ซึ่งส่งผลทำให้ระบบมีอิมพีแดนซ์โดยรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจร ณ จุดต่างๆ ในระบบลดลง



รูปที่ 2.12 การปลดวงจรสายส่ง

วิธีการปลดวงจรสายส่ง เพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

1) แทบไม่มีความจำเป็นในการใช้เงินลงทุน
2) ดำเนินการแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย
3) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีความเชื่อถือได้สูง

ข้อเสีย

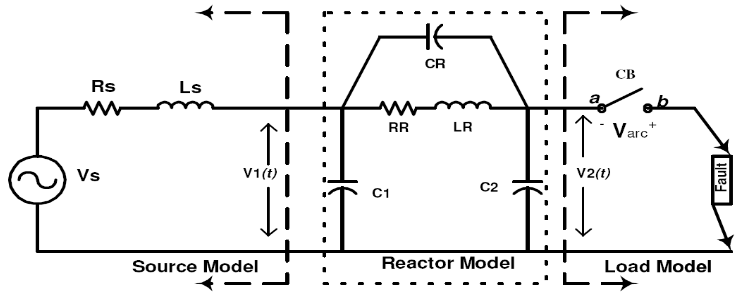
1) วงจรสายส่งที่ปลดเปรียบเสมือนการหายไปของวงจรสายส่ง จึงต้องทำการศึกษาผลกระทบต่อการ ทำงานของระบบอย่างรอบคอบ
2) ความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลง

2.2.2.3 การประยุกต์ใช้ Current Limiting Reactor [27-28]

Current Limiting Reactor (CLR) เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความต้านทานโดยรวมสูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะการต่อแบบอนุกรมเข้าไปภายในระบบไฟฟ้า การใช้งานของ CLR สามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบแล้วแต่จุดประสงค์ของผู้ใช้งาน เช่น ใช้เพื่อป้องกันกระแสลัดวงจรลงดิน หรือป้องกันกระแสลัดวงจรระหว่างเฟส นอกจากนี้ CLR ที่ใช้งานมีหลายประเภท ดังนี้

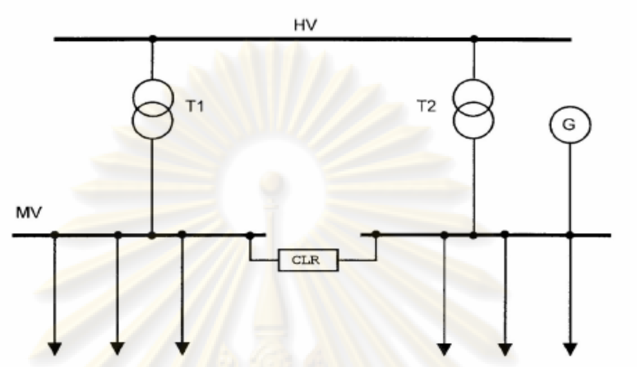
1) Air core current-limiting reactor
2) Dry type current-limiting reactor
3) Indoor/outdoor current-limiting reactor
4) Single phase /three phase current-limiting reactor

ตัวอย่างวงจรสมมูลของ CLR ชนิด Air core current-limiting reactor ที่ใช้งานในประเทศบราซิล แสดงดังรูปที่ 2.13

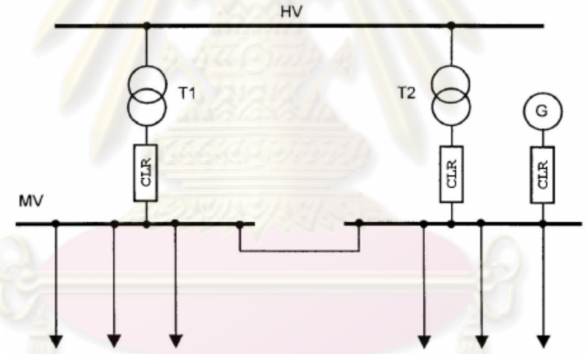


รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของ CLR ชนิด Air core current-limiting reactor [24]

การใช้งานของ CLR จะต้องเลือกตำแหน่งในการติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด และสามารถต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้หลายลักษณะ ดังแสดงดังรูปที่ 2.14 แสดงการต่อ CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสบาร์ รูปที่ 2.15 แสดงการต่อ CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาเข้า และรูปที่ 2.16 แสดงการต่อ CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาออก การต่อ CLR กับบัสบาร์ในสถานีไฟฟ้าในลักษณะที่แตกต่างกันนี้ ซึ่งจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป

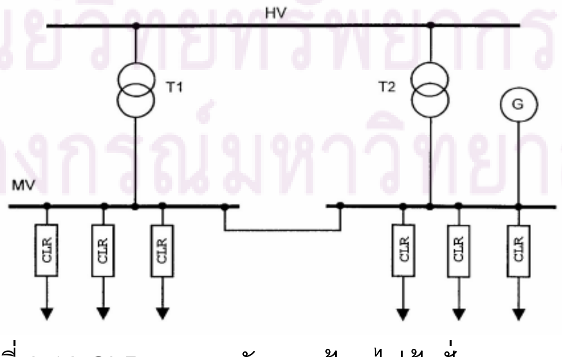


รูปที่ 2.14 CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสบาร์ [28]



รูปที่ 2.15 CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาเข้า [28]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.16 CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาออก [28]

<u>ข้อดี</u>

1) ทำการติดตั้งเข้าไปในระบบได้สะดวก

2) ราคาไม่สูงมาก

3) ช่วยจำกัดอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินไป เพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้า

4) มีความสามารถในการป้องกันกระแสลัดวงจรระดับสูงได้ดี

ข้อเสีย

1) มีปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อม กำลังสูญเสีย เนื่องจากอุปกรณ์มีค่าอิมพีแดนซ์สูงซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียเสถียรภาพทางแรงดัน
2) CLR บางประเภทก่อให้เกิด Magnetic flux ซึ่งส่งผลต่อสุขภาวะของสิ่งมีชีวิต และสวาวะการทำงานของอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ต่างๆ ที่อยู่ใกล้เคียง

2.2.2.4 การประยุกต์ใช้หม้อแปลงอิมพีแดนซ์สูง [4]

วิธีการนี้สามารถลดกระแสลัดวงจรโดยการเพิ่มอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อจำกัดขนาดกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อมและกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงขึ้นเมื่อระบบทำงานในสภาวะปกติ และแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิไม่เป็นไปตามพิกัดที่ถูกต้อง นอกจากนี้ราคาหม้อแปลงค่าอิมพีแดนซ์สูงจะแพงกว่าหม้อแปลงที่ใช้งานโดยทั่วไป

ข้อดี

1) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่เข้าใจได้อย่างชัดเจน ไม่มีความซับซ้อนในการประยุกต์ใช้

2) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีความเชื่อถือได้

ข้อเสีย

1) มีปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อม และกำลังสูญเสีย

2) ไม่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้าที่มีพื้นที่จำกัด

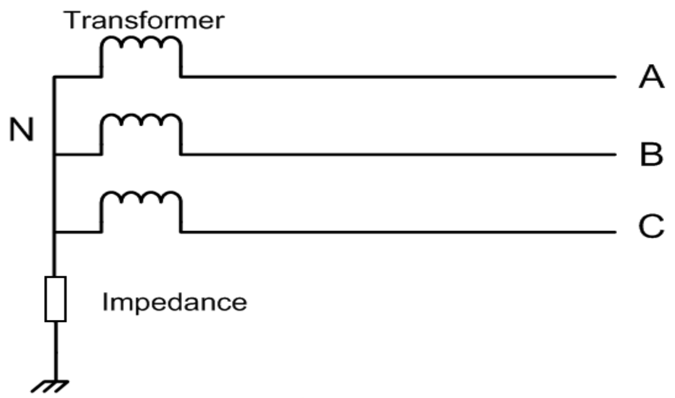
3) แรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิไม่เป็นไปตามพิกัดที่ถูกต้อง

4) ราคาสูงกว่าหม้อแปลงที่ใช้งานโดยทั่วไป

2.2.2.5 การเพิ่มอิมพีแดนซ์สายดิน [10,29]

วิธีลดกระแสลัดวงจรโดยการต่ออิมพีแดนซ์ลงกราวด์ผ่านสายนิวทรอล วิธีการนี้ไม่ส่งผลต่อการทำงานในสภาวะปกติ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท Single-phase-to-ground fault วิธีนี้จะช่วยลดกระแสลัดวงจรได้สูงถึง 40% ดังรูปที่ 2.17 แสดงการต่ออิมพีแดนซ์ลงกราวด์ผ่านสายนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.17 การต่ออิมพีแดนซ์ลงกราวด์ผ่านสายนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า [29]

ข้อดี

1) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่เข้าใจได้อย่างชัดเจน ไม่มีความซับซ้อนในการประยุกต์ใช้

2) ประยุกต์ใช้ได้สะดวก และใช้เงินลงทุนต่ำ

3) ได้ผลดี กรณีกระแสลัดวงจรลงกราวด์มีค่าสูง

ข้อเสีย

1) ความไวต่อการทำงานของรีเลย์กระแสเกินลดลง

2) ไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากในทางปฏิบัตินิยมให้อิมพีแดนซ์ของนิวทรอลมีค่าต่ำๆ

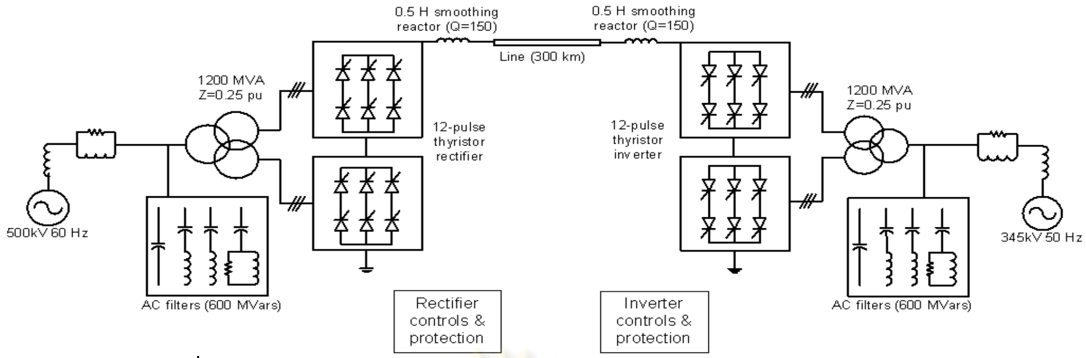
3) ระดับแรงดันนิวทรอลจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงขึ้น อุปกรณ์ป้องกันต้องใช้ฉนวนในระดับที่สูงขึ้น

2.2.3 **วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบอื่นๆ**

วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบอื่นๆ เป็นวิธีการที่มีจุดประสงค์หลักในการนำมาประยุกต์ใช้ ไม่ใช่เพื่อนำมาลดกระแสลัดวงจร แต่สามารถทำให้กระแสลัดวงจรลดลงได้ อย่างเช่น การประยุกต์ใช้สายส่ง HVDC และการยกระดับแรงดันของระบบ ซึ่งทั้งสองวิธีมีจุดประสงค์หลักเพื่อยกระดับคุณภาพในการส่งจ่ายกำลังของระบบไฟฟ้า แต่สามารถทำให้ค่ากระแสลัดวงจรลดลงได้เช่นกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

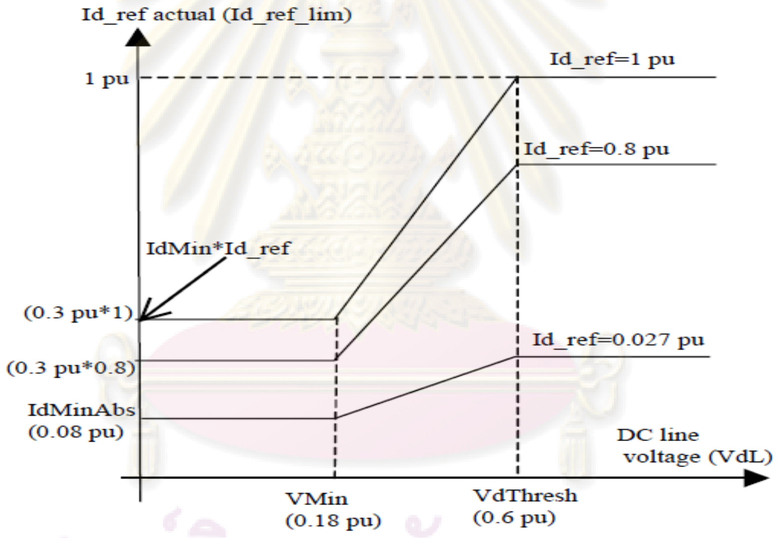
2.2.3.1 High Voltage Direct Current (HVDC) [30]

HVDC เป็นอุปกรณ์ FACT ประเภทหนึ่งซึ่งใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงในระยะทางไกลๆโดยมีหลักการคือ เปลี่ยนไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงส่งผ่าน HVDC line แล้วจึงเปลี่ยนกลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 1000 MW, HVDC, 12-pulse, transmission system [30]

นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชั่นเสริมอื่นๆ อีกเช่น ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งของตัวเอง รักษาเสถียรภาพของระบบ ควบคุมแรงดัน จำกัดค่ากระแสลัดวงจร เป็นต้น โดย HVDC จะมีฟังก์ชั่นที่ชื่อว่า VDCOL ในการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยมีหลักการทำงานดังนี้



รูปที่ 2.19 VDCOL characteristic [30]

จากรูปที่ 2.19 เมื่อแรงดัน Vd ใน Line ลดลงซึ่งอาจจะเกิดมาจาก DC line fault หรือ AC fault ฟังก์ชั่น VDCOL จะทำการลดค่ากระแส Id_ref ลงโดยอัตโนมัติ ซึ่งการลดค่ากระแส Id_ref นี้จะช่วยให้กระแสลัดวงจรที่จะข้ามไปยัง AC network ลดลง

ข้อดี

1) เชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีความถี่ที่ไม่เหมือนกัน
2) ใช้แทน Underwater cables ที่มีความยาวมากกว่า 30 km หากใช้ AC transmission cables จะมีค่า Capacitance ในสายสูง ซึ่งจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเช่น Reactor เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) ใช้ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่มีค่ามากเป็นระยะทางไกลๆ

4) เป็นตัวเชื่อมระบบไฟฟ้าแรงสูงที่ไม่เท่ากัน เช่น ไทย 230 kV – มาเลเซีย 275 kV

<u>ข้อเสีย</u>

1) ระบบ DC ไม่สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ชนิดรีแอกทีฟได้

2) DC ต้องมีสถานีเปลี่ยนระบบแรงดันเป็น AC คือ Inverter station ซึ่งมีราคาแพงและเป็นตัวปัญหาในการกำเนิด Harmonics ทางไฟฟ้า

2.2.3.2 **การยกระดับแรงดัน** [3,10]

การยกระดับแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า มีจุดประสงค์เพื่อให้คุณภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าดีขึ้น คือ มีการสูญเสียน้อยลง และมีความสามารถในการจ่ายระยะทางไกลๆได้ดีขึ้น เนื่องจากมีระดับแรงดันที่สูง และยังช่วยให้ค่ากระแสลัดวงจรทั้งระบบลดลงเนื่องจากค่าแรงดันของระบบที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง โดยวิธีการยกระดับแรงดันมีข้อดี และข้อเสียสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงดังนี้

<u>ข้อดี</u>

1) สามารถลดกระแสลัดวงจรได้ครอบคลุมเป็นวงกว้าง

2) เป็นการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงในระยะยาว

3) นอกจากจะช่วยให้กระแสลัดวงจรลดลงแล้ว ยังสามารถช่วยให้ประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบดีขึ้น

<u>ข้อเสีย</u>

1) เป็นวิธีที่ใช้เงินลงทุนสูงมาก จึงต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบ

2) ไม่สามารถใช้วิธีนี้แก้ปัญหาได้ในกรณีที่เป็นปัญหาที่มีกรอบระยะเวลาสั้น

2.2.4 วิธีการลดกระแสลัดวงจรที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตนำมาประยุกต์ใช้

จากข้อดีและข้อเสียของวิธีการลดกระแสลัดวงจรที่มีอยู่ในปัจจุบัน จะพบว่าในหลายๆ วิธีไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลได้ โดยปัญหาอุปสรรคที่สำคัญ คือ เรื่องของระดับแรงดันการที่ใช้งานที่สูงกว่า 230 kV และหลายๆ เทคโนโลยียังอยู่ในระหว่างการศึกษาและพัฒนา จึงยังไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรม

เนื่องจากการเปลี่ยนเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้มีพิกัดสูงขึ้นไม่สามารถปฏิบัติได้ ดังนั้นการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จึงได้ทำการศึกษาการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดของ

เซอร์กิตเบรกเกอร์ในเขตกรุงเทพและปริมณฑล โดยเลือกพิจารณาวิธีการแบ่งแยกบัส วิธีการปลดวงจรสายส่ง การประยุกต์ใช้สายส่ง HVDC และการยกระดับแรงดันไฟฟ้าสายส่งจาก 230 kV เป็น 500 kV ซึ่งในปัจจุบัน กฟผ. เลือกวิธีการปรับปรุงโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการแบ่งแยกบัส และทำการเลือกตำแหน่งบัสที่จะแบ่งแยกโดยอาศัยหลักการเลือกบัสที่มีกำลังผลิตมากที่สุดในระบบเป็นบริเวณที่จะทำการปรับปรุงโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการแบ่งแยกบัส ซึ่งในปัจจุบัน กฟผ. มีแผนการที่จะทำการแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือและสถานีไฟฟ้าพระนครใต้ เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดปัญหามีขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นหลักการเลือกตำแหน่งการแบ่งแยกบัสดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดความซับซ้อนในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแบ่งแยก ซึ่งต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าควบคู่ไปกับการหาตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดในระบบด้วย โดยในปัจจุบันมีงานวิจัยและกรณีศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสเพื่อลดกระแสลัดวงจรสูงในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

เนื่องจากในปัจจุบันปัญหากระแสลัดวงจรสูงในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง เป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เพราะเป็นปัญหาที่ตามมาหลังจากการขยายระบบผลิตและส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อรองรับกับความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหากระแสลัดวงจร และวิธีการแบ่งแยกบัสก็เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งถูกนำไปใช้แก้ปัญหาอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงกรณีศึกษาในการแก้ปัญหาดังนี้

[5] ได้ทำการสรุปวิธีการควบคุมกระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังไฟฟ้า และทำการศึกษาการลดกระแสลัดวงจรเกินที่เกิดขึ้นในเขตพื้นที่ที่มีโหลดกระจายตัวอย่างหนาแน่น โดยได้นำวิธีการแบ่งแยกบัส และวิธีการประยุกต์ใช้ HVDC มาศึกษาความเป็นไปได้ในการลดกระแสลัดวงจรในระดับแรงดัน 230 kV โดยพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการลดกระแสลัดวงจร เช่นการเปลี่ยนแปลงของการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ กำลังสูญเสีย เปรียบเทียบกับกรณีพื้นฐาน และทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อความมั่นคงของระบบ เสถียรภาพของแรงดัน ผลการทดสอบแสดงว่า การแบ่งแยกบัสที่เป็นแหล่งจ่ายระดับแรงดัน 230 kV สามารถลดขนาดของกระแสลัดวงจรไม่ให้เกินขีดจำกัดของอุปกรณ์ป้องกันได้ แต่จากการวิเคราะห์พบว่าวิธีการที่ช่วยให้กระแสลัดวงจรลดลง จะส่งผลให้เสถียรภาพแรงดันของระบบแย่ลงตามไปด้วย

[9] ได้ศึกษาวิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้าในประเทศสหราชอาณาจักร ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเชื่อมต่ออยู่ในระบบ โดยพิจารณาความเหมาะสมของวิธี

แก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินต่างๆ พบว่าวิธีการแบ่งแยกมีความเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในหลายๆแห่ง และใช้เวลาไม่นานในการดำเนินการแก้ปัญหา มีราคาที่ไม่สูงและมีความน่าเชื่อถือในการลดกระแสลัดวงจรเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาการแบ่งแยกบัสแบบชั่วคราว ซึ่งผลการทดสอบพบว่าสามารถลดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยสามารถรักษาระดับแรงดัน และเสถียรภาพของระบบในสภาวะชั่วครู่ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

[10] ได้ศึกษาการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินที่เกิดขึ้น ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าระดับแรงดัน 275 kV ของประเทศคูเวต โดยนำวิธีการลดกระแสลัดวงจรวิธีต่างๆ มาพิจารณาหาความเหมาะสมในการแก้ปัญหา ผลการทดสอบแสดงว่า วิธีการเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ของสายดิน สามารถช่วยลดกระแสลัดวงจรได้ 10 % แต่ส่งผลกระทบกับการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับในทางปฏิบัติ วิธีประยุกต์ใช้สายส่ง HVDC สามารถลดกระแสลัดวงจรได้ 30% แต่วิธีนี้ใช้เงินลงทุนสูง และระยะห่างระหว่างสถานีไฟฟ้าไม่ไกลนัก จึงไม่เหมาะสมในเรื่องของระยะทางคุ้มทุน วิธีการแบ่งแยกบัสไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากคุณสมบัติของสถานีไฟฟ้าหลายๆแห่งไม่สามารถทำการแบ่งแยกบัสได้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าวิธีแก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินที่เหมาะสมที่สุด คือ ทำการเพิ่มระบบส่งกำลังไฟฟ้าขนาดแรงดัน 400 kV เข้าไปในระบบ แล้วทำการแบ่งแยกบัสแบบถาวรที่สถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 275 kV และทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และความมั่นคงของระบบไฟฟ้า พบว่าวิธีนี้มีความเหมาะสมที่จะมาแก้ปัญหาได้จริง

[11] ได้ศึกษาการลดกระแสลัดวงจรสูงในเพาเวอร์กริดระดับแรงดัน 345 kV ของประเทศเกาหลี โดยนำวิธีการแบ่งแยกบัส การประยุกต์ใช้ Current Limiting Inductor (CLR) และการประยุกต์ใช้ FCL มากระทำที่สถานีไฟฟ้าในเพาเวอร์กริด และทำการเปรียบเทียบว่าวิธีใดจะมีความเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหามากกว่ากัน โดยพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแก้ปัญหาอาทิเช่น ค่าเวลาวิกฤตในการเคลียร์ฟอลต์ เสถียรภาพทางแรงดัน ขีดจำกัดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า ผลการทดสอบแสดงว่า วิธีการแบ่งแยกบัสไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาเนื่องจากทำให้เกิดปัญหาทางด้านเสถียรภาพ และการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า ส่วนการประยุกต์ใช้ FCL พบว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ยังไม่พร้อมที่จะนำมาใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากยังอยู่ในระหว่างการศึกษาพัฒนา ดังนั้นวิธีการประยุกต์ใช้ CLR มีความเหมาะสมที่จะนำไปแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันมากที่สุด

จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา การแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงในระบบส่งไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการแบ่งแยกบัส จะถูกนำมาศึกษาโดยมีการกำหนดตำแหน่งที่ใช้แบ่งแยกอย่างตายตัว และทำการดูผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ โดยที่ไม่มีกระบวนการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการแบ่งแยก เนื่องจากถือเป็นปัญหาที่มีความยาก เพราะต้องพิจารณาผลกระทบที่

เกิดขึ้นกับระบบร่วมกับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมด้วย ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงนำเสนอวิธีการกำหนดตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง โดยพิจารณาเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบ และเงื่อนไขการแบ่งแยกบัสในทางปฏิบัติ โดยประยุกต์ใช้วิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้มาช่วยในการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่น้อยที่สุดซึ่งแปรผันตรงกับเงินลงทุนที่จะใช้ในการแก้ปัญหา โดยได้นำเสนอหลักการและกระบวนการแก้ปัญหาของวิธีดังกล่าวในบทที่ 3 และ 4 ส่วนผลการทดสอบของกระบวนการแก้ปัญหาถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 5

2.4 วิธีค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึก (Heuristic Search)

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการค้นหาคำตอบ (Searching) เป็นเทคนิคทางปัญญาเชิงคำนวณ ซึ่งสามารถหาคำตอบของปัญหาหลายๆ อย่างได้ด้วยการค้นหา แทนที่จะเป็นการแก้ปัญหาโดยตรง วิธีในการค้นหาคำตอบนั้นมีอยู่มากมายหลายวิธี แต่ละวิธีเหมาะสมและมีประสิทธิภาพกับระบบที่แตกต่างกันออก ไปวิธีการค้นหาคำตอบแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่มได้แก่ การค้นหาแบบไม่ใช้ข้อมูลความรู้ (Uninformed search) และการค้นหาแบบใช้ข้อมูลความรู้ (Informed search)

การค้นหาแบบไม่ใช้ข้อมูลความรู้นั้น เป็นกลยุทธการค้นหาที่ไม่มีการใช้ข้อมูลใดๆ มาช่วยในการค้นหาคำตอบ บางครั้งจะเรียกว่าการค้นหาคำตอบแบบบอด (Blind search) ในขณะที่การค้นหาแบบใช้ข้อมูลความรู้จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับการค้นหาแบบบอด กล่าวคือมีการนำเอาข้อมูลมาช่วยในการตัดสินใจว่าจะเลือกเส้นทางการค้นหาคำตอบอย่างไรให้ดีที่สุด ซึ่งหลักการในการค้นหาแบบนี้จะเรียกว่าการค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึก (Heuristic search) [14-15] ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าการค้นหาแบบไม่ใช้ความรู้นั้นมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการค้นหาแบบใช้ความรู้ อย่างไรก็ตามการค้นหาแบบไม่ใช้ความรู้ก็ยังมีประโยชน์ในบางครั้ง โดยเฉพาะสำหรับหลายๆ ระบบที่ไม่มีข้อมูลใดๆ ให้ได้ใช้พิจารณาในขณะทำการค้นหาคำตอบ

กลยุทธการค้นหาแบบใช้ความรู้เป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบไม่ใช้ความรู้ โดยการนำเอาข้อมูลซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหานั้นๆ มาพิจารณาในการค้นหาคำตอบ ทำให้เหมาะสมในการแก้ปัญหาหลายๆ อย่าง โดยเฉพาะปัญหาที่เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งวิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึก ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาที่ไม่เป็นโพลีโนเมียล (NP-Problem) เช่น ปัญหาการหาตำแหน่งที่เหมาะสม (Optimal location problem) ปัญหาการกำหนดเส้นทางการเดินทาง (Routing problem) หรือปัญหาการจัดตารางการผลิต (Production scheduling) ซึ่งเป็นการยากที่จะหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solution) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปัญหานั้นเป็นปัญหาที่มีข้อมูลป้อนเข้าขนาดใหญ่ (NP-hard) การหาคำตอบที่เหมาะสม

ที่สุดอาจจะใช้เวลาในการคำนวณนานมาก หรือเป็นไปไม่ได้ที่จะคำนวณหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นวิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึกจึงถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาเพราะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาก ซึ่งวิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึกที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีดังนี้

2.4.1 **จีนเนติกอัลกอริทึม** [18-19]

จีนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm , GA) เป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบสุ่ม (Stochastic optimization) อย่างหนึ่งที่เลียนแบบหลักการถ่ายทอดทางพันธุกรรมทางธรรมชาติ (Natural genetics) เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global optimum) โดยอาศัยการสมมติจุดคำตอบขึ้นมาหลายๆจุดก่อน (Population of solutions) แล้วประยุกต์ใช้หลักการค้นหาจุดที่เหมาะสมที่สุดซึ่งมีโอกาสที่จะอยู่รอดมากที่สุด (Survival of the fittest) เพื่อหาคำตอบที่ดียิ่งขึ้นในแต่ละรุ่นของการถ่ายทอด (Generation) สำหรับในแต่ละรุ่นของการถ่ายทอดจะมีการประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness) ของจุดคำตอบแต่ละจุด แล้วพิจารณาเลือกจุดคำตอบใหม่จากค่าความเหมาะสมนี้โดยอาศัยวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ วิธีการคัดเลือกดังกล่าวประกอบด้วย การคัดเลือก การข้ามสายพันธุ์และการผ่าเหล่า จุดคำตอบแต่ละจุดจะประกอบไปด้วยสตริง (String) ของตัวแปรที่ถูกลงรหัสไว้เรียกว่าโครโมโซม (Chromosomes) ซึ่งสามารถถอดรหัสเป็นค่าของตัวแปรจริงได้ โดยทั่วไปนิยมลงรหัสตัวแปรให้เป็นระบบเลขฐานสอง

วิธีการ GA มีแนวคิดโดยสรุป คือ เมื่อนำโครโมโซมทั้งหมดมาประกอบกันจะเรียกว่า จีโนม (Genome) และเรียกกลุ่มของยีนส์ในจีโนมนี้ว่า จีโนไทป์ (Genotype) หรือเรียกว่าแบบชนิดพันธุกรรม ซึ่งจีโนไทป์เหล่านี้จะแปลงไปเป็นอวัยวะของสิ่งมีชีวิตต่อไปเรียกว่า ฟีโนไทป์ (Phenotype) ตามทฤษฎีวิวัฒนาการสิ่งมีชีวิตที่แข็งแรงที่สุดจะมีโอกาสสืบทอดสายพันธุ์ที่แข็งแรงต่อไป การผสมยีนส์ของพ่อและแม่จะทำให้เกิดลูกซึ่งคัดลอกยีนส์ของพ่อแม่ที่ผสมกัน ทำให้เกิดสายพันธุ์ที่แข็งแรงยิ่งขึ้น บางครั้งการคัดลอกยีนส์ของพ่อแม่ไม่สมบูรณ์ อาจทำให้เกิดการผ่าเหล่า (Mutation) ในรุ่นลูก การผ่าเหล่าทำให้สิ่งมีชีวิตมีโอกาสพัฒนาสายพันธุ์ใหม่ที่ยิ่งเข้มแข็งขึ้น หากการผ่าเหล่าทำให้เกิดสายพันธุ์ด้อย สายพันธุ์ด้อยจะไม่สืบทอดต่อไป

2.4.2 **อัลกอริทึมการอบอ่อนจำแลง** [20-21]

อัลกอริทึมการอบอ่อนจำแลง (Simulated Aneealing , SA) เป็นเทคนิคในการค้นหาคำตอบของปัญหาการตัดสินใจที่เริ่มต้นใช้ครั้งแรกโดย Kirkpatrick [21] และนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem, TSP) โดย Cerny โดยมีลักษณะเด่นจากการเป็นเทคนิคที่มีอัลกอริทึมในการหาคำตอบที่ง่ายแต่มีประสิทธิภาพ ซึ่งแนวคิดพื้นฐานของวิธีการ SA นี้ได้ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ “Journal of Chemical Physics” โดย Metropolis ซึ่งใช้อัลกอริทึมนี้จำลองการควบคุมการเย็นตัวลงของวัตถุในอ่างความร้อน ซึ่งเรียก

ขั้นตอนนี้ว่า แอนนีลลิ่ง เมื่อวัตถุถูกให้ความร้อนจนกระทั่งถึงจุดหลอมเหลวก็จะปล่อยให้วัตถุนั้นค่อยๆ เย็นตัวลง และจะทำให้วัตถุมีความแข็ง ซึ่งโดยปกติถ้ายิ่งให้วัตถุเย็นตัวลงช้ามากเท่าไร ก็จะทำให้วัตถุมีความแข็งแรงมากขึ้นเท่านั้น โดยการเย็นตัวลงนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการทำให้วัตถุนั้นเย็นลง (Rate of cooling)

จากจุดเริ่มต้นนี้ Kirkpatrick จึงได้นำมาใช้แก้ปัญหาการตัดสินใจเมื่อต้องการคำตอบเกี่ยวกับค่าต่ำสุดหรือค่าสูงสุด คำตอบที่หาได้ ณ ช่วงเวลาต่างๆ โดยวิธี SA นี้ จะค่อยๆ ลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดเหมือนในกระบวนการทำให้วัตถุเย็นตัวลง อัลกอริทึมนี้ถูกสร้างสำหรับประยุกต์ใช้กับปัญหาทั่วไป และปัญหาที่มีส่วนประกอบของความไม่แน่นอน ซึ่งใช้ทฤษฎีการลู่เข้าสู่คำตอบ

2.4.3 **การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยคอโลนีมด** [31]

การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยคอโลนีมด (Ant Colony Optimization) นำเสนอครั้งแรกโดย Marco Dorigo ในปี ค.ศ. 1992 ในวิทยานิพนธ์ของเขาเป็นการจำลองพฤติกรรมในการหาอาหารของมด ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึกแบบใหม่สำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงการจัดแบบยาก เริ่มต้นมาจากปัญหา TSP โดยอัลกอริทึมนี้ เป็นการสังเกตพฤติกรรมของมดในการค้นหาอาหาร โดยมดจะมีการติดต่อสื่อสารกันด้วยการส่งผ่านข้อมูลด้วยฟีโรโมน (Pheromone) มดจะทำสัญลักษณ์ตามเส้นทางที่เดินผ่านด้วยฟีโรโมนนี้ ซึ่งฟีโรโมนจะมีจำนวนมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะทางและคุณภาพของแหล่งอาหารที่พบ แล้วมดตัวอื่นก็จะตามรอยฟีโรโมนมายังแหล่งอาหารในที่สุด

2.4.4 **วิธีค้นหาตาบู** [32-34]

Glover เป็นผู้นำเสนอเทคนิควิธีค้นหาตาบู (Tabu Search , TS)เป็นคนแรกในวารสาร “Journal on Computing” แนวคิดสำคัญของวิธีการหาคำตอบของ TS คือ การเพิ่มความฉลาดโดยใช้ความทรงจำ ของคอมพิวเตอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง คอมพิวเตอร์จะทำการเรียนรู้จากทุกรอบในการทำซ้ำการหา คำตอบครั้งที่ผ่านมา การทำเช่นนี้วิธีการ TS จึงสามารถป้องกันไม่ให้ปัญหาจุดเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local optimal point) เกิดขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต มีการนำวิธีค้นหาตาบูไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด [22-24] และเปรียบเทียบกับวิธีค้นหาอื่นๆ พบว่าวิธีค้นหาตาบูสามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือสามารถใช้เวลาค้นหาคำตอบน้อยกว่า และนำไปประยุกต์ใช้งานได้สะดวกกว่า สามารถไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามยังมีข้อด้อยเมื่อนำไปใช้แก้รูปแบบปัญหาที่มีการรบกวนสูง ซึ่งวิธีการ TS มีข้อแตกต่างกับวิธีการค้นหาอื่นๆ ดังนี้

ข้อแตกต่างของ TS กับวิธีการค้นหาอื่นๆ

1) วิธีการค้นหาตาบูได้จากแนวคิดที่ว่าการค้นหาแบบฉลาดจะต้องพิจารณาถึงหน่วยความจำปรับตัว (Adaptive memory) สำหรับการค้นหาอย่างมีประสิทธิภาพแต่ จีนเนติกอัลกอริทึม และอัลกอริทึมการอบอ่อนจำแลงใช้การสุ่ม (Random) ในการค้นหา

2) วิธีการค้นหาตาบูใช้การสำรวจแบบตอบสนอง (Responsive exploration) ได้แนวคิดจากการที่ว่าในบางครั้งเส้นทางที่แย่ให้ข้อมูลมากกว่าเส้นทางที่ดี เพื่อหาเส้นทางใหม่ที่ดีขึ้น

3) วิธีการค้นหาตาบูใช้หลักการสร้างความละเอียด และความหลากหลาย โดยเพิ่มความละเอียดในการค้นหาบริเวณใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่เคยพบและค้นหาเพิ่มเติมในบริเวณที่แตกต่างจากคำตอบที่ดีที่เคยพบ

4) วิธีการค้นหาตาบูสามารถที่จะหลีกเลี่ยงการให้คำตอบสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น และยังสามารถดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง

5) วิธีการค้นหาตาบูใช้สำหรับการประยุกต์ใช้สำหรับหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงผสมผสาน (Combinatiorial optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ด้วยจุดเด่นและข้อแตกต่างหลายๆ อย่าง ของวิธีการค้นหาตาบู ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เลือกวิธีดังกล่าว มาทำการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งรายละเอียดของวิธีการค้นหาได้ทำการอธิบายในหัวข้อลำดับถัดไป

2.5 วิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Tabu Search)

วิธีการค้นหาแบบตาบู (Tabu Search , TS) [32-34] เป็นวิธีการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงผสมผสาน (Combinatorial optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบัน TS เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีที่มีความสามารถในการหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local optimum) และยังสามารถค้นหาคำตอบต่อไปจนกระทั่งให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงกว้าง (Global optimum) ได้ ซึ่ง TS สามารถประยุกต์ใช้งานกับหลายๆระบบได้อย่างไม่ยุ่งยากมาก เนื่องจากหลักการและกลไกการทำงานของ TS ที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งทำให้ขั้นตอนการประยุกต์ใช้งานของ TS ค่อนข้างที่จะสะดวกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ เช่นวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing) จีนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) เครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ฯลฯ

ข้อดีหลายๆอย่างของ TS ทำให้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายและกลายเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดในงานหลายๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์ทางธุรกิจหรือทางวิศวกรรม เป็นต้น

2.5.1 แนวคิดพื้นฐานของวิธีค้นหาตาบู

คำว่า “tabu” มีความหมายตามพจนานุกรมว่า “ต้องห้าม” ซึ่งในโครงสร้างของ TS มีองค์ประกอบที่มีสถานะต้องห้ามอยู่ด้วย อย่างไรก็ตามสถานะขององค์ประกอบดังกล่าวไม่จำเป็นต้องคงสภาพเช่นนั้นตลอดไป แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและสถานะต่างๆ ภายในระบบ ขั้นตอนการทำงานของ TS ใช้หลักแนวคิดดังกล่าวในการพิจารณาเส้นทางที่คาดว่าจะนำไปสู่คำตอบที่เหมาะที่สุด โดยการค้นหาจะไม่หยุดอยู่ที่คำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ซึ่งเป็นจุดที่หมายความว่าเส้นทางรอบๆ ในจุดนั้นๆ ไม่สามารถให้คำตอบที่ดีกว่าคำตอบในปัจจุบันอีกแล้ว

พิจารณาองค์ประกอบพื้นฐานของการค้นหาคำตอบในรูปที่ 2.20 กำหนดให้พื้นผิวในรูปเป็นผลที่ได้จากค่าการประเมินของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ซึ่งในที่นี้คือการหาค่าสูงสุดจากพื้นผิวของฟังก์ชันดังกล่าว (Maximization) การคำนวณหาคำตอบใหม่จากจุดของคำตอบปัจจุบันใดๆ จะใช้ปฏิบัติการที่เรียกว่าการ “move” (Move operator) หรือ “การเดิน” ซึ่งจะทำให้คำตอบหรือสภาวะปัจจุบันของคำตอบเปลี่ยนแปลงไปตามการเดิน สำหรับการค้นหาคำตอบทั่วๆ ไปที่เรียกว่าการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ (Local Search , LS) หรือการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง (Neighborhood Search , NS) นั้น จะทำการเลือกคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันจากคำตอบที่มีอยู่รอบๆ โดยอาศัยการเดินเพื่อทำการประเมินค่าของคำตอบรอบๆข้างเหล่านั้น แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุดขึ้นมาเป็นคำตอบใหม่ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าคำตอบใหม่มีค่าการประเมินที่สูงที่สุดในบรรดาคำตอบเพื่อนบ้านทั้งหมด

เมื่อกำหนดให้การค้นหาคำตอบเป็นการหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(s)$ และ $s \in S$ โดย $f(s)$ อาจเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นใดๆ ซึ่ง s เป็นคำตอบปัจจุบันและ S เป็นเซตคำตอบที่เป็นไปได้ของระบบ โดยที่ s แต่ละค่าซึ่งเป็นคำตอบในปัจจุบันจะมีคำตอบรอบข้าง (Neighborhood) คือ $N \subset S$ ซึ่งเราสามารถนิยามคำตอบที่เหมาะที่สุดได้ดังนี้

- ถ้า s เป็นคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงกว้าง (Global Optimum) แล้ว จะได้ว่า

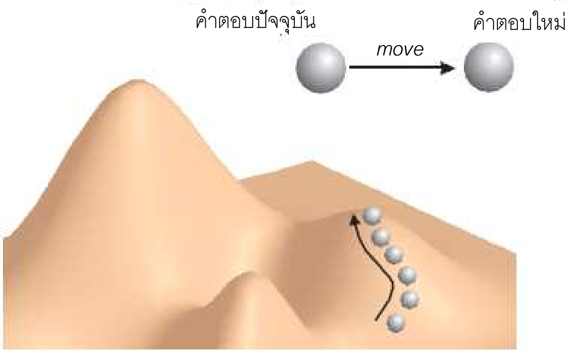
  $f(s) \geq f(y)$ สำหรับ $\forall y \in S$ (กรณีหาค่ามากที่สุดหรือ Maximization)

  $f(s) \leq f(y)$ สำหรับ $\forall y \in S$ (กรณีหาค่าน้อยที่สุดหรือ Minimization)

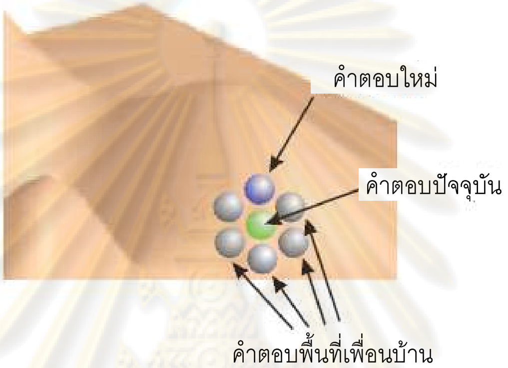
- ถ้า s เป็นคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local optimum) แล้ว จะได้ว่า

  $f(s) \geq f(y)$ สำหรับ $\forall y \in N(x)$ (กรณีหาค่ามากที่สุดหรือ Maximization)

  $f(s) \leq f(y)$ สำหรับ $\forall y \in N(x)$ (กรณีหาค่าน้อยที่สุดหรือ Minimization)



รูปที่ 2.20 ปฏิบัติการ 'move' หรือการเดิน เพื่อหาคำตอบใหม่จากคำตอบปัจจุบัน



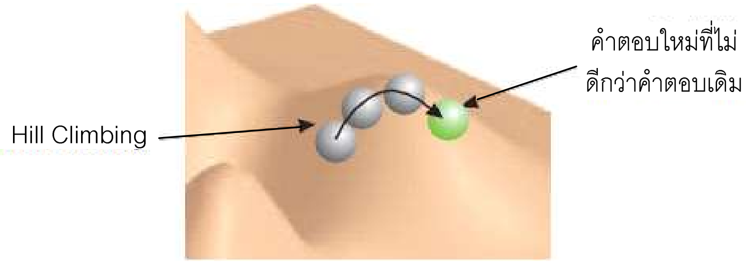
รูปที่ 2.21 การค้นหาคำตอบเฉพาะที่

2.5.2 องค์ประกอบพื้นฐานของวิธีค้นหาตาบู

TS เพิ่มขั้นตอนและเงื่อนไขในการเดินที่นอกเหนือไปจากการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง โดยมีจุดประสงค์หลักคือ

1) หลุดจากคำตอบเหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local Optimum Avoidance)

คำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่มคำตอบพื้นที่รอบข้างจะมีค่าการประเมินที่สูงที่สุด ถ้าคำตอบใหม่มีค่าการประเมินที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน การค้นหาคำตอบจะทำการเดินไปยังทิศทางนั้น และเมื่อใดที่ค่าการประเมินของคำตอบพื้นที่รอบข้างไม่ได้ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน การค้นหาคำตอบที่ดีกว่าจะสิ้นสุดลง ซึ่งในกรณีนี้เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นในการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง ซึ่งคำตอบที่ได้ในขณะนี้จะเป็นคำตอบเหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น แต่ในทางตรงข้าม TS ยอมให้มีการเดินไปยังคำตอบใหม่ที่มีค่าการประเมินที่ไม่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันดังรูปที่ 2.22 ซึ่งจุดประสงค์สำคัญเพื่อให้สามารถหลุดพ้นจากคำตอบเหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้



รูปที่ 2.22 การหลีกเลี่ยงคำตอบเหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น

2) **หลีกเลี่ยงเส้นทางการค้นหาที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่** (Cycle Avoidance)

เส้นทางบางเส้นทางสามารถนำไปสู่การวนรอบอยู่กับที่ ทำให้ไม่สามารถหลุดออกจากสถานะปัจจุบันได้ ตัวอย่างของเส้นทางดังกล่าวได้แก่การเดินย้อนกลับ (Inverse move) ซึ่งในบางโอกาสอาจทำให้การค้นหาคำตอบเกิดการเดินไปกลับโดยไม่มีที่สิ้นสุดได้ ดังนั้นใน TS จึงมีการตั้งค่าสถานะของเส้นทางการเดินที่เพิ่งถูกใช้ให้เป็นสถานะต้องห้าม (Tabu) เพื่อไม่ให้ใช้เส้นทางเดินนี้อีกภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปภายในระยะเวลาที่กำหนด สถานะของการเดินนั้นจะถูกยกเลิกการเป็นสถานะต้องห้าม

ด้วยความสามารถที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่า TS มีการใช้ข้อมูลของการค้นหาคำตอบในอดีตมาช่วยตัดสินการเดินว่าควรจะไปในทิศทางใด องค์ประกอบใหม่ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในโครงสร้างของ TS ที่ทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้แก่

1) **เงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุด** (Recency Condition)

การใช้เงื่อนไขของความคงอยู่นี้เป็นการติดตามการค้นหาคำตอบในช่วงเวลาที่ผ่านมา เมื่อคำตอบหนึ่งถูกค้นพบแล้ว การเดินที่นำไปสู่คำตอบนั้นจะถูกตั้งเป็นสถานะต้องห้าม ซึ่งคำตอบที่ถูกค้นพบด้วยการเดินนี้จะถือเป็นคำตอบล่าสุด และจะไม่ถูกค้นพบอีกภายในระยะเวลาหนึ่ง เนื่องจากการเดินที่นำไปสู่คำตอบนี้ถูกห้ามใช้ในขณะที่ยังมีสถานะต้องห้ามอยู่ ซึ่งเมื่อผ่านระยะเวลาที่กำหนดไป สถานะของเส้นทางเดินนั้นก็จะถูกตั้งค่ากลับสู่สภาวะปกติ ดังนั้นภายหลังการเดินไปยังคำตอบหนึ่งๆ TS จะบังคับให้การค้นหาคำตอบทำการเดินไปยังคำตอบใหม่โดยที่คำตอบเดิมจะไม่ถูกค้นอีก กลไกนี้จึงทำให้ TS สามารถหลุดออกจากคำตอบเหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น และทำการค้นหาคำตอบที่ดีขึ้นไปเรื่อยๆ ได้ ถึงแม้ว่าในบางครั้ง คำตอบใหม่ที่พบจะแย่กว่าคำตอบที่มีอยู่ก็ตาม ซึ่งกระบวนการในการตรวจสอบสถานะต้องห้ามดังกล่าว อาจเรียกว่ากระบวนการตรวจสอบการเป็นตาบูได้เช่นกัน

2) **เงื่อนไขของความซ้ำซาก** (Frequency Condition)

ในลักษณะเดียวกันเราสามารถบันทึกจำนวนครั้งที่การเดินหนึ่งๆ ถูกเรียกใช้ได้ ซึ่ง TS ถือว่าถ้ารูปแบบการเดินใดถูกเรียกใช้เป็นจำนวนมากครั้งเกินไป หรือเกินจำนวนที่ตั้งเอาไว้ จะทำให้

การเดินนั้นถูกตั้งเป็นสถานะต้องห้าม เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางการค้นหาคำตอบที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ ทำให้สามารถหลุดพ้นจากคำตอบเหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้

เงื่อนไขทั้งสองจะถูกใช้ร่วมกันเสมอ กล่าวคือการเดินใดถูกตั้งค่าให้มีสถานะต้องห้ามด้วยเงื่อนไขของความซ้ำซาก และได้คงสถานะต้องห้ามนานเกินระยะเวลาที่กำหนดไว้ การเดินนั้นจะสามารถถูกตั้งค่ากลับสู่สถานะปกติได้ด้วยเงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุด

TS ยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อการเลือกเส้นทางในการค้นหาคำตอบ และเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้แก่

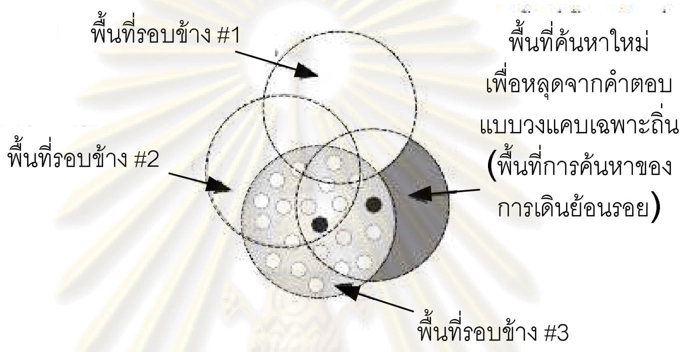
- กลไกการเน้น (Intensification) คือ การค้นหาคำตอบที่เน้นไปยังกลุ่มคำตอบที่ได้ค้นพบแล้วว่าเป็นคำตอบที่ดี โดยใช้ข้อมูลที่บันทึกจากการค้นหาคำตอบที่ผ่านมาในอดีต ซึ่งกลไกนี้ทำ TS กลับไปค้นหาคำตอบในย่านที่เคยเจอคำตอบที่ดีและทำการค้นหาในย่านนั้นอย่างละเอียดขึ้น
- กลไกการแปรเปลี่ยน (Diversification) เป็นกลไกที่ส่งเสริมให้ TS ทำการสำรวจย่านที่ยังไม่เคยถูกสำรวจมาก่อน ซึ่งอาจทำให้ได้คำตอบที่มีความแตกต่างไปจากกลุ่มคำตอบที่ได้ถูกสำรวจมาก่อนหน้านี้ ซึ่งในบางครั้งการเลือกเส้นทางอื่นที่ยังไม่เคยสำรวจและแตกต่างไปจากแนวทางของเส้นทางเดิมอาจทำให้มีโอกาสเจอคำตอบที่ดีกว่าได้เช่นกัน
- เกณฑ์ความทะเยอทะยาน (Aspiration criteria) เป็นเงื่อนไขที่สามารถทำให้เกิดการเดินไปในทิศทางที่ต้องการ ถึงแม้ว่าการเดินนั้นจะมีสถานะต้องห้าม โดยที่การเดินดังกล่าวจะถูกอนุญาตก็ต่อเมื่อคำตอบที่ได้ดีกว่าทุกคำตอบที่เคยค้นพบมา โดย TS จะต้องทำการเก็บบันทึกผลการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเอาไว้ เพื่อใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไข

2.5.3 วิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้

ในหลายๆ กรณีการค้นหาแบบตาบูพื้นฐานยังมีประสิทธิภาพที่ไม่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งาน จึงมีผู้นำเอาโครงสร้างของการค้นหาแบบตาบูไปทำการปรับปรุง เรียกว่า การค้นหาคำตอบแบบตาบูชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Tabu Search , ATS) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นโดยกลุ่มวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี [16] โดยการปรับปรุงดังกล่าวได้เพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตาบูธรรมดา กลไกดังกล่าวคือการเดินย้อนรอยและการปรับรัศมีการค้นหา ดังรายละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้

1) กลไกเดินย้อนรอยการค้นหา (Back Tracking)

การเดินย้อนรอยเป็นขั้นตอนที่อนุญาตให้ระบบค้นหาทำการกลับไปค้นหาพื้นที่คำตอบเก่าที่เคยถูกค้นหามาแล้ว คำตอบที่ดีกว่าจะถูกเลือกจากพื้นที่คำตอบที่ถูกย้อนรอยและคำตอบปัจจุบันที่มีอยู่ดังรูปที่ 2.23 แสดงรายละเอียดของขั้นตอนการเดินย้อนรอย โดยเมื่อกำหนดคำตอบใหม่ให้เป็นจุดเริ่มต้นในการค้นหา ทำให้พื้นที่ในการค้นหาใหม่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งหมายความว่าการค้นหามีโอกาสที่จะหลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ซึ่งคำตอบใหม่ที่ถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นไม่จำเป็นต้องเป็นคำตอบที่ดีที่สุดในพื้นที่ปัจจุบัน ทำให้การเดินย้อนรอยเป็นกลไกหนึ่ง ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการหลุดจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้เป็นอย่างดี



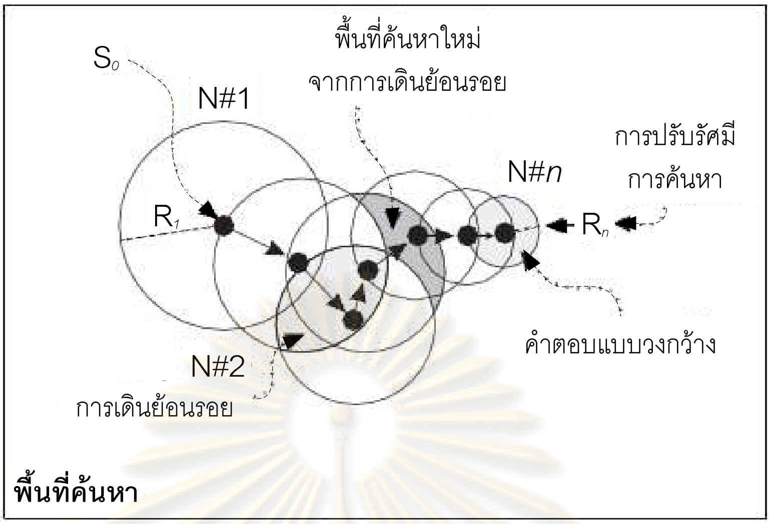
รูปที่ 2.23 การเดินย้อนรอยใน ATS

2) กลไกปรับรัศมีการค้นหา (Adaptive Radius)

กระบวนการปรับรัศมีการค้นหาจะทำการลดรัศมีการค้นหาในระหว่างการค้นหาลง ซึ่งการลดจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้างแสดงดังรูปที่ 2.9 โดยปกติแล้วรัศมีการค้นหาที่กว้างจะให้ผลของการค้นหาที่หยาบ ซึ่งอาจมีผลให้การค้นหาพลาดคำตอบที่ต้องการได้ ในทางตรงกันข้ามถ้ารัศมีการค้นหาคำตอบมีขนาดเล็ก การค้นหาคำตอบจะต้องใช้เวลามากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นถ้ารัศมีการค้นหาคำตอบที่เล็กมากๆ อาจทำให้การค้นหาไม่ครอบคลุมพื้นที่ของคำตอบ ดังนั้นการปรับรัศมีการค้นหาให้เหมาะสมกับสถานการณ์การค้นหาคำตอบในขณะหนึ่งๆ จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการค้นหาได้ ซึ่งใน ATS ได้พัฒนาการปรับรัศมีการค้นหาให้เหมาะสมในระหว่างการค้นหาคำตอบแสดงดังรูปที่ 2.24 โดยใช้ค่าการประเมินเป็นองค์ประกอบในการพิจารณาปรับค่ารัศมีการค้นหา เช่น เมื่อคำตอบปัจจุบันให้ค่าการประเมินที่ดีขึ้น รัศมีการค้นหาจะลดลงตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.4

$$Radius\ new = \frac{Radius\ old}{DF} \tag{2.4}$$

โดยที่ *DF* เป็นตัวประกอบการลดของรัศมี (Decreasing factor) ซึ่งค่าที่เหมาะสมของ *DF* จะแตกต่างและขึ้นอยู่กับปัญหาแต่ละอย่าง



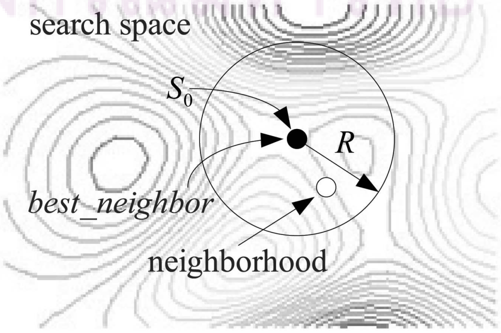
รูปที่ 2.24 การค้นหาแบบตาบูชนิดปรับตัวได้

2.5.4 อัลกอริธึมวิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้

วิธีค้นหาคำตอบแบบตาบูชนิดปรับตัวได้ หรือ ATS [15-17] เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดที่พัฒนามาจาก TS โดยมีกลไกเพิ่มเติมได้แก่ กลไกเดินย้อนรอยการค้นหา เพื่อแก้ปัญหาการหลุดจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น และกลไกปรับรัศมีการค้นหา เพื่อเพิ่มความเร็วและความแม่นยำให้กับกระบวนการค้นหาคำตอบ อัลกอริทึมของ ATS ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

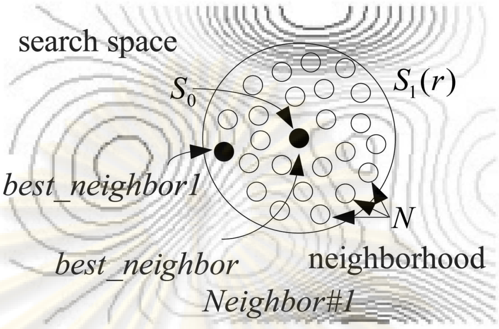
1) กำหนดขอบเขตปริภูมิการค้นหา (Search space), รัศมีการค้นหา (R) , จำนวนรอบสูงสุดที่จะทำการค้นหา (t_max) ,ระยะเวลาความคงอยู่ของสถานะต้องห้าม (t_tabu) ,จำนวนครั้งสูงสุดของการเดินที่ซ้ำซาก (f_max)

2) ทำการสุ่มเลือกคำตอบเริ่มต้น (S0) ภายในปริภูมิการค้นหา โดยกำหนดให้ S0 มีค่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (best_neighbor) ในปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 2.25



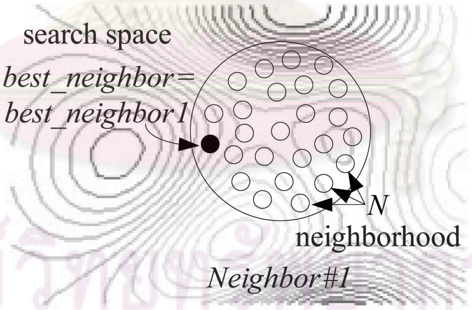
รูปที่ 2.25 การสุ่มเลือกคำตอบเริ่มต้น (S0)

3) ทำการผลิตค่าสมาชิกคำตอบรอบข้าง (neighborhood) รอบคำตอบเริ่มต้น S0 ภายในปริภูมิการค้นหารัศมี R จำนวน N คำตอบ แล้วเก็บไว้ในเซต S1(r) จากนั้นทำการประเมินสมาชิกคำตอบรอบข้างด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งในที่นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุด โดยกำหนดให้ S1 (best_neighbor1) คือค่าสมาชิกคำตอบรอบข้างที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.26



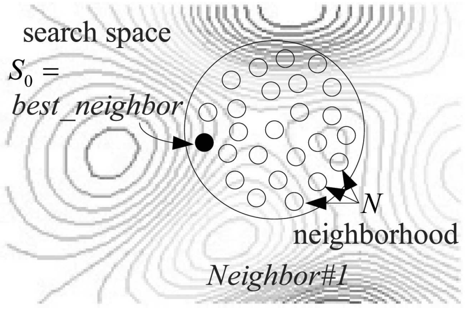
รูปที่ 2.26 ผลิตค่าใกล้เคียงแบบสุ่ม

4) ถ้าค่าS1มีคุณภาพคำตอบที่ดีกว่า S0 ซึ่งในกรณีนี้คือถ้าค่า S1 มีค่าน้อยกว่า S0 ให้ทำการเก็บ S0 ไว้ในเซตของการห้าม (Tabu List , TL) จากนั้นทำการปรับค่า S0 ให้เท่ากับ S1 ไม่เช่นนั้นแล้วให้ทำการเก็บค่า S1 ไว้ใน TL แทน ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ถึงรูปที่ 2.29

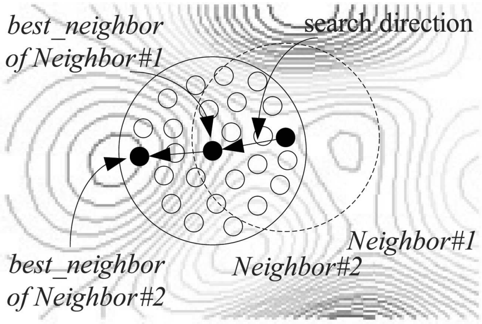


รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบค่าใกล้เคียง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

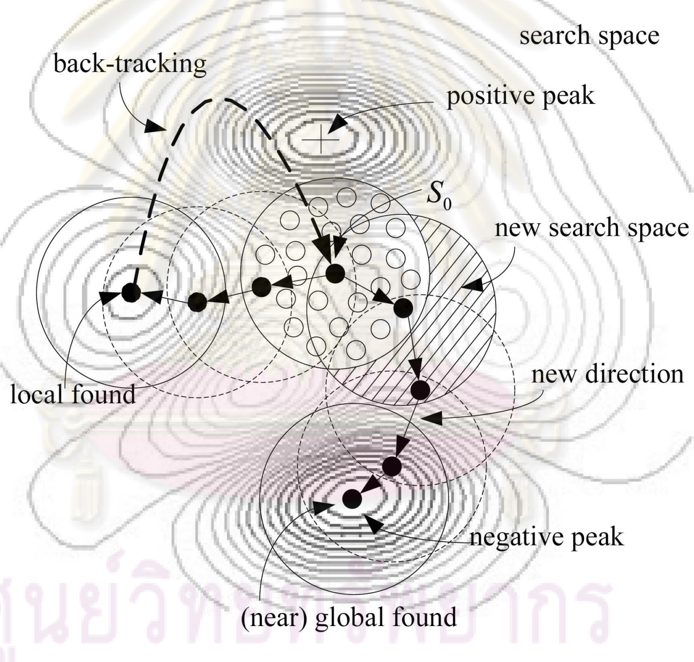


รูปที่ 2.28 ปรับค่าคำตอบเริ่มต้นใหม่



รูปที่ 2.29 ผลิตค่าใกล้เคียงแบบสุ่มรอบใหม่

5) ทำการเรียกใช้กลไกการเดินย้อนรอยการค้นหา ในกรณีที่คำตอบที่ดีที่สุดของคำตอบรอบข้าง ไม่ดีไปกว่าคำตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ซึ่งทำให้กระบวนการค้นหาเกิดการล็อกโดยคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.30

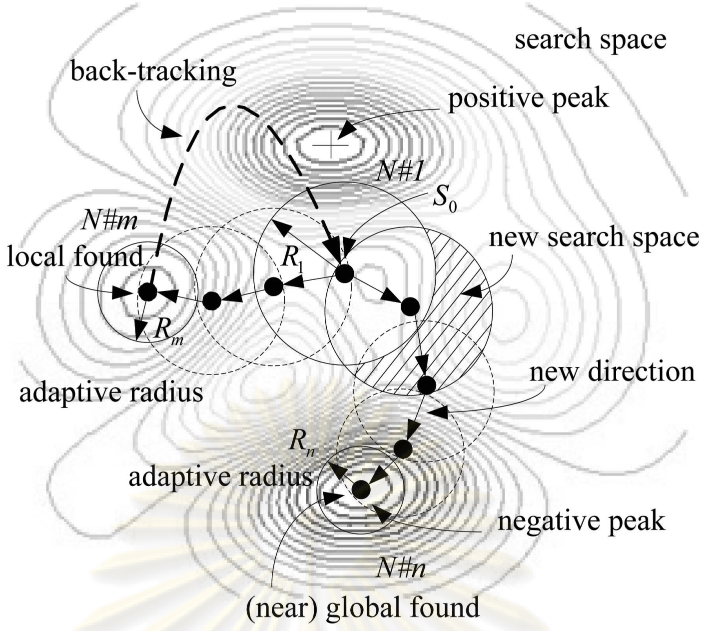


รูปที่ 2.30 กลไกย้อนรอยการค้นหา

6) ตรวจสอบจำนวนรอบของการคำนวณว่าครบตามรอบสูงสุดที่จะทำการค้นหา (t_max) หรือไม่ ถ้าครบแล้วให้ยุติการค้นหา และกำหนดให้ค่า S0 คือคำตอบที่ดีที่สุดของการค้นหา แต่ถ้ายังไม่ครบให้ทำตามขั้นตอนต่อไป

7) ทำการเรียกใช้กลไกปรับรัศมีการค้นหา เมื่อกระบวนการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.31

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.31 กลไกปรับรัศมีการค้นหา

8) ปรับเพิ่มค่าตัวนับรอบของการคำนวณ แล้ววนกลับไปทำซ้ำที่ (3) เพื่อดำเนินกระบวนการค้นหาในรอบต่อไป ซึ่งโดยทั่วไปอัลกอริทึมของ ATS จะยุติการค้นหาโดยอาศัยเงื่อนไขเกี่ยวกับจำนวนรอบการค้นหาที่ต้องการ หรือคำตอบที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดที่พบก็คือคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างนั่นเอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

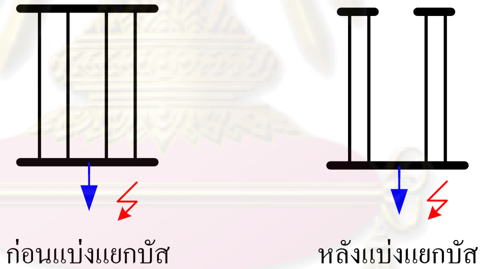
บทที่ 3

วิธีการแบ่งแยกบัสที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการแบ่งแยกบัสเพื่อลดขนาดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญ ได้แก่ หลักการของการแบ่งแยกบัส [4,9] วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวรที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแบ่งแยกบัส ปัญหาในการเลือกบัสที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

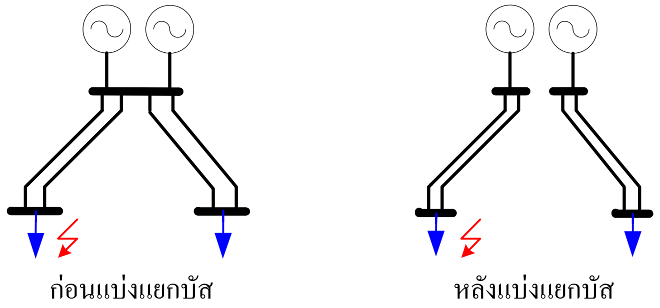
3.1 หลักการของการแบ่งแยกบัสเพื่อลดกระแสลัดวงจร

การแบ่งแยกบัสในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเป็นหนึ่งในวิธีลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เทคนิคการลดกระแสลัดวงจรที่สำคัญ คือ การเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบ [3] ซึ่งการแบ่งแยกบัสสามารถเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบได้โดยเปรียบเสมือนการลดการเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าลง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์บริเวณจุดที่เกิดการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังจากการแบ่งแยกบัส แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งที่ลดลง ภายหลังจากแบ่งแยกบัส

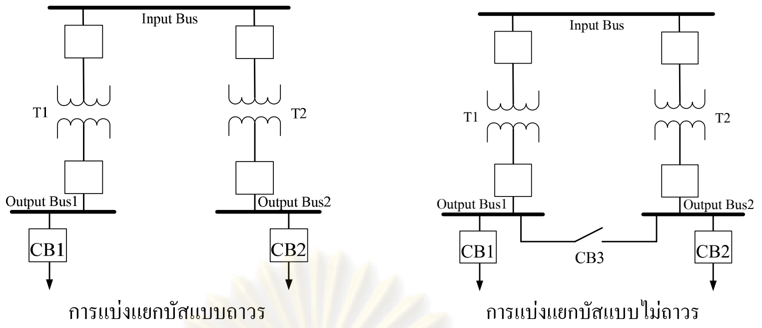
อีกจุดประสงค์หนึ่งของการแบ่งแยกบัส คือ การทำให้บัสที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสลัดวงจรมีความสามารถในการจ่ายที่ลดลง เนื่องจากจำนวนของแหล่งจ่ายที่ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดการลัดวงจรลดลง แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 จำนวนของแหล่งจ่ายที่ใกล้เคียงกับจุดลัดวงจรลดลง ภายหลังจากแบ่งแยกบัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

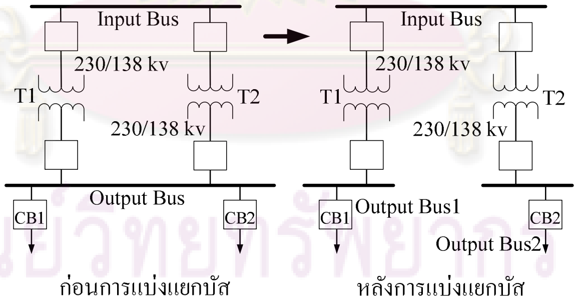
การแบ่งแยกบัสจะกระทำที่บัสภายในสถานีไฟฟ้า โดยทั่วไปการแยกบัสจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การแบ่งแยกบัสแบบถาวร และไม่ถาวร ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การแบ่งแยกบัสแบบถาวร และไม่ถาวร

3.2 วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวร

การแบ่งแยกบัสเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูง เพราะเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือในการแก้ปัญหาสูง และลงทุนไม่มาก หลักการของการแบ่งแยกบัส [3-5] จะทำภายในสถานีไฟฟ้าที่มีบัสซึ่งมีจุดต่ออย่างเช่น สายส่ง หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรืออุปกรณ์รักษาแรงดัน ต่ออยู่ร่วมกันที่บัสอย่างน้อย 2 จุดต่อ โดยสามารถแบ่งแยกบัสได้ทั้งชนิดพีวีบัส และโหลดบัส หรือบัสที่ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อในระบบส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งไม่มีโหลด หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การแบ่งแยกบัสที่เป็นจุดเชื่อมต่อของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

สำหรับรายละเอียดในการแบ่งแยกบัสแต่ละบัส จากที่ได้ทำการสอบถามข้อมูลจากเจ้าหน้าที่ของ กฟผ. ได้ความว่า ต้องทำการแบ่งแยกบัสให้เหมาะสมและมีความสมดุล ยกตัวอย่างเช่น ถ้าทำการแบ่งแยกบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ต้องทำการแบ่งแยกกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของแต่ละบัสที่ถูกแบ่งแยก ให้มีความสมดุลกัน ส่วนถ้าทำการแบ่งแยกบัสที่มีโหลดต่ออยู่ ต้องทำการแบ่งแยกโหลดให้เป็นสัดส่วนกับกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกแบ่งแยกมา ณ บัสนั้นๆ ซึ่งในทางปฏิบัติก็ยึดหลักการพิจารณาแบ่งแยกบัสในลักษณะที่กล่าวมานี้

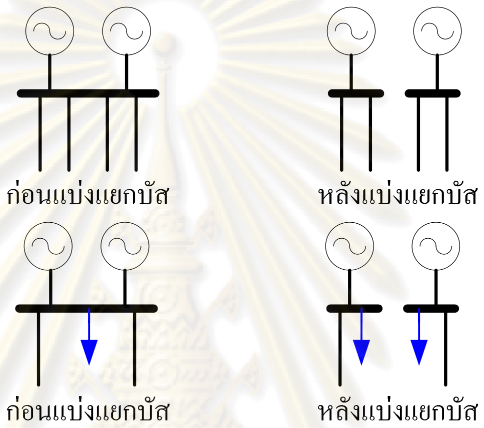
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อย่างไรก็ตามยังไม่มีหลักเกณฑ์ที่แน่ชัดสำหรับการแบ่งแยกบัสในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการสรุปหลักเกณฑ์ของบัสที่เหมาะสม และไม่เหมาะสมสำหรับทำการแบ่งแยกไว้ดังต่อไปนี้

3.2.1 **บัสที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก**

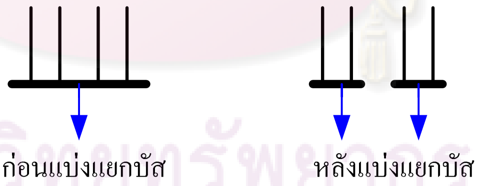
บัสที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก มีหลักเกณฑ์การพิจารณาจากจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หม้อแปลงที่เชื่อมต่อที่บัสนั้น สามารถแยกเป็นประเภทได้ดังนี้

1) บัสชนิด PV ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างน้อย 2 เครื่อง และสายส่งอย่างน้อย 2 เส้นต่ออยู่ที่บัสแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การแบ่งแยกบัสชนิด PV

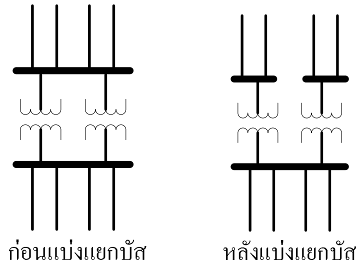
2) บัสชนิด PQ ที่มีสายส่งต่ออยู่อย่างน้อย 2 เส้น และโหลดสามารถแบ่งแยกได้ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การแบ่งแยกบัสชนิด PQ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) บัสที่ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมในระบบส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งมีหม้อแปลงต่ออยู่ที่บัสอย่างน้อย 2 ลูก แสดงดังรูปที่ 3.7

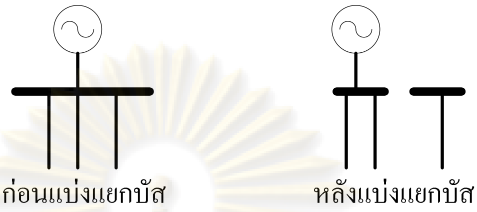


รูปที่ 3.7 การแบ่งแยกบัสที่เป็นจุดเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้ากำลัง

3.2.2 **บัสที่ไม่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก**

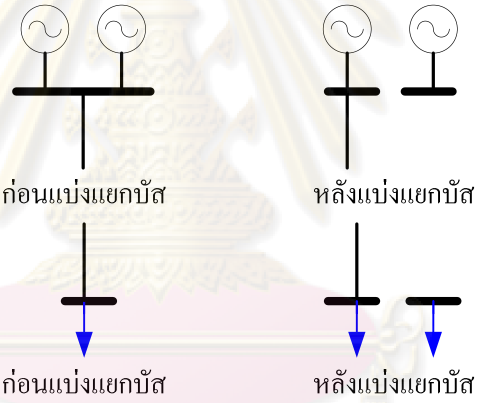
บัสที่ไม่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก มีหลักเกณฑ์การพิจารณาจากจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หม้อแปลง และอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันที่เชื่อมต่อที่บัสนั้น สามารถแยกเป็นประเภทได้ดังนี้

1) บัสชนิด PV ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ที่บัส 1 เครื่อง แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การแบ่งแยกบัสชนิด PV ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ที่บัส 1 เครื่อง

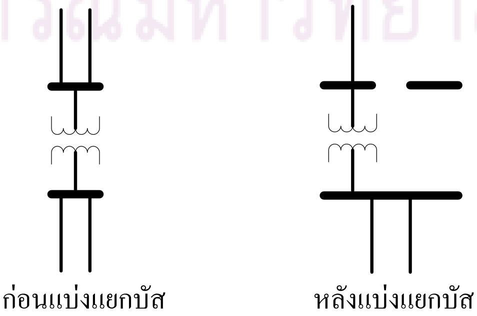
2) บัสชนิด PV หรือ PQ ที่มีสายส่งต่ออยู่ที่บัส 1 เส้น แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การแบ่งแยกบัสชนิด PV หรือ PQ ที่มีสายส่งต่ออยู่ที่บัส 1 เส้น

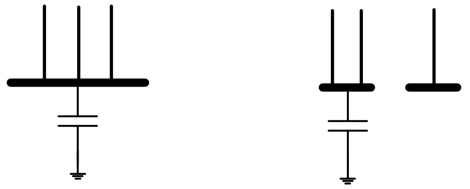
3) บัสที่ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมในระบบส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งมีหม้อแปลงต่ออยู่ที่บัส 1 ลูก แสดงดังรูปที่ 3.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 การแบ่งแยกบัสที่เป็นจุดเชื่อมในระบบส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งมีหม้อแปลงอยู่ที่บัส 1 ลูก

4) บัสที่มีอุปกรณ์รักษาระดับแรงดัน เช่น SVC Reactor ฯลฯ ติดตั้งที่บัส แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การแบ่งแยกบัสที่มีอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันติดตั้งที่บัส

3.3 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยกบัส

การแบ่งแยกบัสในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เปรียบเสมือนการปรับปรุงแก้ไขโครงข่ายของระบบส่งกำลังไฟฟ้า จึงส่งผลกระทบกับสถานะการทำงานต่างๆ ของระบบ ซึ่งแบ่งแยกได้ดังนี้

3.3.1 ผลกระทบต่อกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

การแบ่งแยกบัสในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเปรียบเสมือนการลดการเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่ง หรือหม้อแปลงในระบบ ทำให้ค่าความต้านทานโดยรวมของระบบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ขนาดของกระแสลัดวงจร ณ จุดต่างๆของระบบมีค่าลดต่ำลง

3.3.2 ผลกระทบต่อการรักษาระดับแรงดัน

การแบ่งแยกบัสในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ทำให้ความต้านทานโดยรวมของระบบมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังสูญเสียแอกทีฟและรีแอกทีฟในระบบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งระบบ และอาจส่งผลให้ระดับแรงดันที่บัสมีค่าลดลงจากระดับเดิมจนเกิดปัญหาระดับแรงดันที่บัสเกินขีดจำกัดของระบบ

3.3.3 ผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบ

การแบ่งแยกบัสในระบบ มีผลทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งระบบ ซึ่งอาจทำให้ขนาดของกำลังที่ไหลผ่านสายส่งบางเส้น หรือระดับแรงดันบางตำแหน่งเข้าใกล้ค่าขีดจำกัดของระบบ ซึ่งส่งผลทำให้ไม่สามารถรองรับเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่สามารถรับรองการทำงานของระบบในกรณีที่เกิดความเสียหาย 1 อุปกรณ์ภายในระบบ

3.3.4 ผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบ

การแบ่งแยกบัสในระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีผลทำให้ความน่าเชื่อถือในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับจุดโหลดต่างๆในระบบมีค่าลดลง เนื่องจากในกรณีที่มีการแบ่งแยกบัสบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือหม้อแปลงเชื่อมต่ออยู่ เช่น บัสที่เป็นแหล่งจ่ายในระบบ ส่งผลให้จำนวนของหม้อแปลงที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อยู่ในเส้นทางส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลดลดลง ทำให้โอกาสที่โหลด ณ จุดต่างๆ ในระบบจะไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น

3.3.5 ผลกระทบต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบ

การแบ่งแยกบัสในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ทำให้กำลังสูญเสียแอกทีฟและรีแอกทีฟในระบบมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟ้าภายในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจากความต้านทานรวมของระบบมีค่าสูงขึ้น และในสภาวะที่ระบบมีการเพิ่มขึ้นของโหลดอาจทำให้ระบบไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้เพียงพอ หรือกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่เพียงพอกับความต้องการภายในระบบ ซึ่งอาจทำให้เกิดสภาวะแรงดันพังทลาย (Voltage collapse) และนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพทางแรงดันของระบบได้ในที่สุด

ในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงปัญหาของเสถียรภาพแรงดันในสภาวะอยู่ตัว โดยนำมาร่วมพิจารณาในการเลือกวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการรักษาเสถียรภาพทางแรงดันของระบบ โดยพิจารณาหลังจากสิ้นสุดการหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับการปรับเปลี่ยนโครงข่ายด้วยการแบ่งแยกบัส หรือการติดตั้ง CLR ซึ่งรายละเอียดของการพิจารณาเสถียรภาพแรงดันในสภาวะอยู่ตัวถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในสภาวะอยู่ตัว

เสถียรภาพแรงดัน หมายถึง ความสามารถของระบบที่จะรักษาระดับแรงดันอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด เช่น ระดับแรงดันของบัสจะต้องไม่แตกต่างจากระดับแรงดันมาตรฐานเกิน 5% โดยระบบที่มีเสถียรภาพแรงดันที่ดีคือ ระบบที่มีความยืดหยุ่นต่อการเพิ่มขึ้นของโหลดสูง หรือระบบที่สามารถแก้ไขปัญหาการเพิ่มของโหลดที่มากเกินไปได้ โดยไม่กระทบกระเทือนต่อการทำงานโดยรวมของระบบ

การปรับเปลี่ยนโครงข่ายด้วยการแบ่งแยกบัส หรือการติดตั้ง CLR เปรียบเสมือนการทำให้ความแข็งแรงของระบบลดลง และมีผลกระทบต่อการรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการพิจารณาเสถียรภาพแรงดัน โดยประยุกต์ใช้วิธีการ Modal analysis และดัชนีเสถียรภาพแรงดัน PQ (PQVSI) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 Q-V Modal Analysis

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันของระบบด้วยวิธี Q-V Modal Analysis [35-36] สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าไอเกนแวลู (Eigen Value) ที่หาได้จากจาโคเบี้ยนเมทริกซ์ของระบบที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และผ่านการลดรูปดังขั้นตอนต่อไปนี้

กำหนดให้ J คือ จาโคเบี้ยนเมทริกซ์ของระบบที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ดังสมการที่ 3.5

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

จากสมการที่ 3.5 สามารถหาจาโคเบี้ยนเมทริกซ์ที่ทำการลดรูปได้ดังสมการที่ 3.6

$$J_R = J_4 - J_3 J_1^{-1} J_2 \tag{3.6}$$

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส (ΔV) และการเปลี่ยนแปลงของกำลังรีแอกทีฟที่ฉีดเข้าที่บัส (ΔQ) ดังสมการที่ 3.7

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \tag{3.7}$$

เมื่อ J_R^{-1} สามารถเขียนให้อยู่ในรูปการคูณกันของไอเกนเวกเตอร์ และไอเกนแวลูได้ดังสมการที่ 3.8 และจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 3.9

$$J_R^{-1} = \xi \Lambda^{-1} \eta \tag{3.8}$$

$$v = \Lambda^{-1} q \tag{3.9}$$

โดยที่

ξ คือ เมทริกซ์ไอเกนเวกเตอร์ทางด้านขวาของ J_R

η คือ เมทริกซ์ไอเกนเวกเตอร์ทางด้านซ้ายของ J_R

Λ คือ เมทริกซ์ไดอาโกนอลไอเกนแวลูของ J_R

$v = \Lambda^{-1} \Delta V = \eta \Delta V$ คือ เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส

$q = \eta \Delta Q$ คือ เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงของกำลังรีแอกทีฟที่บัส

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันและกำลังรีแอกทีฟทีบัส สำหรับการใช้วิเคราะห์ในโหมด i ได้ดังสมการที่ 3.10

$$v_i = \frac{q_i}{\sigma_i} \tag{3.10}$$

โดยที่ σ_i คือ ค่าไอเกนแวลู (Eigen Value) ที่หาได้จากจาโคเบี้ยนเมทริกซ์ของระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ 3.10 สามารถวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของระบบได้โดยอาศัยค่าไอเกนแวลูที่น้อยที่สุดของระบบ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

กรณี σ_i > 0 หมายถึง ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพทางแรงดันได้ จะสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน และกำลังรีแอกทีฟเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

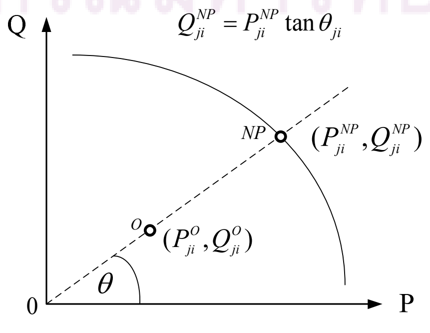
กรณี σ_i < 0 หมายถึง ระบบมีการสูญเสียเสถียรภาพทางแรงดันแล้ว จะสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน และกำลังรีแอกทีฟเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน

กรณี σ_i = 0 หมายถึง ระบบอยู่ในสภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะแรงดันพังทลาย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังรีแอกทีฟเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอย่างมาก

3.4.2 **ดัชนีเสถียรภาพแรงดัน** PQ (PQVSI)

ดัชนี PQVSI เป็นดัชนีที่ใช้ชี้วัดระบบทดสอบ ณ เงื่อนไขการจ่ายโหลดหนึ่งๆ ว่ามีความมั่นคงทางแรงดัน หรือเสถียรภาพทางแรงดันมากน้อยเพียงใดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดเกิดขึ้น ดัชนีนี้ถูกพัฒนาโดยกลุ่มวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [37] โดยสร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ของแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งของแบบจำลองสายส่งแบบ π ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณเบื้องต้นของดัชนีนี้

ดัชนี PQVSI เป็นดัชนีของสายส่งในระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยพัฒนามาจากแนวคิดที่ว่าระบบไฟฟ้ากำลังที่แข็งแรงจะต้องมีจุดทำงานปกติ ณ เงื่อนไขการจ่ายโหลดหนึ่งๆ ห่างจากจุดที่เกิดการพังทลาย (Nose Point) ของแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยการคำนวณค่ากำลัง ณ จุดพังทลายจะพิจารณาในเงื่อนไขที่มีตัวประกอบกำลังเท่ากับ ณ จุดทำงานปกติ หรือ ตัวประกอบกำลังที่เป็นสัดส่วนตามแนวเส้นประ โดยที่ P_{ji}^{NP} และ Q_{ji}^{NP} เป็นกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่จุดพังทลายตามลำดับ และ P_{ji}^{o} และ Q_{ji}^{o} เป็น กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่จุดทำงานปกติตามลำดับ



รูปที่ 3.12 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยค่ากำลังจริง ณ จุดพังทลายสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 – 3.3

$$P_{ji}^{(NP)} = \frac{|V_S|^2}{2\left[\operatorname{Im}\{AB^*\}\tan\theta_{ji} - \operatorname{Re}\{AB^*\} + |A||B|\sec\theta_{ji}\right]} \tag{3.1}$$

$$A = 1 + ZY_C \tag{3.2}$$

$$B = Z \tag{3.3}$$

โดยที่

V_S คือ แรงดันที่บัสต้นทาง

θ_{ji} คือ มุมของตัวประกอบกำลัง

Z คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งตามแบบจำลองแบบ π

Y_C คือ ค่าตัวเก็บประจุของสายส่งตามแบบจำลองแบบ π

จากสมการที่ 3.1 สามารถคำนวณดัชนี PQVSI ได้ดังสมการที่ 3.4 ดังนี้

$$PQVSI_{ji} = \frac{P_{ji}^{o}}{P_{ji}^{NP}} \tag{3.4}$$

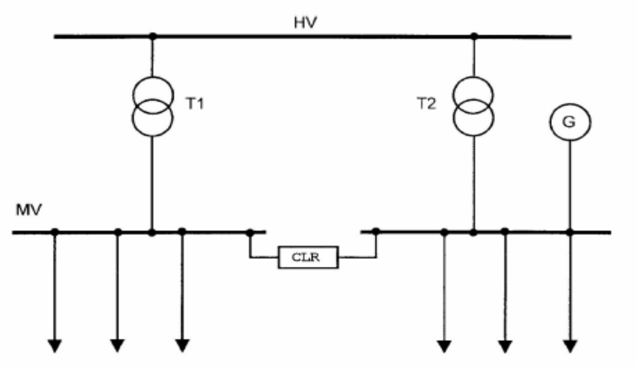
ค่าของดัชนี PQVSI จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หากสายส่งวงจรใดที่ค่าดัชนีเข้าใกล้ 1 หมายความว่าสายส่งเส้นดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดปัญหาการพังทลายของแรงดันในระบบไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้ โดยในการชี้วัดความมีเสถียรภาพทางแรงดันของระบบ สามารถนำค่าดัชนีที่มีค่าสูงที่สุดของสายส่งที่เชื่อมต่อในระบบ แทนค่าดัชนีของระบบโดยรวมได้เช่นกัน

3.5 วิธีการติดตั้ง CLR แทนการแบ่งแยกบัส

วิธีการลดกระแสลัดวงจรโดยการประยุกต์ใช้ Current Limiting Reactor (CLR) เป็นวิธีการที่ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานรวมของระบบเพิ่มขึ้น โดยได้นำเสนอไปแล้วในบทที่ 2

วิธีการติดตั้ง CLR มีการนำไปแก้ปัญหาจริงในประเทศบราซิล [28] โดยหนึ่งลักษณะการติดตั้งที่ถูกนำไปใช้งาน คือ การติดตั้งในตำแหน่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส ดังแสดงในรูปที่ 3.13

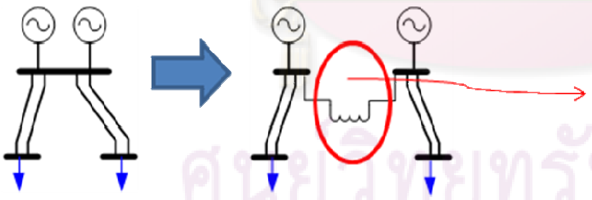
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.13 การติดตั้ง CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสบาร์

การติดตั้ง CLR ในลักษณะนี้ นอกจากจะทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลดีให้กระแสลัดวงจรลดลง แล้วยังทำให้หม้อแปลงสามารถจ่ายโหลดร่วมกันได้ สำหรับในกรณีที่มีหม้อแปลงลูกใดลูกหนึ่งขัดข้อง ซึ่งเป็นข้อดีที่มีประโยชน์กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการแบ่งแยกบัสแบบถาวร ทำให้ในการพิจารณาเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบเมื่อทำการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงมีความยืดหยุ่นในการพิจารณามากกว่า ในแง่ความมั่นคงของระบบ (Contingency)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ซึ่งใช้การแบ่งแยกบัสแบบถาวรเป็นวิธีแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง จึงรวมการพิจารณาวิธีการติดตั้ง CLR ร่วมกับการแบ่งแยกบัสถาวร เป็นกรณีทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา โดยมีลักษณะการประยุกต์ใช้ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งแสดงการติดตั้ง CLR เชื่อมโยงระหว่างบัส แทนการแบ่งแยกบัสแบบถาวร โดยมีรูปแบบการพิจารณาเมื่อปรับเปลี่ยนค่ารีแอกแทนซ์ของ CLR ดังตารางทางด้านขวามือ



	Size of CLR. (pu.)	Status
Case : 1	0	Don't splitting bus
Case : 2	Values	Install
Case : 3	Infinity	Splitting bus

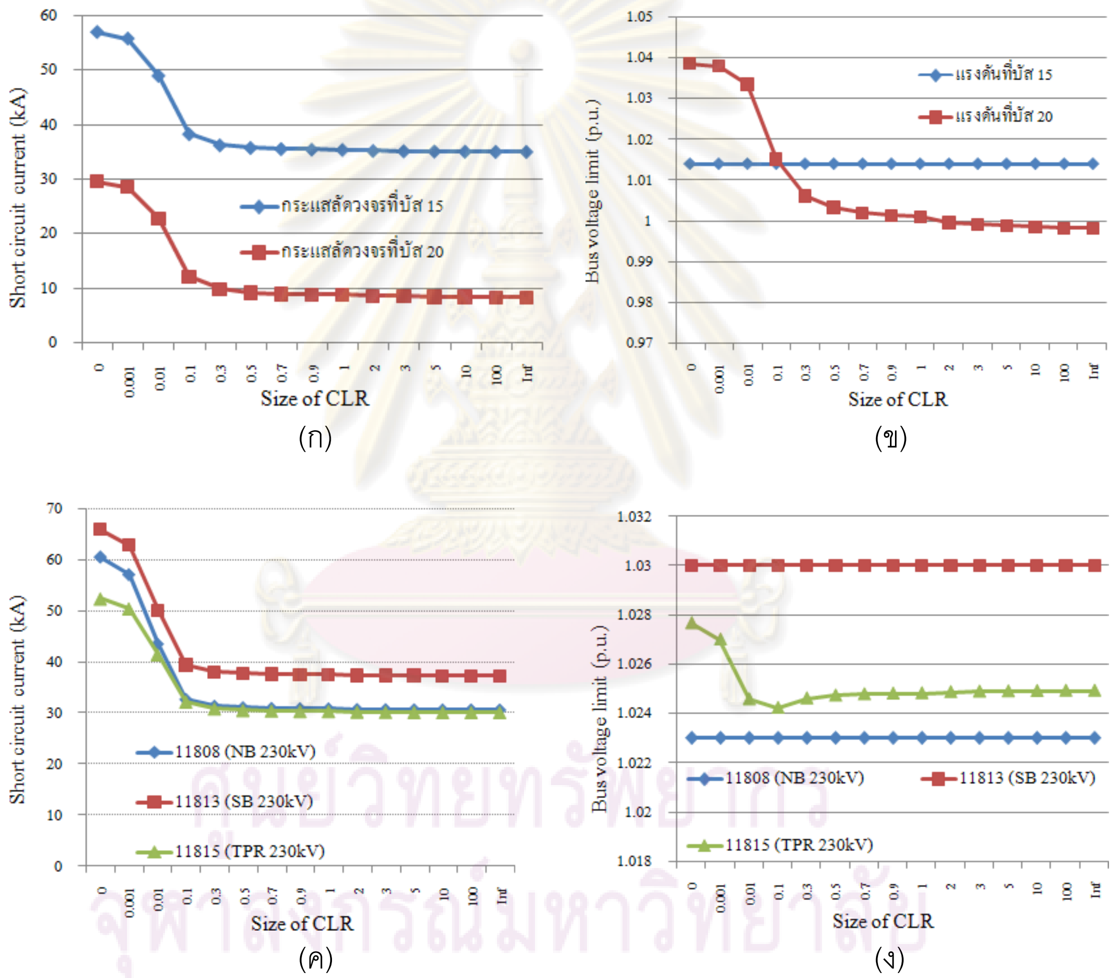
รูปที่ 3.14 การประยุกต์ใช้ CLR แทนการแบ่งแยกบัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางทางด้านขวามือของรูปที่ 8 แสดงให้เห็นรูปแบบการพิจารณาเมื่อปรับเปลี่ยนค่ารีแอกแทนซ์ของ CLR คือ เมื่อค่ารีแอกแทนซ์มีค่าเท่ากับศูนย์ เปรียบเสมือนการที่บัสทั้งสองเป็นบัสเดียวกัน หรือไม่มีการแบ่งแยกบัส เมื่อค่ารีแอกแทนซ์มีค่า เปรียบเสมือนการติดตั้ง CLR ระหว่างบัส โดยมีขนาดเท่ากับค่านั้นๆ ส่วนเมื่อค่ารีแอกแทนซ์มีค่าเท่ากับอนันต์ เปรียบเสมือนการที่บัสทั้งสองถูกแบ่งแยกแบบถาวรออกจากกัน

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนขนาดของ CLR ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส จากค่าศูนย์ ถึงค่าอนันต์ โดยทำการทดสอบติดตั้งไปที่บัสในระบบทดสอบ พบว่าส่งผลต่อกระแสลัดวงจรที่บัส คือ เมื่อทำ

การเพิ่มขนาดของ CLR ขึ้นส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่บัสมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง จนถึงค่าหนึ่ง หลังจากนั้นกระแสลัดวงจรจะเริ่มคงที่ แสดงดังรูปที่ 3.15(ก) และส่งผลต่อค่าแรงดันที่บัส คือ สำหรับบัสที่เป็นโหลดบัส ค่าแรงดันที่บัสมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มขนาดของ CLR ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส ส่วนบัสที่เป็นพีวีบัส ค่าแรงดันมีค่าคงที่เมื่อทำการเพิ่มขนาดของ CLR เนื่องจากเป็นบัสที่คุมแรงดันให้คงที่ แสดงดังรูปที่ 3.15(ข) ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับการทดสอบกับระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงในเขตกรุงเทพและปริมณฑลของ กฟผ. โดยได้ทำการติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ทำการแบ่งแยกที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงพระนครเหนือ พระนครใต้ และเทพารักษ์ ผลการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรที่บัส และแรงดันที่บัส แสดงดังรูปที่ 3.15(ค) และรูปที่ 3.15(ง)



รูปที่ 3.15 ผลของค่ากระแสลัดวงจร และแรงดันที่บัส เมื่อทำการติดตั้ง CLR

จะเห็นได้ว่าผลกระทบทีเกิดขึ้นกับการทำงานของระบบเมื่อทำการติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัส มีลักษณะคล้ายกับผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบเนื่องจากการแบ่งแยกบัส คือ ทำให้อิมพีแดนซ์รวมของระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าแรงดันตกคร่อมที่มากขึ้น และการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในการที่จะนำวิธีการติดตั้ง CLR ไปแก้ไขปัญหากระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลัดวงจรสูง จำเป็นจะต้องมีกระบวนการหาขนาดที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบ หรือเงื่อนไขการทำงานของระบบ ควบคู่ไปกับการหาขนาดการติดตั้งที่เหมาะสม ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.6 ปัญหาการหาตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม

การแบ่งแยกบัสเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ใช้กันในหลายๆ ประเทศ ใช้เงินลงทุนไม่สูงมากและมีความเชื่อถือได้สูง อย่างไรก็ตาม การแบ่งแยกบัสทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส การส่งผ่านกำลัง ความมั่นคงของระบบ (Contingency) และความเชื่อถือได้ของระบบ (Reliability) ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยกบัส [9,11-12] ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว มาร่วมพิจารณาหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม ซึ่งถือเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบไม่เชิงเส้นที่มีความซับซ้อน

การพิจารณาหาตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม โดยการแบ่งแยกบัสที่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด หรือบัสที่มีกำลังผลิตมากที่สุดในระบบ แล้วค่อยทำการตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานต่างๆ ของระบบในภายหลัง อาจนำมาใช้ได้กับระบบที่มีการเชื่อมต่อของโครงข่ายที่ไม่ซับซ้อนมาก แต่ถ้าในระบบที่มีความซับซ้อนของโครงข่ายมาก อาจทำให้เกิดความซับซ้อนของปัญหาเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถหาตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมได้ ทำให้หลักการแบ่งแยกดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้

การหาตำแหน่งบัสที่จะทำการแบ่งแยกโดยการสุ่มให้ครบทุกโอกาสที่เป็นไปได้ แล้วพิจารณาเงื่อนไขการทำงานของระบบ ถึงแม้ว่าจะมีความละเอียดรอบคอบในการแก้ปัญหา แต่ต้องสูญเสียเวลาในการค้นหาอย่างมหาศาล ยกตัวอย่างเช่น ระบบที่ประกอบด้วยบัสจำนวน 24 บัส จะต้องใช้จำนวนรอบของการคำนวณ หรือจำนวนเหตุการณ์ในการพิจารณาอย่างน้อย เท่ากับ 2^{24} หรือ 16.777 ล้านรอบ ซึ่งจำนวนของเหตุการณ์นี้ ยังไม่นับรวมความหลากหลายของการจัดเรียงของสายส่งในแต่ละบัส ดังนั้นเพื่อการหาตำแหน่งบัสที่จะแบ่งแยกอย่างมีประสิทธิภาพและรองรับเงื่อนไขการทำงานต่างๆของระบบ จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาประยุกต์ใช้ เพื่อช่วยในการแก้ปัญหา

บทที่ 4

การกำหนดตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม เพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง

เนื้อหาในบทนี้นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของกระบวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญดังนี้ ได้แก่ การนิยามของตัวแปรที่ใช้สื่อความหมายในสมการของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือในสมการเงื่อนไขจำกัดต่างๆ และรูปแบบของปัญหาที่ใช้พิจารณา รวมถึงขั้นตอนในการแก้ปัญหา สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวร และกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวรร่วมกับการติดตั้ง CLR

4.1 นิยามตัวแปร

ก่อนที่จะกล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการระบุปัญหาการกำหนดตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมเพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า จะขอกล่าวถึงนิยามของตัวแปรที่ปรากฏอยู่ในสมการ เพื่อความเข้าใจชัดเจนดังนี้

ตัวแปรต่อเนื่อง ได้แก่

b คือ จำนวนของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยก

X คือ ตำแหน่งของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยก

m คือ ชุดของตำแหน่งบัสที่ต้องทำการแบ่งแยก

k คือ จำนวนตำแหน่งที่ติดตั้ง CLR ในระบบ

C_k คือ ขนาดของ CLR ที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่ง k

n คือ ชุดของขนาด CLR ที่ติดตั้งที่แต่ละตำแหน่งบัส

$S_d_bus_i$ คือ ขนาดของโหลดที่เชื่อมต่อที่บัส i

Q_{G_i} คือ กำลังการผลิตรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

$V_i\angle\delta_i$ คือ เฟสเซอร์ของแรงดันที่บัส i

$Y_{ij}\angle\theta_{ij}$ คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i , j) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

S_{ij} คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งจากบัส i ไปยังบัส j

I_{SC_i} คือ ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส i

$nbrch_new_bus_i$ คือ จำนวนสายส่งที่เชื่อมต่อกับบัสใหม่ i ที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยก

$ngen_new_PV_bus_i$ คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับบัสใหม่ i ชนิด PV ที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยก

ตัวแปรไบนารี ได้แก่

e คือ ตัวแปรระบุเงื่อนไขการแยกตัวของระบบ โดยที่ 1 แทน การเกิดขึ้นของการแยกตัวของระบบ และ 0 แทน ไม่มีการแยกตัวเกิดขึ้น

$contingency$ คือ ตัวแปรระบุเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ โดยที่ 1 แทนความสามารถในการรองรับเงื่อนไขความมั่นคง n-1 และ 0 แทนการไม่รองรับเงื่อนไขความมั่นคง n-1

ข้อมูลป้อนเข้า ได้แก่

$nbus$ คือ จำนวนบัสของระบบที่ทำการศึกษา

P_{D_i}, Q_{D_i} คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟที่บัส i

P_{G_i} คือ กำลังการผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

$P_{G_i}^{min}, P_{G_i}^{max}$ คือ พิกัดของกำลังผลิตจริงต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

$Q_{G_i}^{min}, Q_{G_i}^{max}$ คือ พิกัดของกำลังผลิตรีแอกทีฟต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

V_i^{min}, V_i^{max} คือ พิกัดของขนาดแรงดันต่ำสุดและสูงสุดที่บัส i

S_{ij}^{max} คือ พิกัดของกำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j

IC_i^{max} คือ พิกัดของขนาดกระแสลัดวงจรสูงสุดที่บัส i

4.2 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

จากปัญหาการหาตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 3.5 จะเห็นว่าการหาตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมะสมเป็นปัญหาที่ซับซ้อน เนื่องจากต้องพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบควบคู่ไปกับการพิจารณาด้วย โดยสำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวรในการแก้ปัญหา มีรายละเอียดของรูปแบบปัญหาที่ใช้พิจารณา และกระบวนการในการแก้ปัญหาดังนี้

4.2.1 รูปแบบของปัญหา สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

ปัญหาการกำหนดตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดกระแสลัดลงวงจรสูงในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ถือเป็นปัญหา NP-Hard แบบปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงผสมผสาน โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังแสดงในสมการที่ 4.2 และเงื่อนไขบังคับ ดังแสดงในสมการที่ 4.3 – 4.12

4.2.1.1 ฟังชันก์วัตถุประสงค์ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

วัตถุประสงค์ของปัญหา คือ ต้องการหาตำแหน่งของบัส X_b ที่จะทำการแบ่งแยกบัส เพื่อลดกระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยให้มีจำนวนบัสของการแบ่งแยก b น้อยที่สุด เพื่อลดจำนวนเงินลงทุนสำหรับการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงในระบบ ซึ่งแปรผันตรงกับจำนวนบัสที่ต้องทำการแบ่งแยกที่สถานีไฟฟ้า

สมการที่ 4.1 แสดงเซตของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยก m โดยมีสมาชิกเป็นตำแหน่งบัสที่ต้องทำการแบ่งแยก X_b โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ 4.2 แสดงถึงความต้องการในการหาจำนวนตำแหน่งของบัสที่น้อยที่สุดที่ต้องทำการแบ่งแยกในระบบเพื่อลดกระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

$$m = \{X_b \in \{1,2,...,nbus\} \mid X_b \ is\ a\ bus\ splitting.\} \tag{4.1}$$

$$Minimize\ \ b \tag{4.2}$$

4.2.1.2 เงื่อนไขบังคับ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

เงื่อนไขบังคับ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวร สามารถแบ่งออกเป็นเงื่อนไขบังคับของการแบ่งแยกบัสในทางปฏิบัติ ซึ่งแสดงในเงื่อนไขบังบังคับที่ 1 ถึง 4 และเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบซึ่งแสดงในเงื่อนไขบังบังคับที่ 5 ถึง 11 โดยมีรายละเอียดของเงื่อนไขบังคับ ดังต่อไปนี้

1) หลังจากทำการแบ่งแยกบัสแล้วต้องมีการแบ่งแยกกำลังผลิต หรือโหลดให้เป็นสัดส่วนที่สมดุลกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

2) บัสใหม่ที่เกิดขึ้นในระบบต้องมีสายส่งเชื่อมต่ออยู่อย่างน้อย 1 วงจร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$nbrch_new_bus_i > 0 \tag{4.3}$$

3) บัสใหม่ชนิด PV ที่เกิดขึ้นในระบบต้องมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่อย่างน้อย 1 เครื่อง

$$ngen_new_PV_bus_i > 0 \tag{4.4}$$

4) บัสใหม่ที่เกิดขึ้นในระบบ ต้องมีโหลดที่ถูกแบ่งแยกมาไม่เกินร้อยละ 80 ของพิกัดหม้อแปลง

$$S_d_bus_i \le 80\%\ of\ \ transformer\ rating \tag{4.6}$$

5) ค่าของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสใดๆ ต้องสมดุลตามเงื่อนไขของสมการโหลดโฟลว์

$$P_{G,i} - P_{D,i} = \sum_{j=1}^{nbus} |V_i||V_j||Y_{ij}| cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \ i = 2,...,nbus \quad (4.5)$$

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

6) ค่ากระแสลัดวงจรที่บัสใดๆ ต้องไม่สูงเกินกว่าพิกัดของขนาดกระแสลัดวงจรสูงสุดแต่ละบัส

$$|I_{SC,i}| \le |I_{SC,i}^{max}| \quad (4.7)$$

7) กำลังการผลิตที่แต่ละบัส จะต้องอยู่ในช่วงพิกัดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวสามารถจ่ายได้

$$P_{G,i}^{min} \le P_{G,i} \le P_{G,i}^{max} \text{ และ } Q_{G,i}^{min} \le Q_{G,i} \le Q_{G,i}^{max} \quad (4.8)$$

8) หลังจากทำการแบ่งแยกบัสในระบบแล้ว ขนาดของแรงดันที่แต่ละบัสต้องอยู่ในช่วงของพิกัดการทำงาน

$$V_i^{min} \le |V_i| \le V_i^{max} \quad (4.9)$$

9) กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่งจะต้องมีค่าไม่เกินพิกัดของสายส่งแต่ละเส้น

$$|S_{ij}| \le S_{ij}^{max} \quad (4.10)$$

10) ต้องไม่เกิดการแยกตัวของระบบขึ้น หลังจากทำการแบ่งแยกบัสในระบบแล้ว โดยตัวแปรระบุการแบ่งแยกตัวที่เกิดขึ้นของระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะต้องมีค่าเป็น 0 เท่านั้น

$$e \in \{0,1\} \quad (4.11)$$

เมื่อ e เท่ากับ 1 แทนการเกิดขึ้นของการแยกตัวของระบบ และ e เท่ากับ 0 แทนการไม่มีการแยกตัวของระบบเกิดขึ้น

11) ความมั่นคง (Contingency)ของระบบต้องผ่านเงื่อนไข n-1

$$contingency \in \{0,1\} \quad (4.12)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ *contingency* เท่ากับ 1 แทนความสามารถในการรองรับเงื่อนไขความมั่นคง n-1 และ *contingency* เท่ากับ 0 แทนการไม่รองรับเงื่อนไขความมั่นคง n-1

4.2.2 กระบวนการในการแก้ปัญหา สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีค้นหาคำตอบแบบตาบูชนิดปรับตัวได้ มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาตามรูปแบบของปัญหาที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2 ซึ่งก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนการแก้ปัญหา จะขอกล่าวถึงความหมายของศัพท์ที่สำคัญที่ใช้ในการอธิบายขั้นตอนการทำงานดังนี้

ความหมายของศัพท์ที่ใช้ในการอธิบาย

S0 คือ ชุดคำตอบการแบ่งแยกบัสเริ่มต้นของการค้นหา

S_best คือ ชุดคำตอบการแบ่งแยกบัสที่ดีที่สุดของแต่ละรอบการค้นหา

N(S) คือ สมาชิกชุดคำตอบการแบ่งแยกบัสรอบข้างซึ่งสุ่มจากพื้นที่ภายในรัศมีจากจุดศูนย์กลางของ *S_best*

N(S_best) คือ สมาชิกชุดคำตอบการแบ่งแยกบัสที่ดีที่สุดในกลุ่มของ *N(S)*

f_max คือ จำนวนครั้งสูงสุดของการซ้ำซาก

ite_max คือ จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด

num_neighbor คือ จำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง

Tabu_list คือ เซตที่เก็บเส้นทางเดินที่ต้องห้าม เพื่อใช้ตรวจสอบเส้นทางที่เป็นตาบู (เส้นทางที่ถูกห้ามไว้)

Ans_list คือ เซตที่เก็บชุดคำตอบที่ถูกค้นพบว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมแบบเฉพาะถิ่น

Locate_list คือ เซตที่เก็บชุดของตำแหน่งบัสที่เมื่อทำการแบ่งแยกแล้วทำให้ผ่านเงื่อนไขกระแสลัดวงจร

ขั้นตอนของการแก้ปัญหาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ ประกอบด้วยขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยประยุกต์ ATS และขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.2.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยประยุกต์ ATS สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

เป็นขั้นตอนหลักในการแก้ปัญหาการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม สามารถแบ่งออกได้เป็นขั้นตอนหลักๆ ตามลำดับดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่า จำนวนครั้งสูงสุดของการซ้ำซาก (*f_max*), จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด (*ite_max*), จำนวนสมาชิกชุดคำตอบการแบ่งแยกบัสภายในพื้นที่รอบข้าง (*num_neighbor*)

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มบัสที่จะทำการแบ่งแยก (*X*) จากจำนวนบัสทั้งหมดในระบบ ให้ครบตามจำนวนบัสสูงสุดที่จะทำการแบ่งแยก โดยในที่นี้สมมุติให้จำนวนบัสสูงสุดที่จะทำการแบ่งแยกเท่ากับ 3 ซึ่งจะอยู่ในรูปของเซตของบัสที่ทำการแบ่งแยกเริ่มต้น (*S0*) และทำการกำหนดชุดคำตอบการแบ่งแยกบัสที่ดีที่สุด (*S_best*) ให้เท่ากับ *S0* แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.1

$$S0 = \boxed{X_1} \boxed{X_2} \boxed{X_3} = S_best$$

รูปที่ 4.1 รูปแบบการกำหนดตำแหน่งการแบ่งแยกบัสเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 3 ทำการบันทึกค่า *S_best* ไว้ใน *Tabu_list* ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.2 โดยจะมีจำนวนชุด *S_best* สูงสุดเท่ากับจำนวนรอบในการคำนวณ ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อเอาไว้ใช้พิจารณาความเป็นตาบูของเส้นทางที่จะเดินไปสู่คำตอบที่เหมาะสม หรือเอาไว้ใช้ตรวจสอบเส้นทางเดินที่ต้องห้าม เพื่อเพิ่มโอกาสการหลุดจากคำตอบที่เหมาะสมแบบเฉพาะถิ่นตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.5.2

Tabu_list =	
	S_best_1
	S_best_2
	:
	:
	$S_best_{ite_max}$

รูปที่ 4.2 รูปแบบการเก็บค่าของ Tabu_list

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์คุณภาพคำตอบของ *S_best* ตามวิธีการที่จะนำเสนอในลำดับถัดไป จากนั้นทำการปรับรัศมีของพื้นที่รอบข้าง *S_best* ตามคุณภาพของคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งขั้นตอนนี้เปรียบเสมือนกลไกการปรับรัศมีตามที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้

สำหรับวิธีการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบสำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวร สามารถแสดงได้ดังหัวข้อ 4.2.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส ในลำดับถัดไป

ขั้นตอนที่ 5 ทำการสร้างสมาชิกชุดคำตอบการแบ่งแยกบัสรอบข้าง (*N*(*S*)) ให้ครบตามจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง (*num_neighbor*) ที่กำหนดไว้ โดยสร้างจากการสุ่มภายใน

พื้นที่รอบข้างของ *S_best* ซึ่งจำนวนชุดคำตอบสูงสุดของ *N*(*S*) จะมีค่าเท่ากับจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.3

N(S) =

$X_{1,1}$	$X_{1.2}$	$X_{1,3}$
$X_{2,1}$	$X_{2,1}$	$X_{2,3}$
$X_{3,1}$	$X_{3,2}$	$X_{3,3}$
:		
:		
$X_{n,1}$	$X_{n,2}$	$X_{n,3}$

รูปที่ 4.3 รูปแบบการเก็บค่าของสมาชิกชุดคำตอบรอบข้าง ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

ขั้นตอนที่ 6 วิเคราะห์คุณภาพของ *N*(*S*) ทุกชุดคำตอบ จากนั้นพิจารณาหาสมาชิกชุดคำตอบการแบ่งแยกบัสที่ดีที่สุด (*N*(*S_best*)) โดยในตัวอย่างนี้สมมุติให้ชุดคำตอบลำดับที่ 41 เป็นชุดคำตอบที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4

N(S_best) =

$X_{41,1}$	$X_{41.2}$	$X_{41,3}$

รูปที่ 4.4 รูปแบบการเก็บค่าของสมาชิกชุดคำตอบที่ดีที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

ขั้นตอนที่ 7 เปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่าง *S_best* กับ *N*(*S_best*) เพื่อทำการกำหนดค่า *S_best* ในรอบการคำนวณต่อไป โดยสามารถแยกเป็นกรณีดังนี้

กรณี *N*(*S_best*) แย่กว่า *S_best* : หมายความว่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการค้นหาปัจจุบันไม่ดีกว่าคำตอบเดิม ซึ่งกรณีนี้คำตอบเดิมมีโอกาสเป็นคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังนั้นจึงกำหนดให้ *S_best* เท่ากับค่าเดิม โดยไม่พิจารณาความเป็นตาบู เนื่องจาก *S_best* มีโอกาสเป็น คำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น

กรณี *N*(*S_best*) ดีกว่า *S_best* : หมายความว่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการค้นหาปัจจุบันดีกว่าคำตอบเดิม ซึ่งกรณีนี้อาจอยู่ในเส้นทางที่มีโอกาสเดินไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง ดังนั้นจึงกำหนดให้ *S_best* เท่ากับ *N*(*S_best*) จากนั้นทำการตรวจสอบความเป็นตาบูของ *S_best* ว่ามีการเป็นตาบูหรือไม่ ถ้ามีการเป็นตาบูให้ทำการสุ่มเลือกชุดคำตอบจาก *N*(*S*) และกำหนดให้เท่ากับ *S_best* แทน *N*(*S_best*) ค่าเดิม เพื่อป้องกันปัญหาการเดินซ้ำซากที่อาจเกิดขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณี *N*(*S_best*) ดีเท่ากับ *S_best* : กรณีนี้อาจเป็นไปได้ว่า *N*(*S_best*) เป็นคำตอบเดิม ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับ *S_best* หรือ *N*(*S_best*) เป็นคำตอบคนละค่ากับ *S_best* ซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจาก *N*(*S_best*) มีหลายชุดคำตอบ ดังนั้นถ้าในกรณีที่ *N*(*S_best*) เป็นคำตอบเดิม ให้ทำการกำหนด *S_best* เท่ากับ *N*(*S_best*) โดยไม่พิจารณาความเป็นตาบู เนื่องจาก *S_best* มีโอกาสเป็น คำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น แต่ถ้าในกรณีที่ *N*(*S_best*) ไม่ใช่คำตอบเดิม ให้ทำการกำหนด *S_best* เท่ากับ *N*(*S_best*) เช่นกัน แต่พิจารณาความเป็นตาบูของ *S_best* ซึ่งถ้ามีการเป็นตาบูให้ทำการสุ่มเลือกชุดคำตอบจาก *N*(*S*) และกำหนดให้เท่ากับ *S_best* แทน *N*(*S_best*) ค่าเดิม

ขั้นตอนที่ 8 ในกรณีที่มีการซ้ำซากของ *S_best* ให้ทำการเพิ่มค่าการซ้ำซาก และทำการตรวจสอบค่าการซ้ำซากของชุดคำตอบ *S_best* ว่ามีค่าสูงเท่ากับจำนวนครั้งสูงสุดของการซ้ำซาก (*f_max*) หรือไม่ ถ้าไม่มีให้ข้ามไปยังขั้นต่อไป แต่ถ้ามีแสดงว่า *S_best* เป็นคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังนั้นจึงทำการเก็บ *S_best* ไว้ในเซตของชุดคำตอบ (*Ans_list*) เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างในขั้นตอนสุดท้าย โดยลักษณะของ *Ans_list* จะประกอบไปด้วยชุดคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 จากนั้นทำการกำหนดให้ *S_best* เท่ากับ *S0* ตามหลักการของการย้อนรอย

Ans_list =	
	$Local_1$
	$Local_2$
	:
	:
	$Local_{last}$

รูปที่ 4.5 รูปแบบการเก็บค่าของ Ans_list

ขั้นตอนที่ 9 ทำการเก็บค่า *S_best* ไว้ใน *Tabu_list* จากนั้นปรับปรุงค่าจำนวนนับรอบของการค้นหาให้เพิ่มขึ้น 1 รอบ

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบรอบของการค้นหาว่าครบตามจำนวนรอบของการค้นหาสูงสุด (*ite_max*) ที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าครบแล้วให้ไปยังขั้นตอนต่อไป แต่ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำซ้ำที่ขั้นตอนที่ 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนที่ 11 พิจารณาหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง โดยเลือกจากคำตอบที่มีคุณภาพดีที่สุดของ *Ans_list* ซึ่งจะอยู่ในรูปของเซตของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยกในระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยในตัวอย่างนี้สมมุติให้คำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นลำดับที่ 3 มีคุณภาพคำตอบดีที่สุด หรือมีจำนวนตำแหน่งในการแบ่งแยกบัสน้อยที่สุด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6

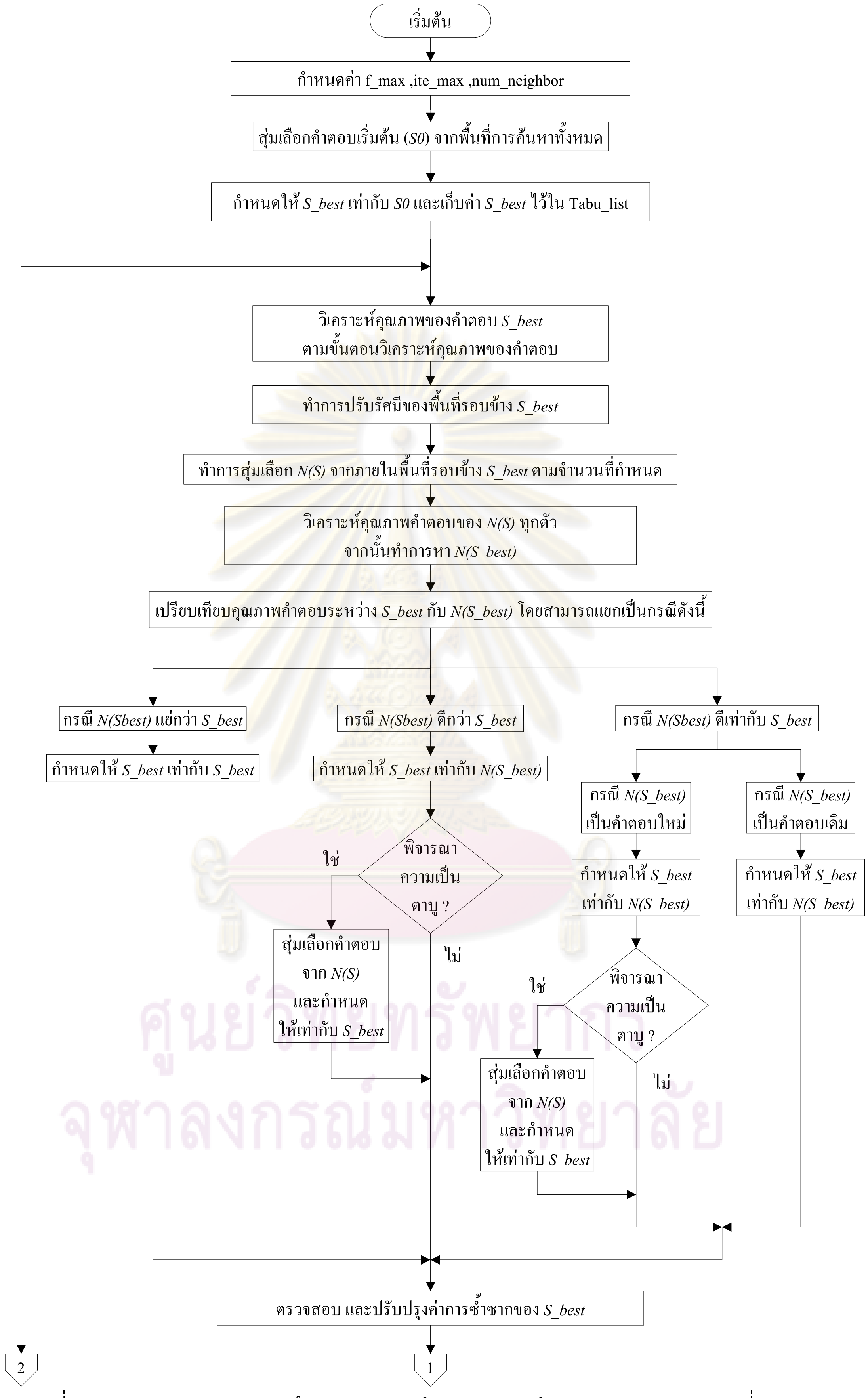
Ans_list =

11	*12*	*13*	= *Local* $_1$
11	*12*	*15*	= *Local* $_2$
0	*13*	*15*	= *Local* $_3$
3	*13*	*15*	= *Local* $_4$
13	*15*	*23*	= *Local* $_5$

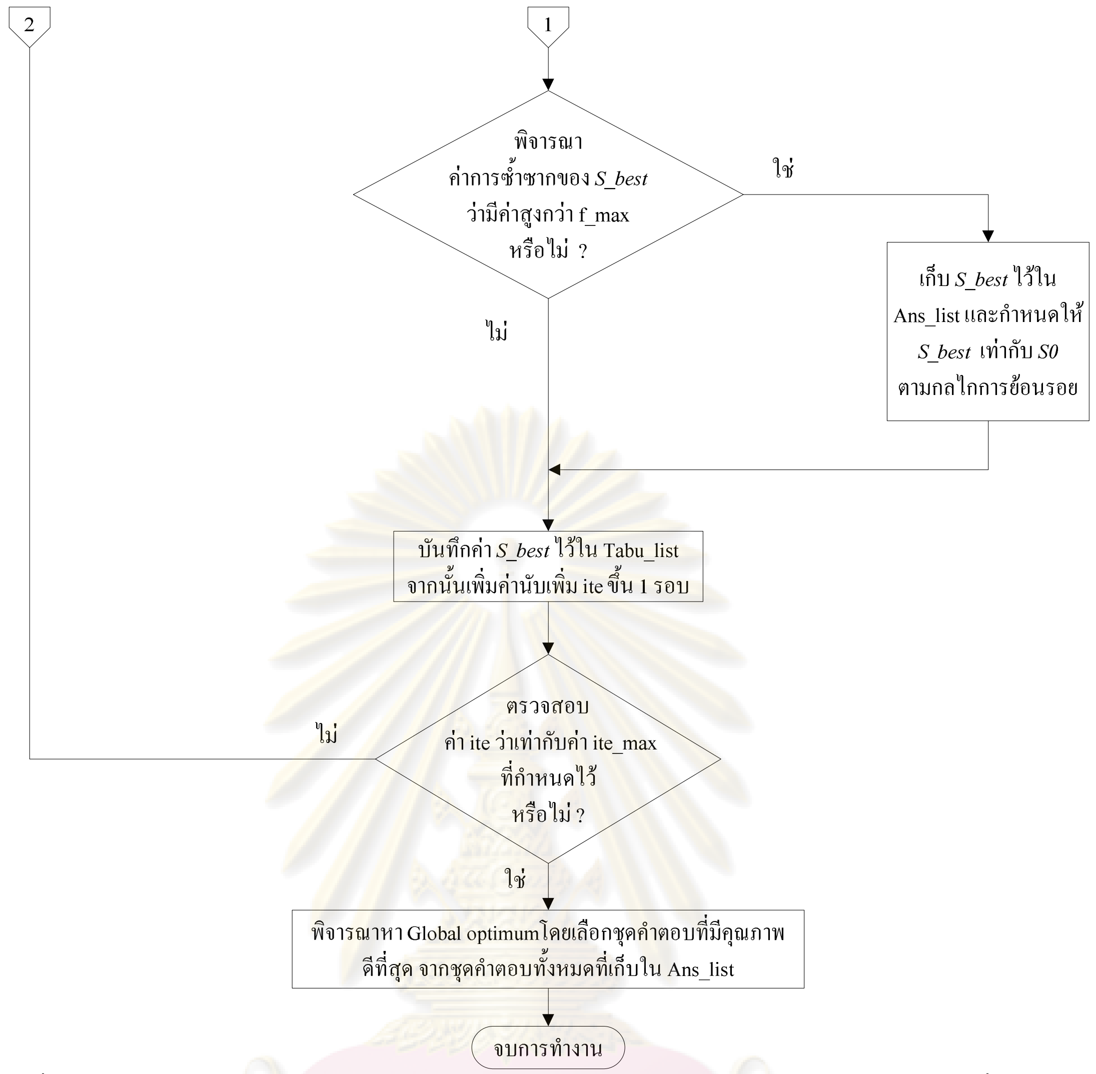
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการเลือกคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

จากขั้นตอนการแก้ปัญหาที่ได้อธิบายมาทั้ง 10 ขั้นตอน สามารถสรุปให้อยู่ในรูปแผนผังการทำงานของวิธีการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้วิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้ ดังรูปที่ 4.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงอัลกอริธึมของการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม



รูปที่ 4.7 (ต่อ) : แผนผังแสดงอัลกอริธึมของการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม

4.2.2.1 ขั้นตอนวิเคราะห์คุณภาพคำตอบ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการหนึ่งที่อยู่ในขั้นตอนการแก้ปัญหา (หัวข้อ 4.2.2.1 ขั้นตอนที่ 4) ซึ่งมีหน้าที่พิจารณาคุณภาพของการแบ่งแยกบัสแต่ละชุดคำตอบ สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 รับค่าชุดของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยกในระบบทดสอบ

ขั้นตอนที่ 2 เลือกบัสที่จะทำการแบ่งแยกในระบบทดสอบ โดยเรียงลำดับจากสมาชิกภายในชุดของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยก

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเงื่อนไขความเหมาะสมของบัสที่จะทำการแบ่งแยกตามหลักเกณฑ์ที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.2.1 ซึ่งถ้าบัสที่จะแบ่งแยกเป็นบัสที่ไม่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก ให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 4 ปรับปรุงข้อมูลบัส, สายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการแบ่งแยกบัส โดยในส่วนของการปรับปรุงข้อมูลสายส่งให้หลีกเลี่ยงการทำให้เกิดการแยกตัวของระบบ

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบว่าทำการแบ่งแยกบัสครบตามจำนวนในชุดของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยกหรือไม่ ถ้าครบแล้วให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าไม่ครบให้กลับไปทำซ้ำที่ขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 6 นำข้อมูลที่มีการปรับปรุงหลังจากมีการแบ่งแยกบัสในระบบ มาทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) โดยวิธีนิวตันราฟสัน

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบว่ามีการแบ่งแยกตัวของระบบเกิดขึ้นหรือไม่ ถ้าไม่มีให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แต่ถ้ามีให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 13

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าเกินช่วงพิกัดหรือไม่ ถ้าไม่เกินให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าเกินพิกัดให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 13

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบขนาดแรงดันที่แต่ละบัสว่าเกินช่วงพิกัดหรือไม่ ถ้าไม่เกินให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าเกินพิกัดให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 13

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่งหรือหม้อแปลง ว่าเกินพิกัดของสายส่งหรือหม้อแปลงหรือไม่ ถ้าไม่เกินให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าเกินพิกัดให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 13

ขั้นตอนที่ 11 ทำการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลของแต่ละบัส จากนั้นตรวจสอบค่ากระแสลัดวงจรที่บัสว่าเกินพิกัดที่ตั้งไว้หรือไม่ ถ้าไม่เกินให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าเกินพิกัดให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 13

ศูนย์วิทยทรัพยากร

ขั้นตอนที่ 12 ทำการวิเคราะห์ความมั่นคงของระบบ (Contingency analysis) ว่าผ่านเงื่อนไข n-1 หรือไม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนที่ 13 ทำการพิจารณาคุณภาพของชุดของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยกในระบบทดสอบ โดยกำหนดให้ Point คือ ตัวแปรชี้วัดคุณภาพของคำตอบ ซึ่งในการพิจารณาคุณภาพของคำตอบจะพิจารณาโดยเรียงลำดับความสำคัญจากจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์ และจำนวนบัสที่ทำการแบ่งแยกตามลำดับ โดยสำหรับการพิจารณาจากจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์จะทำการเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบอยู่ในหลักแสนของค่า Point ซึ่งมีระดับเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบดังนี้

กรณี $0 \leq \text{Point} < 100000$ คือ เกิดการแยกตัวขึ้นในระบบ เนื่องจากการแบ่งแยกบัส

กรณี $100000 \leq \text{Point} < 200000$ คือ มีการละเมิดเงื่อนไขเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าเกินช่วงพิกัด

กรณี $200000 \leq \text{Point} < 300000$ คือ มีการละเมิดเงื่อนไขขนาดแรงดันที่แต่ละบัสเกินช่วงพิกัด

กรณี $300000 \leq \text{Point} < 400000$ คือ มีการละเมิดเงื่อนไขขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่งหรือหม้อแปลงเกินค่าพิกัด

กรณี $400000 \leq \text{Point} < 500000$ คือ มีการละเมิดเงื่อนไขขนาดกระแสลัดวงจรแต่ละบัสเกินค่าพิกัด

กรณี $500000 \leq \text{Point} < 600000$ คือ มีการละเมิดเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

กรณี $600000 \leq \text{Point} < 700000$ คือ ผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง

ในการพิจารณาระดับเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบของจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์นี้จะเรียงลำดับตามความสะดวกในการตรวจสอบการละเมิดเงื่อนไขบังคับ โดยในท้ายที่สุดต้องการคำตอบที่ผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง ซึ่งมีคุณภาพคำตอบอยู่ที่ 600,000 ถึง 700,000

สำหรับการพิจารณาจากจำนวนตำแหน่งของบัสที่ทำการแบ่งแยกจะทำการเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบอยู่ในหลักหมื่นของค่า Point โดยในการค้นหาจะทำการกำหนดจำนวนตำแหน่งที่อนุญาตให้แบ่งแยกสูงสุด ซึ่งมีหลักในการวิเคราะห์คะแนนคือ ลำดับตำแหน่งที่ไม่มีการแบ่งแยกจะมีคะแนนมากกว่าลำดับของตำแหน่งที่มีการแบ่งแยก โดยมีระดับเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบดังนี้

ตำแหน่งบัสที่มีการแบ่งแยก คิดเป็น Point เท่ากับ 10000

ตำแหน่งบัสที่ไม่มีการแบ่งแยก คิดเป็น Point เท่ากับ 20000

จากกระบวนการพิจารณาคุณภาพคำตอบจะเห็นว่าคำตอบที่มีค่า Point รวมของการพิจารณาจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์ และจำนวนบัสที่ทำการแบ่งแยก ที่มีค่ามากหมายความว่าคำตอบมีคุณภาพดี ซึ่งตรงตามความหมายของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้โดยในกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส สามารถแสดงตัวอย่างการพิจารณาคุณภาพคำตอบได้ดังนี้

<u>ตัวอย่างที่ 1</u> : กำหนดให้จำนวนตำแหน่งที่อนุญาตให้แบ่งแยกสูงสุดเท่ากับ 3 ตำแหน่ง ซึ่งทำการแบ่งแยกบัสแบบถาวรจำนวนทั้งหมด 3 บัสในระบบ กำหนดให้การแบ่งแยกบัส ตามคำตอบนี้ทำให้ระบบผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง ซึ่งมีคุณภาพคำตอบดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตำแหน่ง 1	ตำแหน่ง 2	ตำแหน่ง 3
13	15	23

Point **จากจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์** (Constraint Point) : การแบ่งแยกบัส ตามคำตอบนี้ทำให้ระบบผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง ดังนั้น Constraint Point = 600000
Point **จากจำนวนตำแหน่งของบัสที่ทำการแบ่งแยก** (Bus Point) : การแบ่งแยกบัส ตามคำตอบนี้,มีตำแหน่งที่ทำการแบ่งแยกทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ดังนั้น Bus Point = 3*10000 = 30000

เพราะฉะนั้นคุณภาพคำตอบรวมของคำตอบนี้ คือ ค่ารวมของ Point ทั้ง 2 ชนิด เท่ากับ
Constraint Point+Bus Point = 600000+30000= **630000**

ตัวอย่างที่ 2 : กำหนดให้จำนวนตำแหน่งที่อนุญาตให้แบ่งแยกสูงสุดเท่ากับ 3 ตำแหน่ง ซึ่งทำการแบ่งแยกบัสแบบถาวรจำนวนทั้งหมด 2 บัสในระบบ กำหนดให้การแบ่งแยกบัส ตามคำตอบนี้ทำให้ระบบผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง ซึ่งมีคุณภาพคำตอบดังนี้

ตำแหน่ง 1	ตำแหน่ง 2	ตำแหน่ง 3
0	13	15

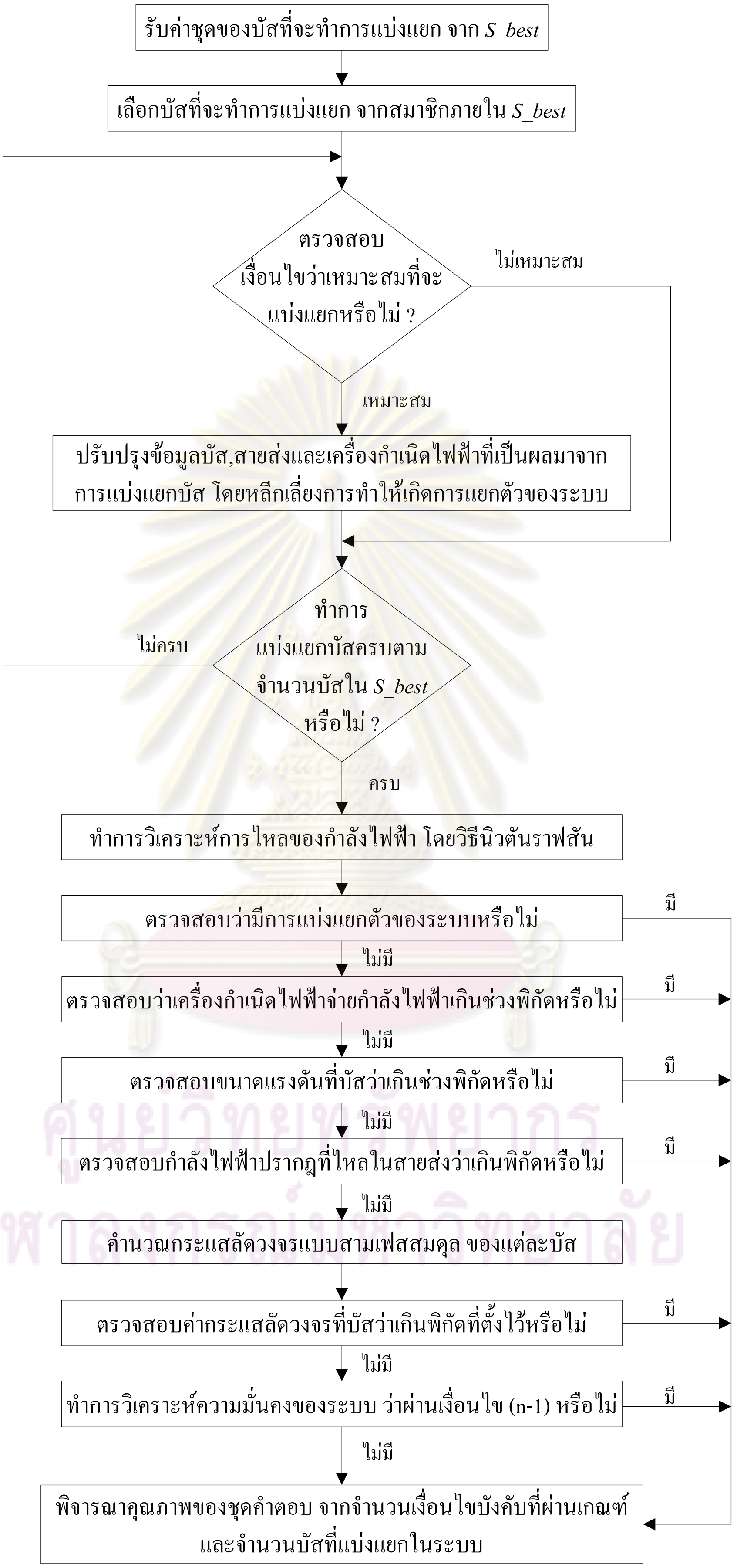
Point **จากจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์** (Constraint Point) : การแบ่งแยกบัส ตามคำตอบนี้ทำให้ระบบผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง ดังนั้น Constraint Point = 600000
Point **จากจำนวนตำแหน่งของบัสที่ทำการแบ่งแยก** (Bus Point) : การแบ่งแยกบัส ตามคำตอบนี้,มีตำแหน่งที่ทำการแบ่งแยกทั้งหมด 2 ตำแหน่ง ดังนั้น Bus Point = 2*10000 + 1*20000= 40000

เพราะฉะนั้นคุณภาพคำตอบรวมของคำตอบนี้ คือ ค่ารวมของ Point ทั้ง 2 ชนิด เท่ากับ
Constraint Point+Bus Point = 600000+40000= **640000**

จากตัวอย่างทั้ง 2 สังเกตได้ว่าคำตอบที่มีคุณภาพคำตอบที่ดีที่สุดจะมีคุณสมบัติ คือ ทำให้ระบบผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง และมีจำนวนตำแหน่งในการแบ่งแยกที่น้อยที่สุด ซึ่งมีคุณสมบัติตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยจะเห็นได้จาก คุณภาพคำตอบที่ได้ในตัวอย่างที่ 2 ซึ่งใช้จำนวนการแบ่งแยกบัสเพียง 2 ตำแหน่ง มีคุณภาพคำตอบรวมที่ดีกว่าตัวอย่างที่ 1 ซึ่งใช้จำนวนการแบ่งแยกมากกว่า คือ 3 ตำแหน่ง

จากขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบที่ได้อธิบายมาทั้ง 13 ขั้นตอน สามารถสรุปให้อยู่ในรูปแผนผังการทำงาน ดังรูปที่ 4.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 แผนผังแสดงอัลกอริธึมการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

4.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

จากการที่ได้นำเสนอการติดตั้ง CLR เชื่อมโยงระหว่างบัส แทนการแบ่งแยกบัสแบบถาวร ในหัวข้อ 3.5 จะเห็นว่าการประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวจะทำให้ในการพิจารณาเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบเมื่อทำการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงมีความยืดหยุ่นในการพิจารณามากกว่า ในแง่ความมั่นคงของระบบ โดยสำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวรร่วมกับการติดตั้ง CLR ในการแก้ปัญหา มีรายละเอียดของรูปแบบปัญหาที่ใช้พิจารณา และกระบวนการในการแก้ปัญหาดังนี้

4.3.1 รูปแบบของปัญหา สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

ปัญหาการกำหนดตำแหน่งและขนาดของการติดตั้ง CLR ที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดกระแสลัดลงวงจรสูง ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ถือเป็นปัญหา NP-Hard แบบปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงผสมผสาน โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขบังคับ ดังนี้

4.3.1.1 ฟังชันก์วัตถุประสงค์ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

วัตถุประสงค์ของปัญหา คือ ต้องการหาตำแหน่งของบัส X_b ที่จะทำการติดตั้ง CLR ซึ่งมีขนาดเท่ากับ C_k เพื่อลดกระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยให้มีจำนวนตำแหน่งของการแบ่งแยกบัสหรือการติดตั้ง CLR และจำนวนขนาดรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้งน้อยที่สุด เพื่อลดจำนวนเงินลงทุนสำหรับการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงในระบบ ซึ่งแปรผันตรงกับจำนวนตำแหน่งการติดตั้ง และจำนวนขนาดรวมของการติดตั้ง CLR

สมการที่ 4.13 แสดงเซตตำแหน่งของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยก m โดยมีสมาชิกเป็นตำแหน่งบัสที่ต้องทำการติดตั้ง X_b และสมการ 4.14 แสดงเซตขนาดของ CLR ซึ่งมีขนาดเท่ากับ C_k สำหรับทำการติดตั้งที่ตำแหน่ง X_k

สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ 4.15 แสดงถึงความต้องการหาจำนวนตำแหน่งในการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ที่น้อยที่สุดซึ่งแสดงในพจน์แรกของสมการที่ 4.15 โดยจำนวนตำแหน่งในการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR จะถูกหาค่าที่น้อยที่สุดในหน่วยของเลขจำนวนเต็มอย่างเช่น 1, 2, 3, 4 หรือ 5 ตำแหน่ง และในพจน์ที่สองของสมการที่ 4.15 แสดงถึงความต้องการหาขนาดรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้งที่มีค่าน้อยที่สุด โดยผลรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้งในแต่ละตำแหน่ง จะอยู่ในรูปผลรวมของเลขทศนิยมระหว่าง 0 pu. ถึง 0.1 pu. ซึ่งเป็นช่วงของขนาด

CLR ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรมาก จากที่ได้ทำการทดสอบในหัวข้อ 3.5 โดยกรณีที่ขนาดของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้งเท่ากับ 0 pu. หมายความว่าที่ตำแหน่งดังกล่าวไม่ได้ทำการติดตั้ง CLR ซึ่งในกรณีทดสอบนี้จะหมายถึงทำการแบ่งแยกบัสแบบถาวรที่ตำแหน่งดังกล่าว

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในกรณีนี้กำหนดให้จำนวนตำแหน่งสูงสุดในการแบ่งแยกหรือติดตั้ง CLR ไม่เกิน 9 ตำแหน่ง ซึ่งจำนวน 9 ตำแหน่งนี้ เป็นจำนวนที่จะไม่ทำให้เกิดความสับสนในการพิจารณาลำดับความสำคัญระหว่างจำนวนตำแหน่งที่ใช้ในการแบ่งแยกหรือติดตั้ง กับจำนวนขนาดรวมรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง หรืออีกความหมายหนึ่งคือจะไม่ทำให้เกิดความสับสนในการพิจารณาลำดับความสำคัญระหว่างเลขจำนวนเต็ม กับเลขจำนวนจุดทศนิยม

$$m = \{X_b \in \{1,2,...,nbus\} \mid X_b \text{ is a bus installing.}\} \qquad (4.13)$$

$$n = \{C_k \in \{0,0.001,0.002,...,0.099,0.1\} \mid C_k \text{ is a size of CLR..}\} \qquad (4.14)$$

$$Minimize\ \ b + \sum_{k=1}^{b} C_k \qquad (4.15)$$

เมื่อพิจารณาการให้ความสำคัญในการค้นหาของฟังชันก์วัตถุประสงค์ในสมการ 4.15 จะเห็นว่าความต้องการของการหาจำนวนตำแหน่งในการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ที่น้อยที่สุดมีความสำคัญมากกว่าความต้องการหาจำนวนขนาดรวมในการติดตั้ง CLR ที่น้อยที่สุด เพราะจำนวนตำแหน่งในการแบ่งแยกหรือติดตั้ง CLR จะมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม ส่วนผลรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้งจะมีค่าเป็นเลขทศนิยมทำให้มีความสำคัญน้อยกว่า โดยสาเหตุที่การหาจำนวนขนาดที่น้อยที่สุดมีความสำคัญกว่า เนื่องจากในทางปฏิบัติจริง การปรับปรุงแก้ไขบัสภายในสถานีไฟฟ้าหลายๆ ตำแหน่งเป็นเรื่องที่มีความยุ่งยากมาก ดังนั้นการปรับปรุงแก้ไขในสถานีไฟฟ้าน้อยตำแหน่งจึงมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติจริงมากกว่าการปรับปรุงแก้ไขในสถานีไฟฟ้ามากตำแหน่ง ถึงแม้การปรับปรุงแก้ไขในสถานีไฟฟ้ามากตำแหน่งจะใช้ขนาดรวมของ CLR ในการติดตั้งมากกว่าก็ตาม

4.3.1.2 เงื่อนไขบังคับ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

เงื่อนบังคับ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวร ร่วมกับการติดตั้งสามารถใช้เงื่อนไขบังคับเดียวกันกับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวรดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.1.2

4.3.2 กระบวนการในการแก้ปัญหา สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนการแก้ปัญหา จะขอกล่าวถึงความหมายของศัพท์ที่สำคัญที่ใช้ในการอธิบายขั้นตอนการทำงาน ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในระเบียบวิธีในการแก้ปัญหา สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวร

ขั้นตอนของการแก้ปัญหาที่เพิ่มเติมเข้าไปในขั้นตอนการแก้ปัญหาของการประยุกต์ใช้การแบ่งแบ่งแยกบัสแบบถาวร สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ ประกอบด้วยขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยประยุกต์ ATS และขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.2.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยประยุกต์ ATS สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

เป็นขั้นตอนหลักในการแก้ปัญหาการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวรร่วมกับการติดตั้ง CLR สามารถแบ่งออกได้เป็นขั้นตอนหลักๆ ตามลำดับดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการหาชุดคำตอบที่เป็นตำแหน่งของบัสที่จะทำการแบ่งแยก เพื่อทำให้กระแสลัดวงจรไม่เกินพิกัดที่ตั้งไว้ โดยทำตามขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยประยุกต์ใช้ ATS สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวร ซึ่งอธิบายในหัวข้อ 4.2.2.1 และวิเคราะห์คุณภาพคำตอบตามขั้นตอนที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.2.2.2 แต่ทำการตรวจสอบเฉพาะค่ากระแสลัดวงจรว่าเกินพิกัดหรือไม่เพียงอย่างเดียว

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อคำนวณครบรอบของการคำนวณของขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยประยุกต์ใช้ ATS สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวร หลังจากนั้นให้คัดเลือกชุดคำตอบที่มีคุณภาพผ่านเงื่อนไขกระแสลัดวงจร โดยพิจารณาจากใน *Tabu_list* หลังจากคำนวณครบรอบการคำนวณ จากนั้นทำการเก็บรวบรวมไว้ที่ *Locate_list* ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.9 เพื่อเป็นตัวแปรตำแหน่งในการแบ่งแยกบัส หรือการติดตั้ง CLR สำหรับกระบวนการหาขนาดของ CLR ที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งที่แต่ละตำแหน่งในลำดับถัดไป

Locate_list =

$X_{1,1}$	$X_{1.2}$	$X_{1,3}$
$X_{2,1}$	$X_{2,1}$	$X_{2,3}$
$X_{3,1}$	$X_{3,2}$	$X_{3,3}$
:		
:		
$X_{n,1}$	$X_{n,2}$	$X_{n,3}$

รูปที่ 4.9 รูปแบบการเก็บค่าของ Locate_list

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่า จำนวนครั้งสูงสุดของการซ้ำซาก (*f_max*) ,จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด (*ite_max*) ,จำนวนสมาชิกชุดคำตอบการแบ่งแยกบัสภายในพื้นที่รอบข้าง (*num_neighbor*)

ขั้นตอนที่ 4 ทำการสุ่มชุดตำแหน่งของบัสที่จะทำการแบ่งแยกจากใน *Locate_list* และทำการสุ่มขนาดของ CLR ที่จะทำการติดตั้งในแต่ละตำแหน่ง (C_i) ซึ่งจะอยู่ในรูปของเซตของตำแหน่งบัสที่ทำการแบ่งแยก และเซตของขนาด CLR ที่จะทำการติดตั้งเริ่มต้น (*S0*) และทำการกำหนดชุดคำตอบที่ดีที่สุด (*S_best*) ให้เท่ากับ *S0* แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.10

S0 = | X_1 | X_2 | X_3 | C_1 | C_2 | C_3 | = *S_best*

S0 =	X_1	X_2	X_3	C_1	C_2	C_3	= *S_best*

รูปที่ 4.10 รูปแบบการกำหนดตำแหน่ง และขนาดการติดตั้ง CLR เริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 5 ทำการบันทึกค่า *S_best* ไว้ใน *Tabu_list* ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.2 โดยจะมีจำนวนชุด *S_best* สูงสุดเท่ากับจำนวนรอบในการคำนวณ ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อเอาไว้ใช้พิจารณาความเป็นตาบูของเส้นทางที่จะเดินไปสู่คำตอบที่เหมาะสม หรือเอาไว้ใช้ตรวจสอบเส้นทางเดินที่ต้องห้าม เพื่อเพิ่มโอกาสหลุดจากคำตอบที่เหมาะสมแบบเฉพาะถิ่นตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.5.2

ขั้นตอนที่ 6 วิเคราะห์คุณภาพคำตอบของ *S_best* ตามวิธีการที่จะนำเสนอในลำดับถัดไป จากนั้นทำการปรับรัศมีของพื้นที่รอบข้าง *S_best* ตามคุณภาพของคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งขั้นตอนนี้เปรียบเสมือนกลไกการปรับรัศมีตามที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้

สำหรับวิธีการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบสำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวร ร่วมกับการติดตั้ง CLR สามารถแสดงได้ดังหัวข้อ 4.3.2.2 ในลำดับถัดไป

ขั้นตอนที่ 7 ทำการสร้างสมาชิกชุดคำตอบการแบ่งแยกบัสรอบข้าง (*N*(*S*)) ให้ครบตามจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง (*num_neighbor*) ที่กำหนดไว้ โดยสร้างจากการสุ่มภายใน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พื้นที่รอบข้างของ *S_best* ซึ่งจำนวนชุดคำตอบสูงสุดของ *N*(*S*) จะมีค่าเท่ากับจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.11

N(S) =

$X_{1,1}$	$X_{1.2}$	$X_{1,3}$	$C_{1,1}$	$C_{1.2}$	$C_{1,3}$
$X_{2,1}$	$X_{2,1}$	$X_{2,3}$	$C_{2,1}$	$C_{2,1}$	$C_{2,3}$
$X_{3,1}$	$X_{3,2}$	$X_{3,3}$	$C_{3,1}$	$C_{3,2}$	$C_{3,3}$
:			:		
:			:		
$X_{n,1}$	$X_{n,2}$	$X_{n,3}$	$C_{n,1}$	$C_{n,2}$	$C_{n,3}$

รูปที่ 4.11 รูปแบบการเก็บค่าของสมาชิกชุดคำตอบรอบข้าง ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

ขั้นตอนที่ 8 วิเคราะห์คุณภาพของ *N*(*S*) ทุกชุดคำตอบ จากนั้นพิจารณาหาชุดคำตอบการแบ่งแยกบัสที่ดีที่สุด (*N*(*S_best*)) โดยในตัวอย่างนี้สมมุติให้ชุดคำตอบลำดับที่ 41 เป็นชุดคำตอบที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12

N(S_best) =

$X_{41,1}$	$X_{41.2}$	$X_{41,3}$	$C_{41,1}$	$C_{41.2}$	$C_{41,3}$

รูปที่ 4.12 รูปแบบการเก็บค่าของสมาชิกชุดคำตอบที่ดีที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

ขั้นตอนที่ 7 เปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่าง *S_best* กับ *N*(*S_best*) เพื่อทำการกำหนดค่า *S_best* ในรอบการคำนวณต่อไป โดยสามารถแยกเป็นกรณีดังนี้

กรณี *N*(*S_best*) แย่กว่า *S_best* : หมายความว่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการค้นหาปัจจุบันไม่ดีกว่าคำตอบเดิม ซึ่งกรณีนี้คำตอบเดิมมีโอกาสเป็นคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังนั้นจึงกำหนดให้ *S_best* เท่ากับค่าเดิม โดยไม่พิจารณาความเป็นตาบู เนื่องจาก *S_best* มีโอกาสเป็น คำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น

กรณี *N*(*S_best*) ดีกว่า *S_best* : หมายความว่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการค้นหาปัจจุบันดีกว่าคำตอบเดิม ซึ่งกรณีนี้อาจอยู่ในเส้นทางที่มีโอกาสเดินไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง ดังนั้นจึงกำหนดให้ *S_best* เท่ากับ *N*(*S_best*) จากนั้นทำการตรวจสอบความเป็นตาบูของ *S_best* ว่ามีการเป็นตาบูหรือไม่ ถ้ามีการเป็นตาบูให้ทำการสุ่มเลือกชุดคำตอบจาก *N*(*S*)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และกำหนดให้เท่ากับ *S_best* แทน *N*(*S_best*) ค่าเดิม เพื่อป้องกันปัญหาการเดินซ้ำซากที่อาจเกิดขึ้น

กรณี *N*(*S_best*) ดีเท่ากับ *S_best* : กรณีนี้อาจเป็นไปได้ว่า *N*(*S_best*) เป็นคำตอบเดิม ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับ *S_best* หรือ *N*(*S_best*) เป็นคำตอบคนละค่ากับ *S_best* ซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจาก *N*(*S_best*) มีหลายชุดคำตอบ ดังนั้นถ้าในกรณีที่ *N*(*S_best*) เป็นคำตอบเดิม ให้ทำการกำหนด *S_best* เท่ากับ *N*(*S_best*) โดยไม่พิจารณาความเป็นตาบู เนื่องจาก *S_best* มีโอกาสเป็น คำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น แต่ถ้าในกรณีที่ *N*(*S_best*) ไม่ใช่คำตอบเดิม ให้ทำการกำหนด *S_best* เท่ากับ *N*(*S_best*) เช่นกัน แต่พิจารณาความเป็นตาบูของ *S_best* ซึ่งถ้ามีการเป็นตาบูให้ทำการสุ่มเลือกชุดคำตอบจาก *N*(*S*) และกำหนดให้เท่ากับ *S_best* แทน *N*(*S_best*) ค่าเดิม

ขั้นตอนที่ 8 ในกรณีที่มีการซ้ำซากของ *S_best* ให้ทำการเพิ่มค่าการซ้ำซาก และทำการตรวจสอบค่าการซ้ำซากของชุดคำตอบ *S_best* ว่ามีค่าสูงเท่ากับจำนวนครั้งสูงสุดของการซ้ำซาก (*f_max*) หรือไม่ ถ้าไม่มีให้ข้ามไปยังขั้นต่อไป แต่ถ้ามีแสดงว่า *S_best* เป็นคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังนั้นจึงทำการเก็บ *S_best* ไว้ในเซตของชุดคำตอบ (*Ans_list*) เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างในขั้นตอนสุดท้าย โดยลักษณะของ *Ans_list* จะประกอบไปด้วยชุดคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 จากนั้นทำการกำหนดให้ *S_best* เท่ากับ *S0* ตามหลักการของการย้อนรอย

ขั้นตอนที่ 9 ทำการเก็บค่า *S_best* ไว้ใน *Tabu_list* จากนั้นปรับปรุงค่าจำนวนนับรอบของการค้นหาให้เพิ่มขึ้น 1 รอบ

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบรอบของการค้นหาว่าครบตามจำนวนรอบของการค้นหาสูงสุด (*ite_max*) ที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าครบแล้วให้ไปยังขั้นตอนต่อไป แต่ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำซ้ำที่ขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 11 พิจารณาหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง โดยเลือกจากคำตอบที่มีคุณภาพดีที่สุดของ *Ans_list* ซึ่งจะอยู่ในรูปเซตของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า และขนาดของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้งแต่ละตำแหน่ง โดยในตัวอย่างนี้สมมุติให้คำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นลำดับที่ 3 มีคุณภาพคำตอบดีที่สุด คือมีจำนวนตำแหน่งในการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR น้อยที่สุด และมีขนาดรวมของ CLR ที่นำมาติดตั้งในแต่ละตำแหน่งน้อยที่สุด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.13

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Ans_list =	*11*	*12*	*13*	*0.05*	*0.005*	*0.01*	= *Local* $_1$
	11	*12*	*15*	*0.002*	*0.002*	*0.005*	= *Local* $_2$
	0	*13*	*15*	*0*	*0.01*	*0.005*	= *Local* $_3$
	3	*13*	*15*	*0.001*	*0.01*	*0.005*	= *Local* $_4$
	13	*15*	*23*	*0.03*	*0.005*	*0.1*	= *Local* $_5$

รูปที่ 4.13 ตัวอย่างการเลือกคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

จากขั้นตอนการแก้ปัญหาที่ได้อธิบายมาทั้ง 11 ขั้นตอน สามารถแบ่งแยกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนกระบวนการหาชุดคำตอบตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่มีคุณภาพผ่านเงื่อนไขกระแสลัดวงจร ซึ่งอยู่ในขั้นตอนที่ 1 และส่วนกระบวนการหาขนาดของ CLR ที่น้อยที่สุดสำหรับนำไปติดตั้งที่ตำแหน่งที่ทำการแบ่งแยก ซึ่งอยู่ในขั้นตอนที่ 2 ถึง 11 โดยขั้นตอนแก้ปัญหาทั้ง 2 ส่วนสามารถสรุปให้อยู่ในรูปในรูปแผนผังสำหรับการแก้ปัญหาโดยประยุกต์ใช้วิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้ ดังรูปที่ 4.7

4.3.2.2 **ขั้นตอนวิเคราะห์คุณภาพคำตอบ สำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR**

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการหนึ่งที่อยู่ในขั้นตอนการแก้ปัญหา (หัวข้อ 4.3.2.1 ขั้นตอนที่ 6) ซึ่งมีหน้าที่พิจารณาคุณภาพคำตอบ สำหรับตำแหน่งและขนาดการติดตั้ง CLR หรือตำแหน่งการแบ่งแยกบัสของแต่ละชุดคำตอบ สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 รับค่าชุดตำแหน่งของบัส และขนาดของ CLR ที่จะทำการติดตั้ง ณ ตำแหน่งนั้นๆ ในระบบทดสอบ

ขั้นตอนที่ 2 ปรับปรุงข้อมูลบัส, สายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการแบ่งแยกบัสแบบถาวร หรือการติดตั้ง CLR โดยในส่วนของการปรับปรุงข้อมูลสายส่งให้หลีกเลี่ยงการทำให้เกิดการแยกตัวของระบบ

ขั้นตอนที่ 3 นำข้อมูลที่มีการปรับปรุงหลังจากมีการแบ่งแยกบัสในระบบ มาทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) โดยวิธีนิวตันราฟสัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบว่ามีการแบ่งแยกตัวของระบบเกิดขึ้นหรือไม่ ถ้าไม่มีให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แต่ถ้ามีให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 10

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าเกินช่วงพิกัดหรือไม่ ถ้าไม่เกินให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าเกินพิกัดให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 10

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบขนาดแรงดันที่แต่ละบัสว่าเกินช่วงพิกัดหรือไม่ ถ้าไม่เกินให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าเกินพิกัดให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 10

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่งหรือหม้อแปลง ว่าเกินพิกัดของสายส่งหรือหม้อแปลงหรือไม่ ถ้าไม่เกินให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าเกินพิกัดให้ไปยังขั้นตอนที่ 10

ขั้นตอนที่ 8 ทำการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลของแต่ละบัส จากนั้นตรวจสอบค่ากระแสลัดวงจรที่บัสว่าเกินพิกัดที่ตั้งไว้หรือไม่ ถ้าไม่เกินให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าเกินพิกัดให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 10

ขั้นตอนที่ 9 ทำการวิเคราะห์ความมั่นคงของระบบ (Contingency analysis) ว่าผ่านเงื่อนไข n-1 หรือไม่

ขั้นตอนที่ 10 ทำการพิจารณาคุณภาพของชุดของตำแหน่งบัส และขนาดของ CLR ที่ต้องทำการติดตั้งในระบบทดสอบ โดยกำหนดให้ Point คือ ตัวแปรชี้วัดคุณภาพของคำตอบ ซึ่งในการพิจารณาคุณภาพของคำตอบ จะพิจารณาโดยเรียงลำดับความสำคัญจากจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์ จำนวนตำแหน่งของบัสที่ทำการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR และจำนวนขนาดรวมของ CLR ที่ทำการติดตั้งตามลำดับ โดยสำหรับการพิจารณาจากจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์ จะทำการเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบอยู่ในหลักแสนของค่า Point ซึ่งมีระดับเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบดังนี้

กรณี $0 \leq$ Point $<$ 100000 คือ เกิดการแยกตัวขึ้นในระบบ เนื่องจากการแบ่งแยกบัส

กรณี 100000 $\leq$ Point $<$ 200000 คือ มีการละเมิดเงื่อนไขเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าเกินช่วงพิกัด

กรณี 200000 $\leq$ Point $<$ 300000 คือ มีการละเมิดเงื่อนไขขนาดแรงดันที่แต่ละบัสเกินช่วงพิกัด

กรณี 300000 $\leq$ Point $<$ 400000 คือ มีการละเมิดเงื่อนไขขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่งหรือหม้อแปลงเกินค่าพิกัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณี $400000 \leq \text{Point} < 500000$ คือ มีการละเมิดเงื่อนไขขนาดกระแสลัดวงจรแต่ละบัสเกินค่าพิกัด

กรณี $500000 \leq \text{Point} < 600000$ คือ มีการละเมิดเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

กรณี $600000 \leq \text{Point} < 700000$ คือ ผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง

ในการพิจารณาระดับเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบของจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์นี้ จะเรียงลำดับตามความสะดวกในการตรวจสอบการละเมิดเงื่อนไขบังคับ โดยในท้ายที่สุดต้องการคำตอบที่ผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง ซึ่งมีคุณภาพคำตอบอยู่ที่ 600,000 ถึง 700,000

สำหรับการพิจารณาจากจำนวนตำแหน่งของบัสที่ทำการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR จะทำการเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบอยู่ในหลักหมื่นของค่า Point โดยในการค้นหาจะทำการกำหนดจำนวนตำแหน่งที่อนุญาตให้แบ่งแยกหรือติดตั้ง CLR สูงสุด ซึ่งมีหลักในการวิเคราะห์คะแนนคือ ลำดับตำแหน่งที่ไม่มีการแบ่งแยกหรือติดตั้ง จะมีคะแนนมากกว่าลำดับของตำแหน่งที่มีการแบ่งแยกหรือติดตั้ง CLR โดยมีระดับเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบดังนี้

ตำแหน่งบัสที่มีการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR คิดเป็น Point เท่ากับ 10000

ตำแหน่งบัสที่ไม่มีการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR คิดเป็น Point เท่ากับ 20000

สำหรับการพิจารณาจากจำนวนขนาดรวมของ CLR ที่ทำการติดตั้ง จะทำการเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบอยู่ในหลักพันถึงหลักจุดทศนิยมของค่า Point โดยมีระดับเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบดังนี้

ในกรณีที่มีการติดตั้ง CLR ค่า Point ของขนาดรวม CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง คิดเป็น Point เท่ากับ $\frac{1}{Total\ \ CLR}$

ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง CLR ค่า Point ของขนาดรวม CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง คิดเป็น Point เท่ากับ 2000

จากกระบวนการพิจารณาคุณภาพคำตอบจะเห็นว่าคำตอบที่มีค่า Point รวมของการพิจารณาจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์ จำนวนบัสที่ทำการแบ่งแยก และจำนวนขนาดรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง ที่มีค่ามาก หมายความว่าคำตอบมีคุณภาพดีซึ่งตรงตามความหมายของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้โดยในกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR สามารถแสดงตัวอย่างการพิจารณาคุณภาพคำตอบได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ตัวอย่างที่ 1</u> : กำหนดให้จำนวนตำแหน่งที่อนุญาตให้แบ่งแยกสูงสุดเท่ากับ 3 ตำแหน่ง ซึ่งทำการติดตั้ง CLR จำนวนทั้งหมด 3 บัสในระบบ โดยมีค่าขนาดรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง เท่ากับ 0.033 pu. และกำหนดให้การติดตั้ง CLR ตามคำตอบนี้ทำให้ระบบผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง ซึ่งมีคุณภาพคำตอบดังนี้

ตำแหน่ง 1	ตำแหน่ง 2	ตำแหน่ง 3	CLR1 (pu.)	CLR2 (pu.)	CLR3 (pu.)	Total CLR (pu.)
13	15	23	0.007	0.025	0.001	0.033

Point จากจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์ (Constraint Point) : การติดตั้ง CLR ตามคำตอบนี้ทำให้ระบบผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง ดังนั้น Constraint Point = 600000

Point จากจำนวนตำแหน่งของบัสที่ทำการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR (Bus Point) : การติดตั้ง CLR ตามคำตอบนี้,มีตำแหน่งที่ทำการติดตั้งทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ดังนั้น Bus Point = 3*10000 = 30000

Point จากจำนวนขนาดรวมของ CLR ที่ทำการติดตั้ง CLR (CLR Point) : การติดตั้ง CLR ตามคำตอบนี้,มีขนาดรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้งเท่ากับ 0.033 pu. ดังนั้น CLR Point = 1/0.033 = 30.303

เพราะฉะนั้นคุณภาพคำตอบรวมของคำตอบนี้ คือ ค่ารวมของ Point ทั้ง 3 ชนิด เท่ากับ

Constraint Point + Bus Point + CLR Point = 600000+30000+30.303 = **630030.303**

<u>ตัวอย่างที่ 2</u> : กำหนดให้จำนวนตำแหน่งที่อนุญาตให้แบ่งแยกสูงสุดเท่ากับ 3 ตำแหน่ง ซึ่งทำการติดตั้ง CLR จำนวนทั้งหมด 2 บัสในระบบ โดยมีค่าขนาดรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง เท่ากับ 0.015 pu. และกำหนดให้การติดตั้ง CLR ตามคำตอบนี้ทำให้ระบบผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง ซึ่งมีคุณภาพคำตอบดังนี้

ตำแหน่ง 1	ตำแหน่ง 2	ตำแหน่ง 3	CLR1 (pu.)	CLR2 (pu.)	CLR3 (pu.)	Total CLR (pu.)
0	13	15	0	0.04	0.005	0.045

Point จากจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์ (Constraint Point) : การติดตั้ง CLR ตามคำตอบนี้ทำให้ระบบผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง ดังนั้น Constraint Point = 600000

Point จากจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ผ่านเกณฑ์ตำแหน่งของบัสที่ทำการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR (Bus Point) : การติดตั้ง CLR ตามคำตอบนี้,มีตำแหน่งที่ทำการติดตั้งทั้งหมด 2 ตำแหน่ง

และตำแหน่งที่ไม่ได้ติดตั้ง CLR ทั้งหมด 1 ตำแหน่ง ดังนั้น Bus Point = 2*10000 + 1*20000 = 40000

Point จากจำนวนขนาดรวมของ CLR ที่ทำการติดตั้ง CLR (CLR Point) : การติดตั้ง CLR ตามคำตอบนี้,มีขนาดรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้งเท่ากับ 0.045 pu. ดังนั้น CLR Point = 1/0.045 = 22.222

เพราะฉะนั้นคุณภาพคำตอบรวมของคำตอบนี้ คือ ค่ารวมของ Point ทั้ง 3 ชนิด เท่ากับ
Constraint Point + Bus Point + CLR Point = 600000+40000+22.222 = **640022.222**

จากตัวอย่างกระบวนการพิจารณาคุณภาพคำตอบข้างต้นทั้ง 2 ตัวอย่าง จะสังเกตได้ว่า คำตอบที่มีคุณภาพคำตอบที่ดีที่สุดจะมีคุณสมบัติ คือ ทำให้ระบบผ่านเกณฑ์เงื่อนไขบังคับทุกอย่าง มีจำนวนตำแหน่งในการแบ่งแยกบัส หรือติดตั้ง CLR น้อยที่สุด และมีขนาดรวมของการติดตั้ง CLR ที่น้อยที่สุด ซึ่งมีคุณสมบัติตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยจะเห็นได้จากเมื่อทำการเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบรวมที่ได้จากทั้ง 2 ตัวอย่างพบว่า คุณภาพคำตอบที่ได้ในตัวอย่างที่ 2 ซึ่งใช้จำนวนการแบ่งแยกบัสหรือติดตั้ง CLR เพียง 2 ตำแหน่ง มีคุณภาพคำตอบรวมที่ดีกว่าตัวอย่างที่ 1 ซึ่งใช้จำนวนการแบ่งแยกหรือติดตั้งมากกว่า คือ 3 ตำแหน่ง

จากขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบที่ได้อธิบายมาทั้ง 10 ขั้นตอน สามารถสรุปให้อยู่ในรูปแผนผังการทำงานดังรูปที่ 4.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.14 แผนผังแสดงอัลกอริธึมการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

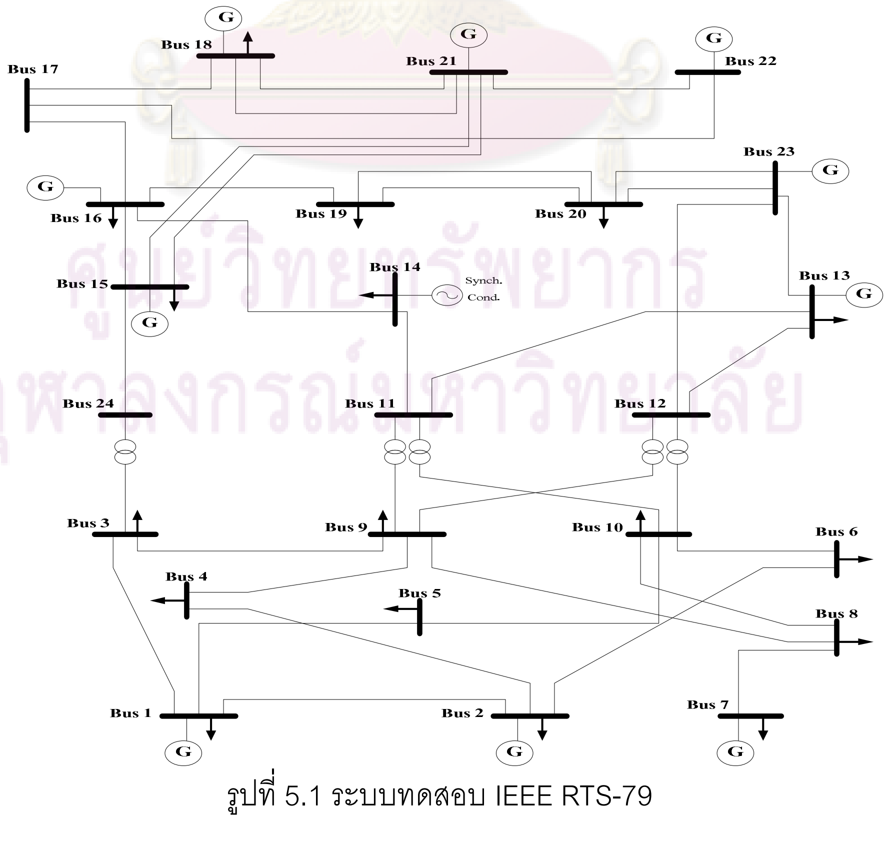
บทที่ 5

การทดสอบสมรรถนะ

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงการทดสอบโปรแกรมกำหนดตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดกระแสลัดลงวงจรสูงในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ตามที่ได้พัฒนาโปรแกรมตามวิธีที่นำเสนอในบทที่ 4 ซึ่งเนื้อหาภายในประกอบด้วยผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE RTS-79 และระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงในเขตกรุงเทพและปริมณฑลของ กฟผ. โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 การทดสอบระบบ IEEE RTS-79

สมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ถูกทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE RTS-79 [38] แสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งรายละเอียดที่สำคัญของระบบทดสอบ IEEE RTS-79 ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 33 เครื่อง ขนาดกำลังการผลิตรวม 3,405 MW และขนาดของโหลดรวมเท่ากับ 2,850 MW มีจำนวนบัสในระบบรวม 24 บัส โดยระบบประกอบด้วย 2 ระดับแรงดัน คือ 138 และ 230 kV ซึ่งจำลองการเกิดปัญหากระแสลัดวงจรเกินพิกัดของอุปกรณ์ที่บัสตามระบบของ กฟผ. คือ ขนาด 25 และ 50 kA สำหรับระดับแรงดันทั้งสองตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบ IEEE RTS-79

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับการทดสอบกับระบบทดสอบนี้ จะทำการทดสอบการแก้ปัญหาโดยแบ่งแยกเป็นกรณีใช้วิธีแบ่งแยกบัสแบบถาวร กรณีใช้วิธีการติดตั้ง CLR และกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสแบบถาวรร่วมกับการติดตั้ง CLR โดยผลการทดสอบนี้ยัง**ไม่นำเงื่อนไขความมั่นคงของระบบมาประกอบการพิจารณา** เนื่องจากระบบทดสอบไม่สามารถรองรับเงื่อนไข n-1 ได้สำหรับในกรณีฐาน ซึ่งจะทำให้ไม่มีคำตอบใดๆ ที่ผ่านเงื่อนไขบังคับทั้งหมด ซึ่งมีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

5.1.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

ในการทดสอบนี้ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของการแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ กับวิธีการแบ่งแยกบัสต่างๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน การทดสอบผลกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสแบบถาวรได้แบ่งเป็น 4 กรณี ได้แก่

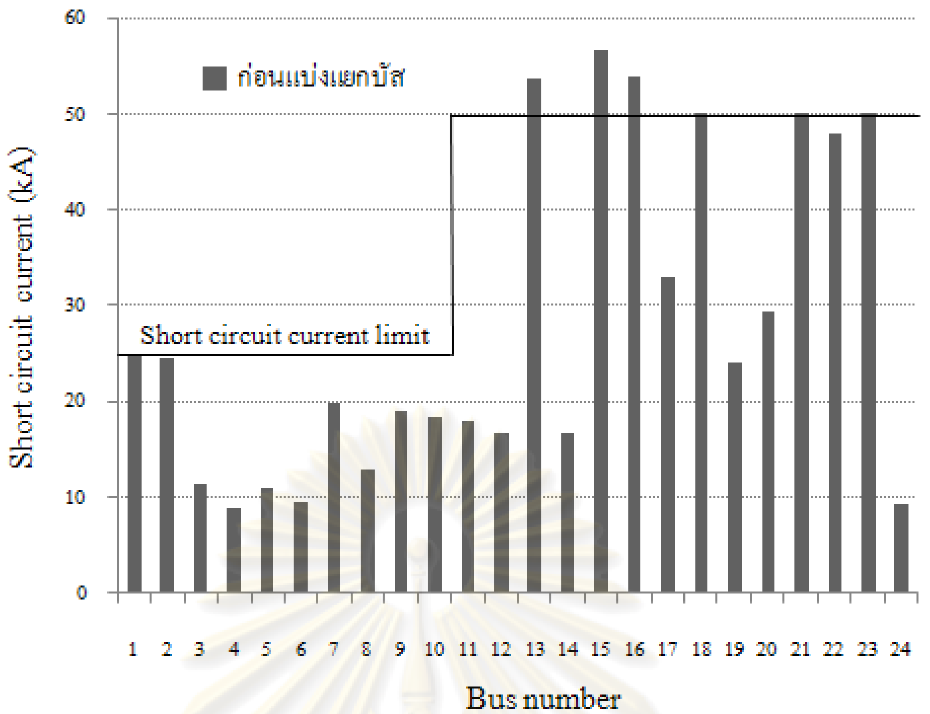
1) กรณีฐาน
2) กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกระแสลัดวงจรมากที่สุดในระบบ
3) กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมากในระบบ
4) กรณีแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ

โดยผลการทดสอบของแต่ละกรณี แสดงดังต่อไปนี้

5.1.1.1 กรณีฐาน

ไม่มีการแบ่งแยกบัสในระบบทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับต่างๆ ยกเว้นเงื่อนไขของกระแสลัดวงจรดังรูปที่ 5.2 เนื่องจากระบบทดสอบดั้งเดิมเป็นระบบทดสอบที่ปกติ ไม่มีปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัด ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงระบบทดสอบ ให้เกิดปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัด โดยทำการลดค่า Sub transient reactance ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ต่ำลง ซึ่งมีผลทำให้กระแสลัดวงจรที่บัสเพิ่มขึ้นจนสูงกว่าพิกัดกระแสลัดวงจร โดยบัสที่ 1 ถึง 10 มีพิกัดกระแสลัดวงจร เท่ากับ 25kA และบัสที่ 11 ถึง 24 มีพิกัดกระแสลัดวงจร เท่ากับ 50 kA สำหรับระดับแรงดัน 138 kV และ 230 kV ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



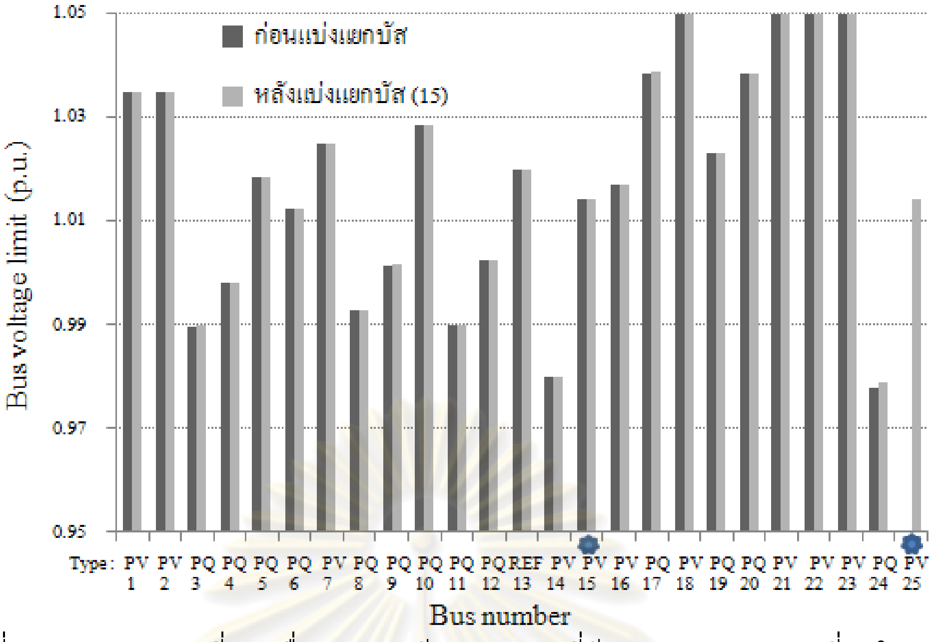
รูปที่ 5.2 ขนาดกระแสลัดวงจรของกรณีฐาน ซึ่งยังไม่มีการแบ่งแยกบัส

จากผลของขนาดกระแสลัดวงจรดังรูปที่ 5.2 จะเห็นว่า กรณีที่ไม่มีการแบ่งแยกบัส จะทำให้เกิดการเกินพิกัดของค่ากระแสลัดวงจรที่บัสรวมทั้งหมด 6 บัส คือ 13 ,15 ,16 ,18 ,21 และ 23

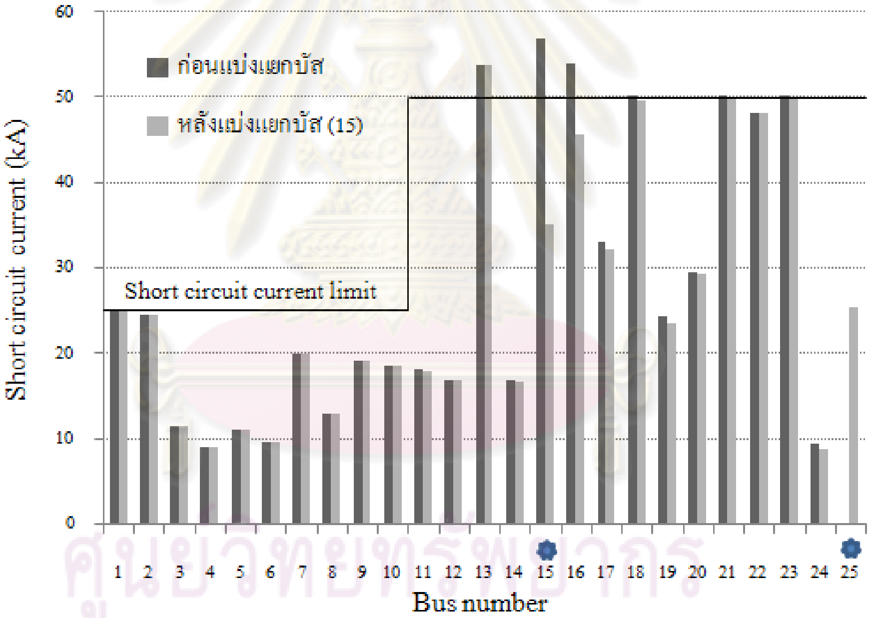
5.1.1.2 กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกระแสลัดวงจรมากที่สุดในระบบ

จากการทดสอบในกรณีฐานจะเห็นว่า บัสที่มีค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดในระบบ คือ บัสที่ 15 ซึ่งมีขนาดกระแสลัดวงจรมากที่สุด คือ 56.86 kA ดังนั้นจึงทำการแบ่งแยกบัสที่ 15 ในระบบทดสอบ ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ทั้งหมด 6 เครื่อง ขนาดกำลังการผลิตรวม 215 MW และขนาดของโหลดรวมเท่ากับ 317 MW ซึ่งแสดงผลของระดับแรงดันที่บัส และขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เปรียบเทียบกับกรณีฐานดังรูปที่ 5.3 และ 5.5 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 ขนาดแรงดันที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกระแสลัดวงจรมากที่สุดในระบบ



รูปที่ 5.4 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกระแสลัดวงจรมากที่สุดในระบบ

จากผลการทดสอบในกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกระแสลัดวงจรมากที่สุดในระบบ จะเห็นว่าไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับต่างๆ ยกเว้นเกิดการเกินพิกัดของค่ากระแสลัดวงจรที่บัสรวมทั้งหมด 2 บัส คือ บัสที่ 13 และ 23 ซึ่งถือว่าในกรณีจำนวนของบัสที่มีค่ากระแสลัดวงจรเกินพิกัดลดลงจากกรณีฐานซึ่งมีบัสที่มีค่ากระแสลัดวงจรเกินพิกัดถึง 6 บัส

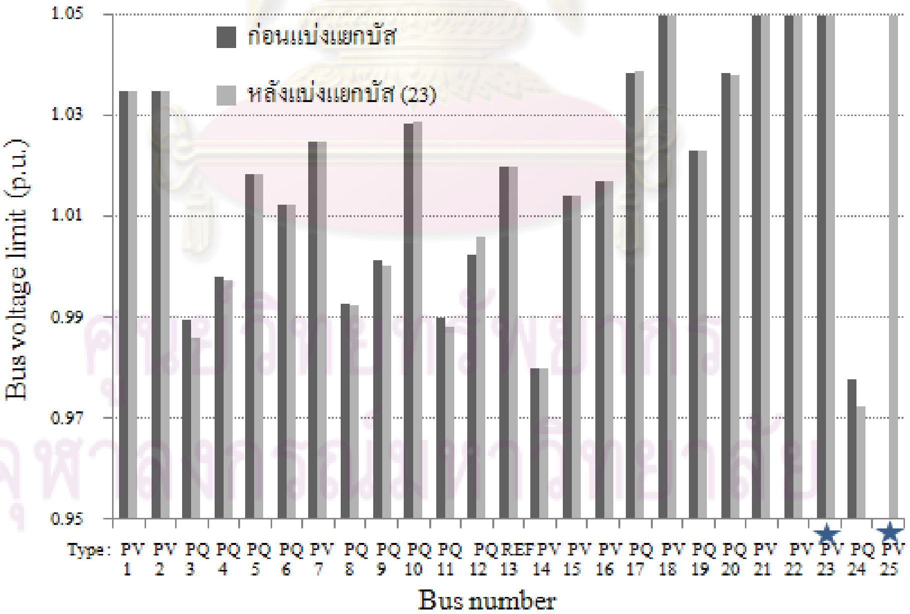
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.1.3 กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมากที่สุดในระบบ

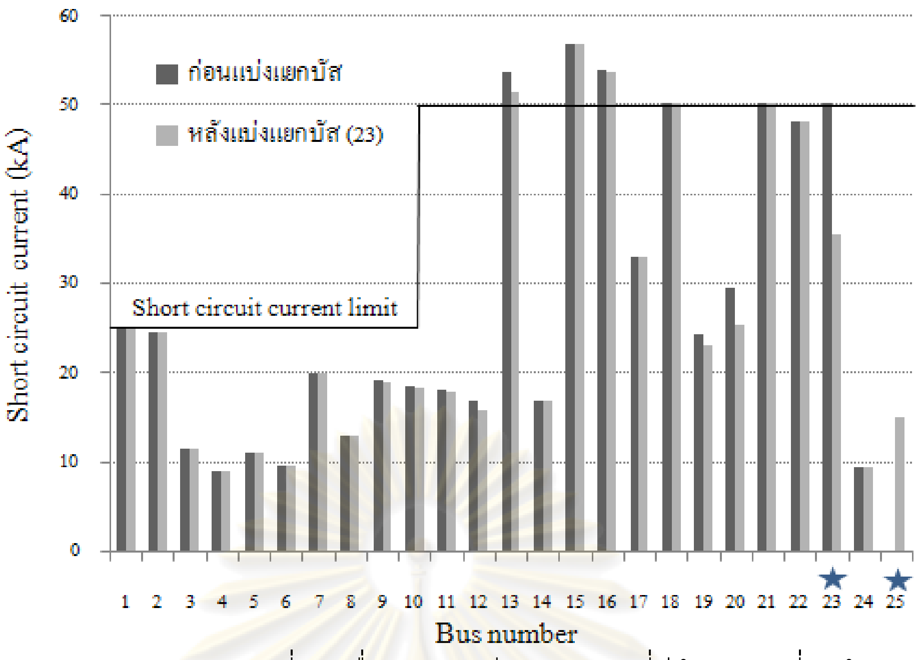
เป็นหลักการที่ กฟผ. นำไปใช้แก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้นจริงดังกล่าวข้างต้น ซึ่งบัสที่มีกำลังการผลิตมากที่สุดในระบบและเป็นบัสที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก สามารถเรียงตามลำดับขนาดกำลังการผลิตจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ บัสที่ 23, 13, 22 และ 15 ซึ่งมีกำลังผลิตขนาด 660, 591, 300 และ 215 MW ตามลำดับ โดยการทดสอบกระทำโดยการเพิ่มจำนวนบัสของการแบ่งแยกตามลำดับ จนกว่าจะสามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินในระบบได้ ซึ่งรายละเอียดของผลการทดสอบเนื่องจากการเพิ่มจำนวนบัสที่จะแบ่งแยกทีละบัส แสดงในตารางที่ 5.2 ส่วนในที่นี้จะขอยกกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมากที่สุด 1 บัส และกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมากที่สุด 4 บัส ซึ่งสามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดได้ โดยแสดงผลการทดสอบแต่ละกรณีดังนี้

1) กรณีแบ่งแยกบัส 1 บัสที่มากที่สุดในระบบ

บัสที่มีกำลังผลิตมากที่สุดในระบบ คือ บัสที่ 23 ดังนั้นจึงทำการแบ่งแยกบัสที่ 23 ในระบบทดสอบ ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ทั้งหมด 3 เครื่อง ขนาดกำลังการผลิตรวม 660 MW ซึ่งแสดงผลของระดับแรงดันที่บัส และขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เปรียบเทียบกับกรณีฐานดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 ขนาดแรงดันที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 1 บัส



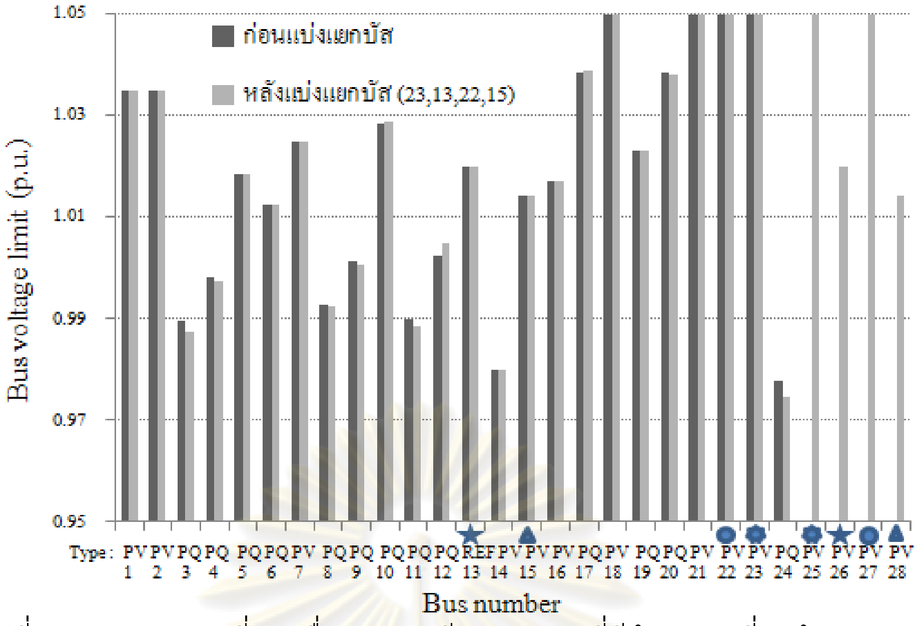
รูปที่ 5.6 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 1 บัส

จากผลการทดสอบในกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดในระบบจำนวน 1 บัส จะเห็นว่าไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับต่างๆ ยกเว้นมีการเกินพิกัดของค่ากระแสลัดวงจรที่บัสรวมทั้งหมด 5 บัส คือ บัสที่ 13, 15, 16, 18, 21 ซึ่งยังไม่สามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินพิกัดได้

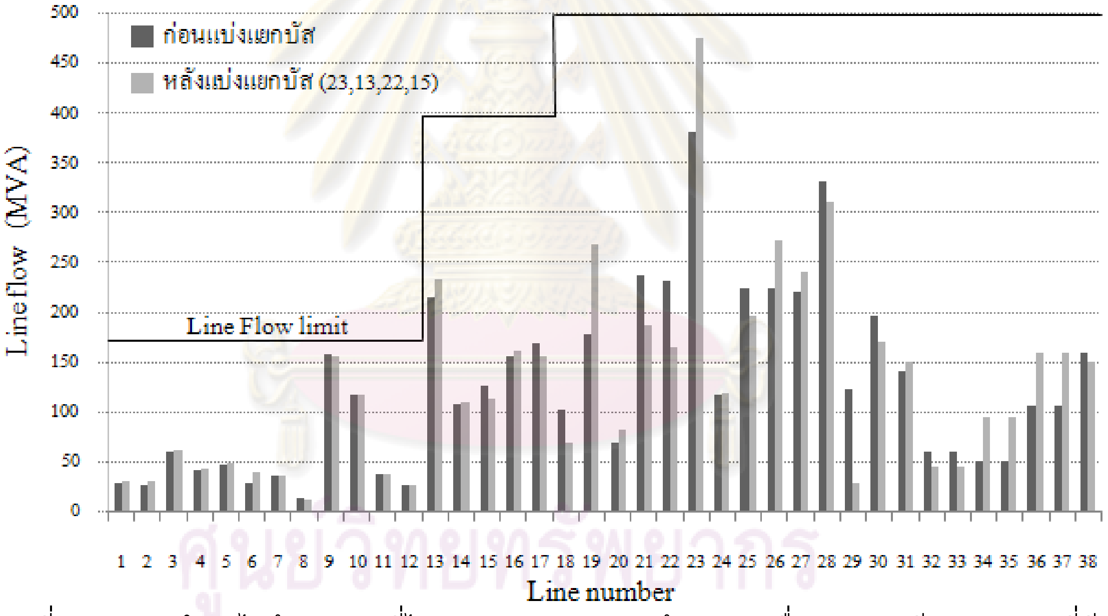
2) แบ่งแยกบัส 4 บัสที่มากที่สุดในระบบ

ทำการแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมากที่สุดในระบบจำนวน 4 บัส โดยเรียงลำดับตามที่ได้กล่าว ซึ่งแสดงผลของระดับแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และหม้อแปลง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เปรียบเทียบกับกรณีฐานดังรูปที่ 5.7 ถึง 5.10 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

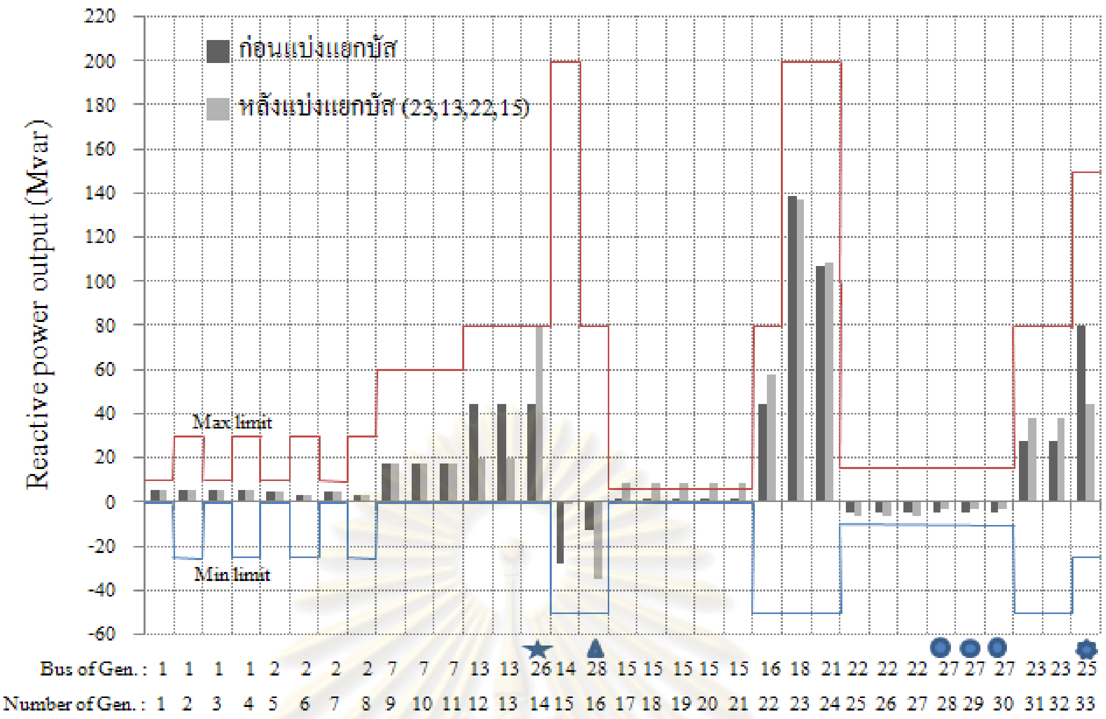


รูปที่ 5.7 ขนาดแรงดันที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 4 บัส

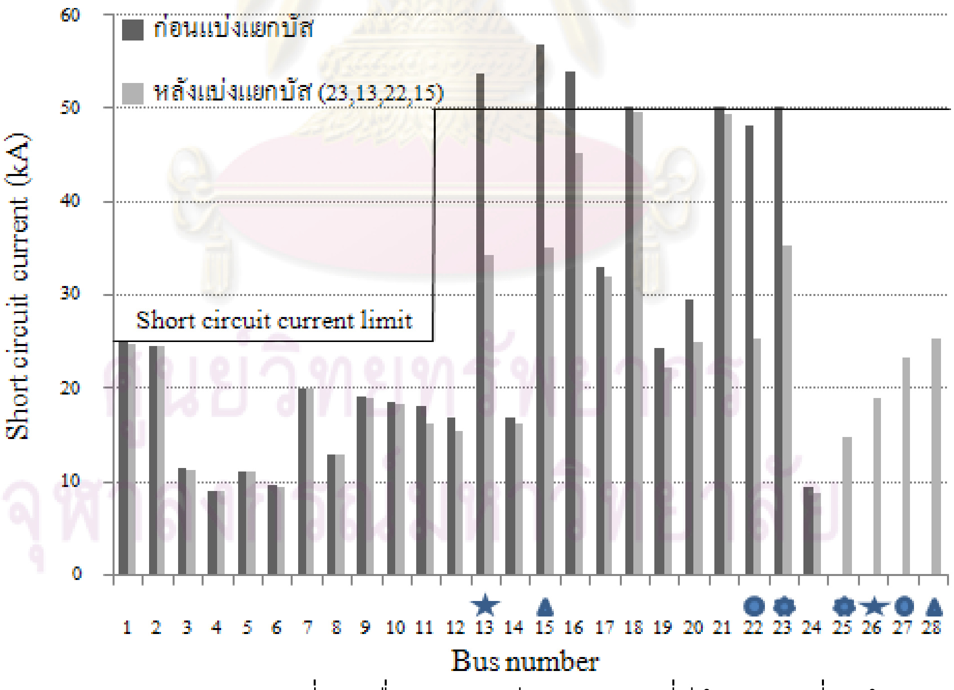


รูปที่ 5.8 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่ง และหม้อแปลง เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 4 บัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.9 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 4 บัส



รูปที่ 5.10 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดจำนวน 4 บัส

จากผลการทดสอบในกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมากที่สุดในระบบจำนวน 4 บัส สามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินได้ โดยจะเห็นว่าไม่มีการเกินพิกัดของแรงดันที่บัส สายส่ง หม้อแปลง ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส แต่ยังมีการเกินพิกัดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่

บัส 26 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดจากการแบ่งแยกบัส 13 ซึ่งถือว่าการแก้ปัญหาในกรณีทดสอบนี้ ยังไม่สามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินได้ เนื่องจากมีการละเมิดเงื่อนไขบังคับเกิดขึ้น

5.1.1.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ

สำหรับกรณีนี้จะทำการหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแบ่งแยกบัส โดยในการทดสอบนี้ กำหนดให้จำนวนของบัสที่จะทำการแบ่งแยกมีค่ามากกว่าจำนวนของบัสที่คาดว่าจะทำการแบ่งแยกเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งในการทดสอบนี้กำหนดให้มีการแบ่งแยกบัสในระบบสูงสุดได้จำนวน 3 บัส โดยเลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 100 คำตอบและค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด เท่ากับ 100

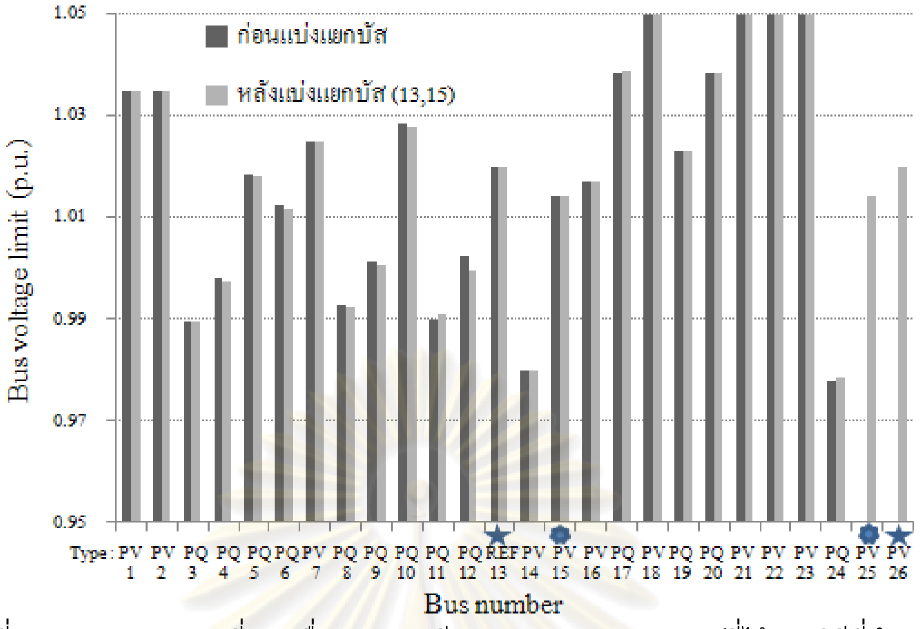
จากผลการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยกบัสของทุกรอบ เมื่อทำการพิจารณาเฉพาะชุดคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นจากทุกรอบการค้นหา ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.1 โดยมีทั้งหมด 6 คำตอบ

ตารางที่ 5.1 ผลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

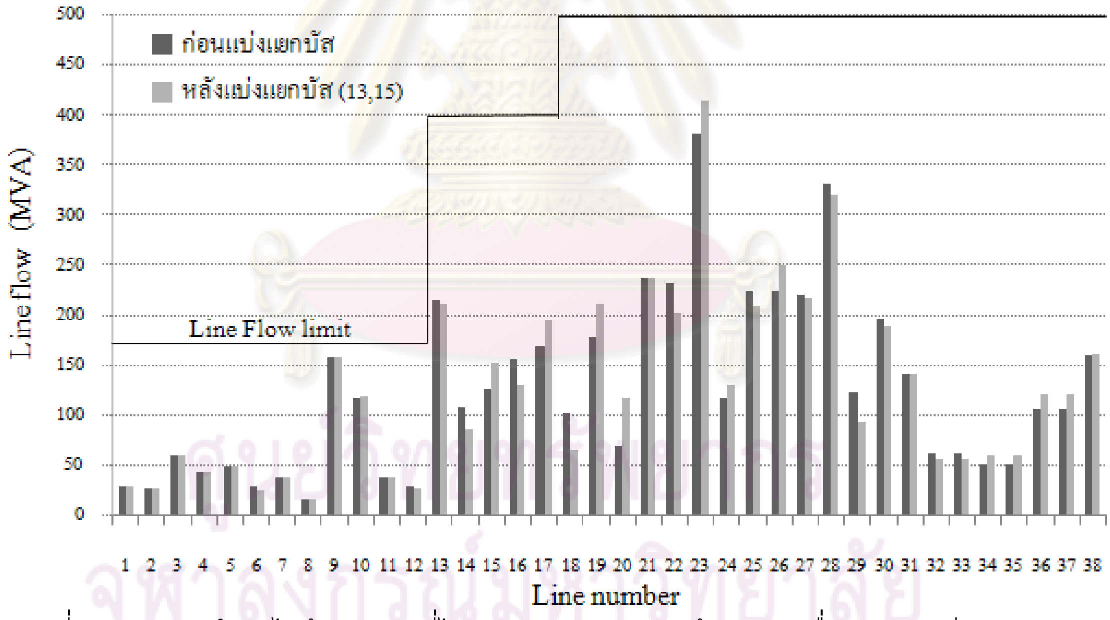
Answer Local	Location 1	Location 2	Location 3	Point
1	13	15	24	530000
2	12	13	15	530000
3	**13**	**15**	**0**	**540000**
4	13	15	3	530000
5	12	13	15	530000
6	0	13	15	540000

เมื่อพิจารณาเฉพาะคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ โดยพิจารณาจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นลำดับที่ 3 โดยมีตำแหน่งของการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมจำนวน 2 บัส คือ บัสที่ 13 และ 15 ของระบบทดสอบ ซึ่งให้คุณภาพคำตอบที่มีจำนวนบัสการแบ่งแยกน้อยที่สุด และไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับใดๆ

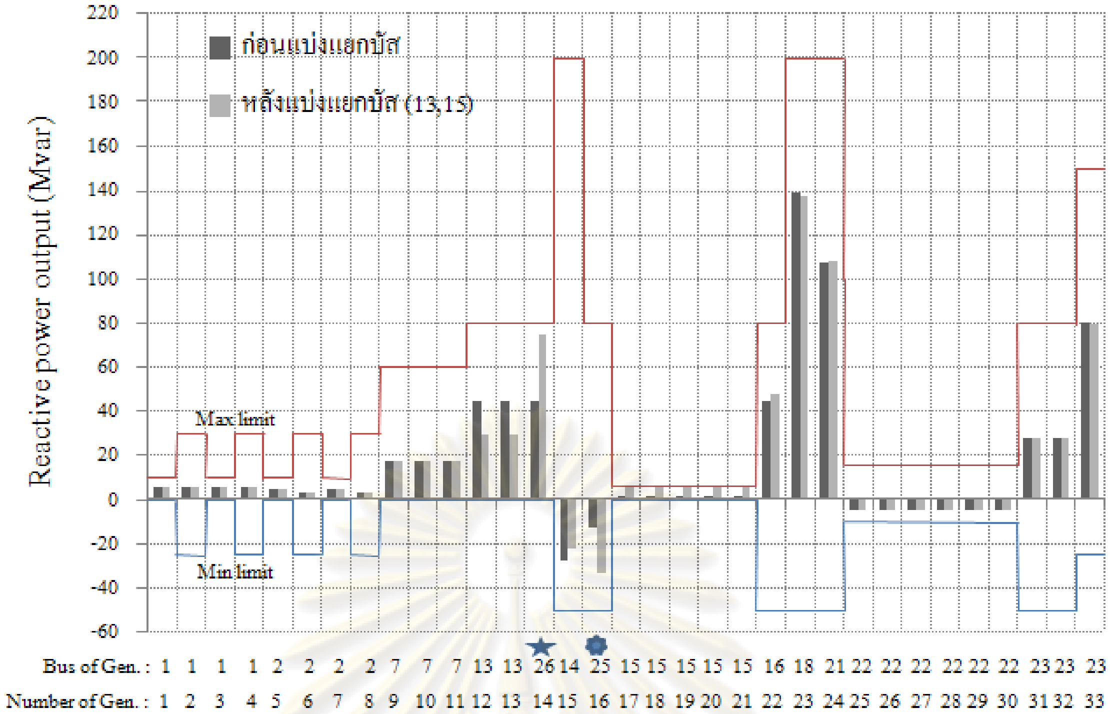
เมื่อทำการแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์จากโปรแกรมหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแบ่งแยกบัส ซึ่งให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพียงคำตอบเดียว คือการแบ่งแยกบัสที่ 13 และ 15 ร่วมกัน ซึ่งมีกำลังการผลิตขนาด 591 และ 215 MW ตามลำดับ แสดงผลของระดับแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และหม้อแปลง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เปรียบเทียบกับกรณีฐานดังรูปที่ 5.11 ถึง 5.14 ตามลำดับ



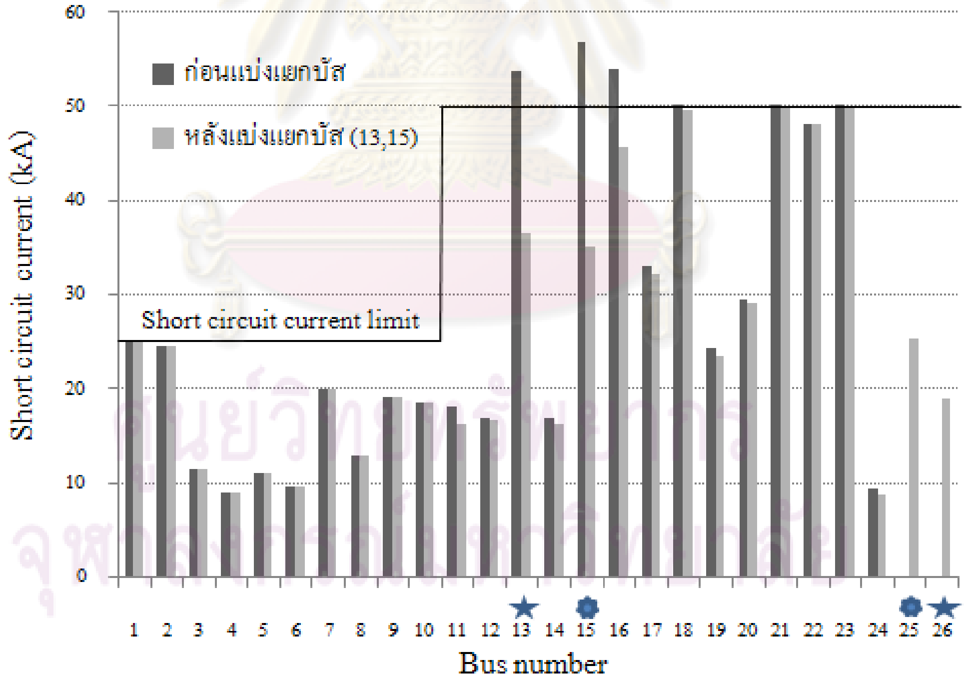
รูปที่ 5.11 ขนาดแรงดันที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 5.12 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่ง และหม้อแปลง เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัส ตามผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 5.13 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 5.14 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ

5.1.1.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ

จากผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสทั้ง 4 กรณีการทดสอบที่นำเสนอ สามารถแสดงผลสรุปการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ ด้วยวิธีแบ่งแยกบัส

กรณีการแบ่งแยกบัส	บัสที่แบ่งแยก	เงื่อนไขที่ละเมิด	บัสที่กระแสลัดวงจรเกิน	กระแสลัดวงจรค่ามากที่สุด ณ บัสที่แบ่งแยก		
				ก่อนแบ่ง (kA)	หลังแบ่ง (kA)	ลดลง (%)
1) พื้นฐาน	-	กระแสลัดวงจร	13, 15, 16, 18, 21, 23	-	-	-
2) กระแสลัดวงจร	15	กระแสลัดวงจร	13, 23	56.86	35.04	38.37
3) กำลังมากที่สุดในระบบ (หลักการของ กฟผ.)	23	กระแสลัดวงจร	13, 15, 16, 18, 21	50.55	35.46	29.85
	13, 23	กระแสลัดวงจร	15, 16, 18, 21	53.79, 50.55	34.33, 35.46	36.18, 29.85
	13, 22, 23	กระแสลัดวงจร	15, 16, 18	53.79, 48.16, 50.55	34.33, 25.31, 35.46	36.18, 47.45, 29.85
	13, 15, 22, 23	กำลังรีแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	-	53.79, 56.86, 48.16, 50.55	34.33, 35.02, 25.31, 35.24	36.17, 38.41, 47.45, 30.29
4) หลักการที่นำเสนอ	13, 15	-	-	53.79, 56.87	36.57, 35.03	32.01, 38.40

ผลการทดสอบสมรรถนะแสดงให้เห็นว่า จำนวนและตำแหน่งการแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ สามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินในระบบได้ดังรูปที่ 5.14 เมื่อเปรียบเทียบกับการแก้ปัญหาตามหลักวิธีของ กฟผ. ซึ่งต้องแบ่งแยกบัสเป็นจำนวนมากกว่าวิธีการที่นำเสนอ 2 บัสจึงจะสามารถแก้ปัญหาได้ดังการทดสอบในตารางที่ 5.2

จากรูปที่ 5.11จะเห็นว่าบัสใหม่ที่เกิดขึ้นมีขนาดแรงดันเท่ากับค่าเดิมก่อนการแบ่งแยก เนื่องจากถูกแบ่งแยกมาจากบัสที่ 13 และ 15 ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้ถูกกำหนดให้แบ่งแยกตามไปด้วย สำหรับบัสที่ 15 มีขนาดกระแสลัดวงจรสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากเป็นบัสที่มีการเชื่อมต่อกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากที่สุด ทำให้ค่า Sub transient reactance รวมที่บัสมีค่าน้อย ดังนั้นเมื่อมีการแบ่งแยกบัส จึงทำให้กระแสลัดวงจรที่บัสในบริเวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้างเคียงลดลงเป็นวงกว้าง และเมื่อแบ่งแยกร่วมกับบัสที่ 13 ตามคำตอบที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ทำให้กระแสลัดวงจรของทุกบัสไม่เกินค่าขีดจำกัดที่ตั้งไว้

จากผลทดสอบ ในกรณีที่ระบบส่งกำลังไฟฟ้าไม่ซับซ้อน ตำแหน่งของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยก มักเป็นบัสที่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด หรือบัสที่มีกำลังผลิตมากที่สุดในระบบ อย่างไรก็ตาม แนวทางการแบ่งแยกบัสเพื่อแก้ปัญหาอาจไม่เป็นเช่นนั้นเสมอไปในกรณีที่ระบบมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการในการวิเคราะห์หาตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมที่สุดเพื่อแก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินพิกัดที่เกิดขึ้นในระบบ

5.1.2 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR

จากที่ได้มีการนำเสนอวิธีการติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัส แทนการแบ่งแยกบัสแบบถาวรในหัวข้อ 3.5 ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR เพียงอย่างเดียวในการแก้ปัญหา โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นขนาดรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้งที่น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการใช้เงินลงทุนในการแก้ปัญหาน้อยที่สุด

จากการทดสอบติดตั้ง CLR แล้วดูผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่ากระแสลัดวงจรที่บัสในหัวข้อ 3.5 พบว่าช่วงขนาดของ CLR ที่เมื่อติดตั้งแล้วมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจร คือช่วงขนาด 0.001 ถึง 0.1 pu. โดยถ้าขนาดของ CLR ที่ติดตั้งระหว่างบัสมีค่ามากกว่า 0.1 pu. ขนาดของกระแสลัดวงจรจะเริ่มเข้าสู่ค่าที่คงที่ ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงทำการหาขนาดที่เหมาะสมของ CLR ในช่วงขนาด 0.001 ถึง 0.1 pu. โดยมีค่าความละเอียดของการหาขนาดติดตั้ง CLR เท่ากับ 0.001 pu. ซึ่งมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

5.1.2.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ

จากกรณีทดสอบที่แล้วได้ทำการเปรียบเทียบผลของการแบ่งแยกบัสตามวิธีการต่างๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน กับวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถให้คำตอบของการแก้ปัญหาด้วยการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมกว่า คือใช้จำนวนตำแหน่งในการแบ่งแยกเพื่อแก้ปัญหาที่น้อยกว่า

ในการทดสอบนี้จะทำการประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR เพียงวิธีเดียวในการแก้ปัญหากระแสลัดวงจร โดยจะทำการประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR โดยทำการหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง CLR และหาขนาดของ CLR ที่ติดตั้งรวมของทั้งระบบให้น้อยที่สุด โดยในการทดสอบนี้ กำหนดให้จำนวนของตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งมีค่ามากกว่าจำนวนที่คาดว่าจะทำการติดตั้งเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งในการทดสอบนี้อนุญาตให้มีตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง CLR ในระบบสูงสุดได้จำนวน 3 บัส โดยเลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 500 คำตอบ และค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด เท่ากับ 200 รอบ ซึ่งผลของการค้นหาที่คัดเลือกเฉพาะคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นจากทุกรอบการค้นหา แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR

Answer Local	Location 1	Location 2	Location 3	CLR 1 (pu.)	CLR 2 (pu.)	CLR 3 (pu.)	Total CLR (pu.)	Point
1	13	15	20	0.007	0.021	0.004	0.032	500031.3
2	13	15	20	0.007	0.022	0.003	0.032	500031.3
3	13	15	19	0.007	0.019	0.006	0.032	500031.3
4	13	15	20	0.007	0.02	0.005	0.032	500031.3

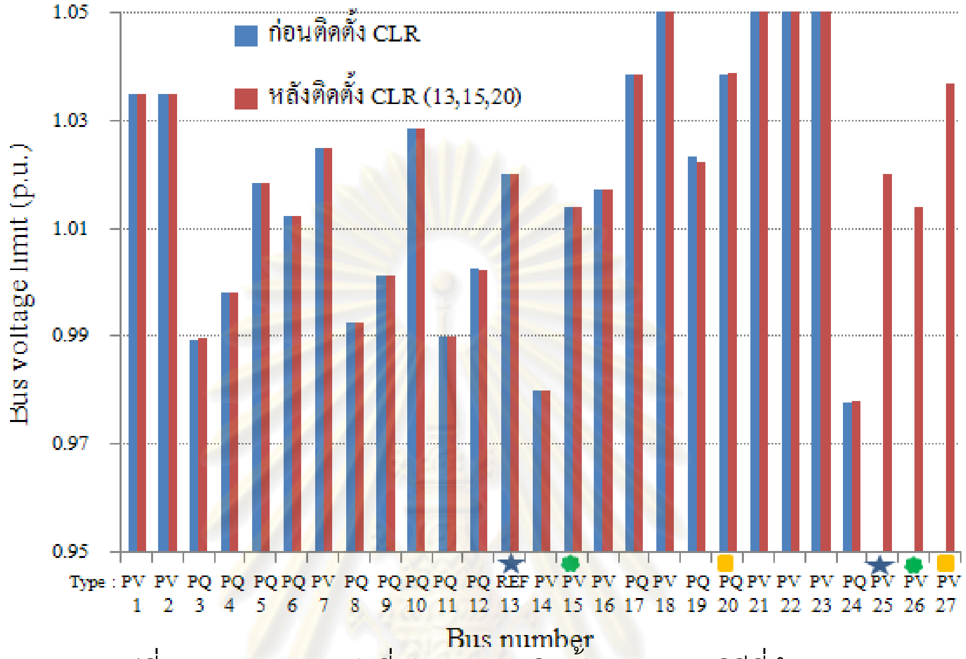
จากผลการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับติดตั้ง CLR เมื่อทำการพิจารณาเฉพาะชุดคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น พบว่ามีคำตอบทั้งหมดจำนวน 4 คำตอบที่มีขนาดของ CLR รวมที่น้อยที่สุดเท่ากัน คือเท่ากับ 0.032 pu. ซึ่งยังไม่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นในกรณีนี้จึงพิจารณาคำตอบที่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงที่สุดในระบบ ที่มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคำตอบที่มีขนาดรวมของ CLR ที่น้อยที่สุดด้วยกัน โดยเมื่อพิจารณาเฉพาะคำตอบที่มีขนาดรวมของ CLR เท่ากับ 0.032 pu. จากผลการค้นหาคำตอบของแต่ละรอบการคำนวณ สามารถนำมาเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรที่สูงที่สุดในระบบจากน้อยไปหามาก สามารถแสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลของคำตอบที่มีขนาดรวมของ CLR น้อยที่สุด โดยเรียงลำดับกระแสลัดวงจร ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR

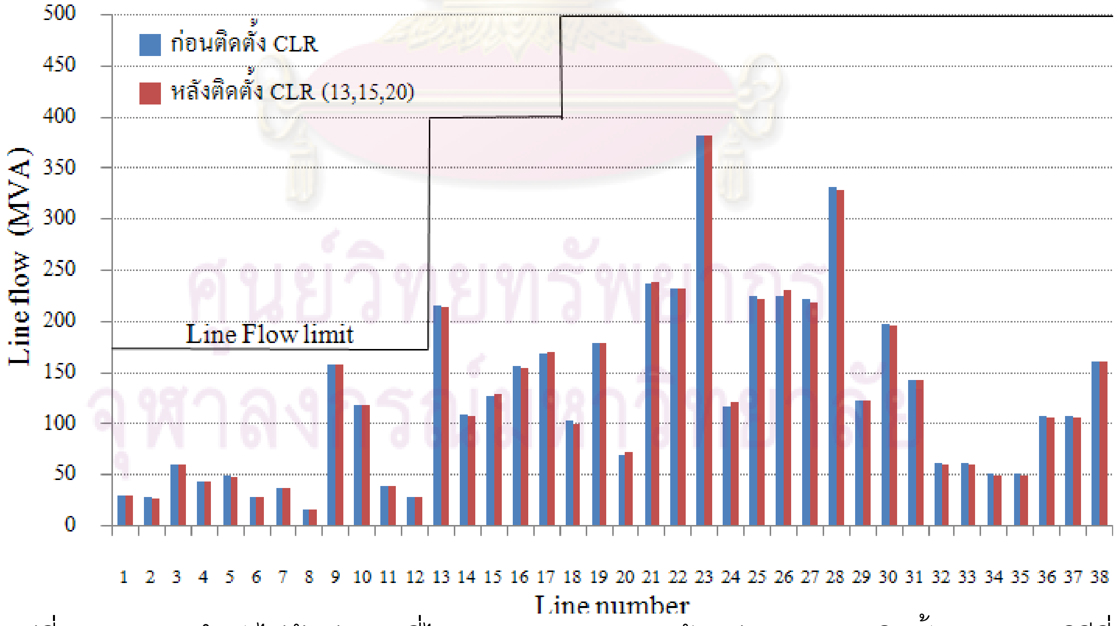
Answer	Location 1	Location 2	Location 3	CLR 1 (pu.)	CLR 2 (pu.)	CLR 3 (pu.)	Total CLR (pu.)	Point	Max Isc (kA)
1	13	15	20	0.007	0.022	0.003	0.032	500031.25	49.99593
2	13	15	20	0.007	0.023	0.002	0.032	500031.25	49.9960768
3	13	15	19	0.007	0.022	0.003	0.032	500031.25	49.9960822
4	13	15	20	0.007	0.021	0.004	0.032	500031.25	49.9960974
5	13	15	19	0.007	0.023	0.002	0.032	500031.25	49.9961781
6	13	15	19	0.007	0.021	0.004	0.032	500031.25	49.9962944
7	13	15	20	0.007	0.02	0.005	0.032	500031.25	49.9965795
8	13	15	19	0.007	0.02	0.005	0.032	500031.25	49.9968222
9	13	15	20	0.007	0.019	0.006	0.032	500031.25	49.9973875
10	13	15	19	0.007	0.019	0.006	0.032	500031.25	49.9976747
11	13	15	20	0.007	0.018	0.007	0.032	500031.25	49.9985316
12	13	15	19	0.007	0.018	0.007	0.032	500031.25	49.9988619

จากตารางที่ 5.4 สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ โดยพิจารณาจากคำตอบที่มีขนาดรวมของ CLR ที่ทำการติดตั้งน้อยที่สุด และมีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในระบบน้อยที่สุด โดยมีตำแหน่งของการติดตั้ง CLR ที่เหมาะสมจำนวน 3 บัส คือ บัสที่ 13, 15 และ 20 และขนาดติดตั้ง CLR ที่เหมาะสม คือ 0.007, 0.022 และ 0.003 pu. ตามลำดับ และเมื่อทำการ

ติดตั้ง CLR ตามผลลัพธ์จากโปรแกรมหาตำแหน่งและขนาดติดตั้งที่เหมาะสม สามารถแสดงผลของระดับแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และหม้อแปลง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัสเปรียบเทียบกับกรณีฐานแสดงดังรูปที่ 5.15 ถึง 5.18 ตามลำดับ

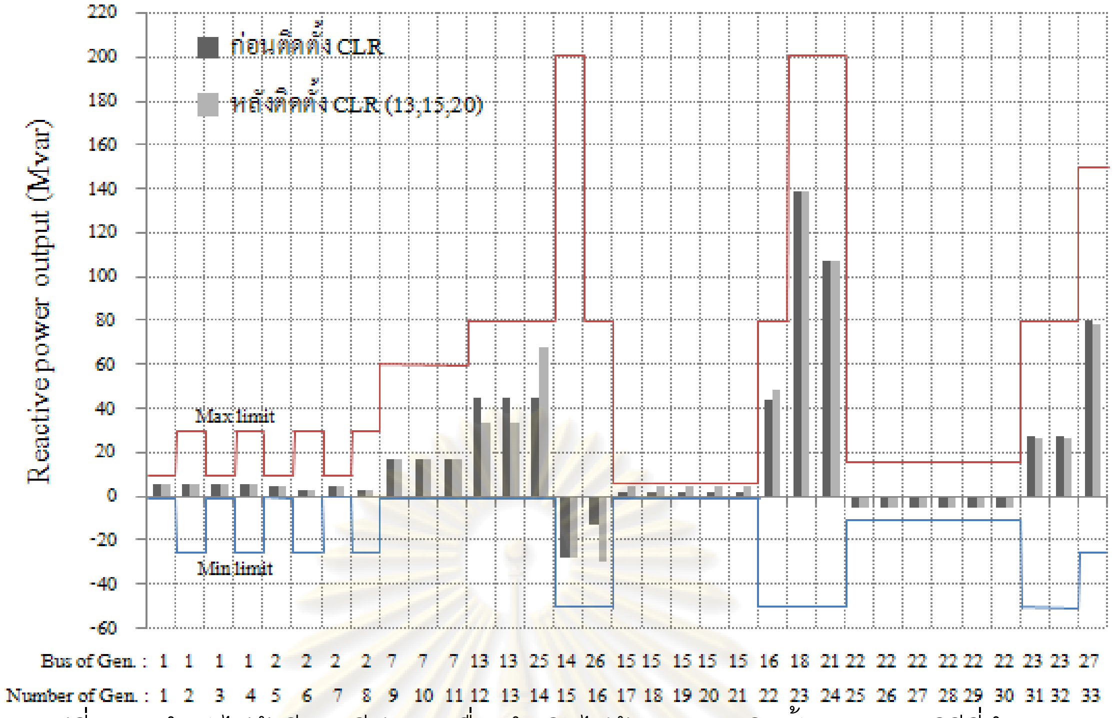


รูปที่ 5.15 ขนาดแรงดันที่บัส จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ

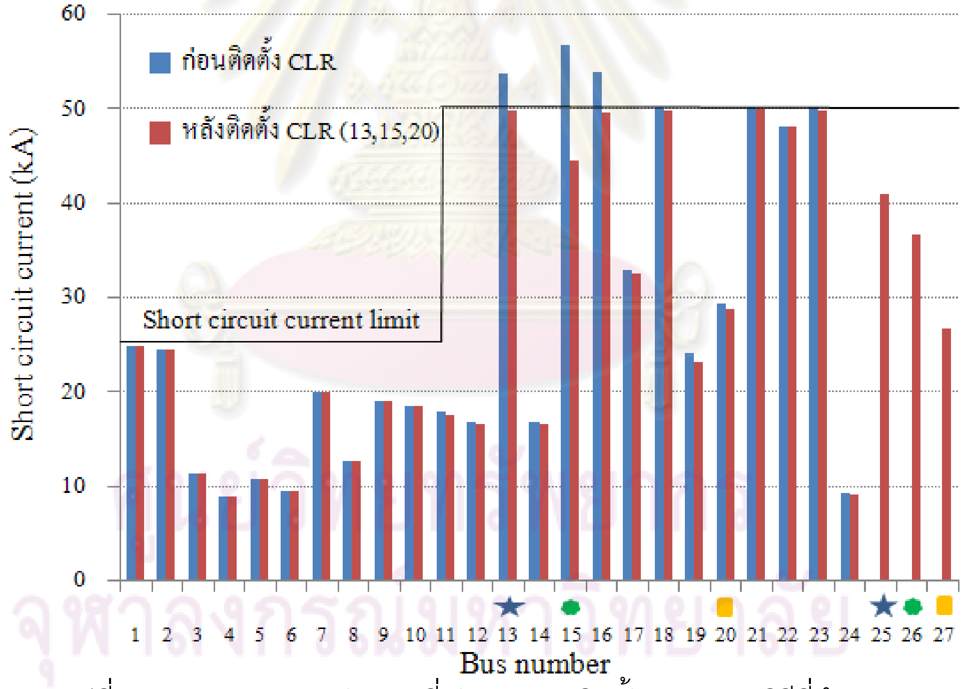


รูปที่ 5.16 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่ง และหม้อแปลง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.17 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 5.18 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ

5.1.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ

จากผลคำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาค่าที่เหมาะสมสำหรับกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR พบว่าตำแหน่งในการติดตั้ง CLR ยังประกอบไปด้วยตำแหน่งที่เป็นคำตอบในการแบ่งแยก

บัสแบบถาวรของกรณีทดสอบที่ 5.1.1.4 คือ บัสที่ 13 และ 15 ส่วนบัสที่ 20 ที่เพิ่มขึ้นมาในคำตอบ เนื่องจากในกรณีฐานมีค่ากระแสลัดวงจรเกินที่บัส 21 ซึ่งไม่สามารถแบ่งแยกบัสที่ 21 ได้เนื่องจากมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงเครื่องเดียว ดังนั้นตำแหน่งบัสที่ 20 จึงเป็นตำแหน่งที่ติดตั้ง CLR เพื่อลดกระแสลัดวงจรที่เกินพิกัดในบัสที่นอกเหนือผลจากการติดตั้ง CLR ที่บัส 13 และ 15

การติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัสแทนการแบ่งแยกบัสแบบถาวร จะสามารถลดขนาดของกระแสลัดวงจรที่บัสที่ทำการติดตั้งและบริเวณข้างเคียงได้น้อยกว่าการแบ่งแยกบัสแบบถาวร ซึ่งจะเห็นได้จากผลกระทบต่อกระแสลัดวงจรเมื่อทำการติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัสในระบบจากหัวข้อที่ 3.5 โดยจากผลการทดสอบในกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR เมื่อพิจารณาคำตอบที่ทำการติดตั้ง CLR เพียง 2 ตำแหน่ง คือ บัสที่ 13 และ 15 จะมีขนาดรวมของ CLR ที่ใช้ติดตั้งมากกว่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม และค่ากระแสลัดวงจรที่สูงที่สุดในระบบของคำตอบจากการติดตั้ง CLR ที่บัส 13 และ 15 มีค่ามากกว่าค่ากระแสลัดวงจรที่สูงที่สุดในระบบของคำตอบจากการแบ่งแยกบัสที่บัส 13 และ 15 ด้วยเช่นกัน

5.1.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

จากกรณีทดสอบที่ 5.1.1 ได้ทำการเปรียบเทียบผลของการแบ่งแยกบัสตามวิธีการต่างๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน กับวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถให้คำตอบของการแก้ปัญหาด้วยการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมกว่า คือใช้ตำแหน่งในการแบ่งแยกเพื่อแก้ปัญหาที่น้อยกว่า

ในการทดสอบนี้จะทำการประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR โดยทำการหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ที่น้อยที่สุด และหาขนาดของ CLR ที่ติดตั้งรวมทั้งระบบให้น้อยที่สุด ซึ่งจากการทดสอบในหัวข้อที่ 3.5 ในการทดสอบนี้จึงทำการหาขนาดที่เหมาะสมของ CLR ในช่วงขนาด 0.001 ถึง 0.1 pu. ซึ่งมีค่าความละเอียดของการหาขนาดติดตั้ง CLR เท่ากับ 0.001 pu. โดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

5.1.3.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ

ทำการหาจำนวนตำแหน่งของการแบ่งแยกบัส หรือตำแหน่งการติดตั้ง CLR ที่น้อยที่สุด และขนาดรวมของ CLR ที่น้อยที่สุดสำหรับการติดตั้ง โดยในการทดสอบนี้ กำหนดให้จำนวนของตำแหน่งที่จะทำการแบ่งแยก หรือติดตั้งมีค่ามากกว่าจำนวนที่คาดว่าจะทำการแบ่งแยกเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งในการทดสอบนี้อนุญาตให้มีตำแหน่งที่ทำการแบ่งแยกบัส หรือติดตั้ง CLR ในระบบสูงสุดได้จำนวน 3 บัส โดยเลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 500 คำตอบและค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด เท่ากับ 200 รอบ ซึ่งผลของการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ของแต่ละรอบของการคำนวณ แสดงดัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค.1 ในเนื้อหาส่วนภาคผนวก ค และผลของการค้นหาที่คัดเลือกเฉพาะคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นจากทุกรอบการค้นหา แสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

Answer Local	Location 1	Location 2	Location 3	CLR 1 (pu.)	CLR 2 (pu.)	CLR 3 (pu.)	Total CLR (pu.)	Point
1	0	13	15	0	0.047	Inf.	0.047	540021.3
2	0	13	15	0	0.059	Inf.	0.059	540016.9
3	0	13	15	0	0.055	Inf.	0.055	540018.2
4	0	13	15	0	0.056	Inf.	0.056	540017.9
5	0	13	15	0	0.044	Inf.	0.044	540022.7
6	0	13	15	0	0.06	Inf.	0.06	540016.7
7	0	13	15	0	0.05	Inf.	0.05	540020
8	0	13	15	0	0.083	Inf.	0.083	540012
9	0	13	15	0	0.088	Inf.	0.088	540011.4
10	0	13	15	0	0.046	Inf.	0.046	540021.7
11	0	13	15	0	0.025	0.052	0.077	540013
12	0	13	15	0	0.032	0.037	0.069	540014.5
13	**0**	**13**	**15**	**0**	**Inf.**	**Inf.**	**0**	**542000**

จากผลการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR เมื่อทำการพิจารณาเฉพาะชุดคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น พบว่ามีคำตอบทั้งหมดจำนวน 13 คำตอบ และสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ โดยพิจารณาจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นที่ดีที่สุด ซึ่งเกิดขึ้นในการค้นหารอบที่ 193 และเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นลำดับที่ 13 โดยมีตำแหน่งของการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมจำนวน 2 บัส คือ บัสที่ 13 และ 15 และขนาดติดตั้ง CLR ที่เหมาะสมคือขนาดอนันต์ทั้ง 2 บัสซึ่งเปรียบเสมือนการแบ่งแยกบัสแบบถาวรที่ตำแหน่งดังกล่าว และไม่มีการติดตั้ง CLR ในระบบเลย โดยคำตอบนี้เป็นคำตอบที่ให้คุณภาพคำตอบดีที่สุด คือ มีจำนวนตำแหน่งที่ใช้ในการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR น้อยที่สุดและมีขนาดรวมของการติดตั้ง CLR เพื่อแก้ปัญหาน้อยที่สุด โดยไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับใดๆ

เมื่อทำการแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์จากโปรแกรมหาตำแหน่งและขนาดติดตั้งที่เหมาะสมซึ่งให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพียงคำตอบเดียว คือการแบ่งแยกบัสแบบถาวรที่ 13 และ 15 ร่วมกัน ซึ่งเป็นคำตอบเดียวกันกับการทดสอบในหัวข้อ 5.1.1.4 ดังนั้นผลของระดับแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และหม้อแปลง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เปรียบเทียบกับกรณีฐานจึงแสดงดังรูปที่ 5.13 ถึง 5.16 ตามลำดับ

5.1.3.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ

ผลคำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาตำแหน่งในการแบ่งแยกบัส และขนาดในการติดตั้ง CLR ที่เหมาะสมที่สุด จากการทดสอบในกรณีนี้ พบว่าเป็นคำตอบเดียวกันกับการทดสอบในหัวข้อ 5.1.1.4 เนื่องจากการทดสอบในกรณีนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการจำนวนตำแหน่งในการแบ่งแยกหรือติดตั้ง และหาขนาดรวมของการติดตั้ง CLR น้อยที่สุด ซึ่งจากการทดสอบในกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวนั้นมีคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม นั่นหมายความว่าสำหรับโจทย์ปัญหานี้ไม่มีความจำเป็นต้องติดตั้ง CLR ก็สามารถแก้ไขปัญหากระแสลัดวงจรสูงได้ โดยที่ไม่มีการละเมิดเงื่อนไขการทำงานอื่นๆ ดังนั้นในการทดสอบนี้เมื่อพิจารณากรณีติดตั้ง CLR ร่วมด้วย ทำให้คำตอบที่ได้มาเป็นคำตอบเดียวกัน เพราะเมื่อสามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงโดยวิธีการแบ่งแยกบัสเพียงวิธีเดียวได้ ดังนั้นจึงไม่มีการติดตั้ง CLR ทำให้ขนาดรวมของ CLR ที่จะทำการติดตั้งมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเหลือเพียงการพิจารณาตำแหน่งที่จะทำการแบ่งแยก หรือติดตั้งที่มีจำนวนน้อยที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั่นเอง

5.1.4 วิเคราะห์ผลคำตอบที่ได้ในแต่ละกรณีการทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์คำตอบที่ได้ในแต่ละกรณีทดสอบ คือ กรณีใช้วิธีแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียว กรณีใช้การติดตั้ง CLR เพียงอย่างเดียว และกรณีใช้การแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดกระแสลัดวงจร เงินลงทุนที่ใช้ในการแก้ปัญหาโดยประมาณจากขนาดรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง รวมถึงพิจารณาเสถียรภาพทางแรงดันในสภาวะอยู่ตัว ของคำตอบที่ได้ในแต่ละกรณี โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 คือ วิธีการ Modal Analysis และการใช้ดัชนี PQVSI เป็นตัวชี้วัดความมีเสถียรภาพทางแรงดัน

เมื่อนำคำตอบที่ได้ในแต่ละกรณีทดสอบมาวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพทางแรงดันของระบบโดยวิธีการ Modal Analysis และการใช้ดัชนี PQVSI ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.6 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ เมื่อทดสอบกับระบบ IEEE RTS-79

<table>
<tr><th colspan="6">กรณีทดสอบ</th><th>Isc_{max} (kA)</th><th>$PQVSI_{max}$ (1=unstable)</th><th>$Eigen_{min}$ (0=unstable)</th><th>VS. Order</th><th>Size (pu.)</th></tr>
<tr><td colspan="6">กรณีฐาน</td><td>56.86837</td><td>0.4602359</td><td>9.2397555</td><td>1</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="6">แบ่งแยกบัส</td><td rowspan="3">49.7948</td><td rowspan="3">0.465045</td><td rowspan="3">9.219824</td><td rowspan="3">3</td><td rowspan="3">-</td></tr>
<tr><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td></tr>
<tr><td>13</td><td>15</td><td>-</td><td>inf</td><td>inf</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="6">ติดตั้ง CLR</td><td rowspan="3">49.99593</td><td rowspan="3">0.4622175</td><td rowspan="3">9.2392932</td><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3">0.032</td></tr>
<tr><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td></tr>
<tr><td>13</td><td>15</td><td>20</td><td>0.007</td><td>0.022</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td colspan="6">แบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR</td><td rowspan="3">49.79481</td><td rowspan="3">0.4650451</td><td rowspan="3">9.2198243</td><td rowspan="3">3</td><td rowspan="3">-</td></tr>
<tr><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td></tr>
<tr><td>13</td><td>15</td><td>-</td><td>inf</td><td>inf</td><td>-</td></tr>
</table>

ผลจากการเปรียบเทียบคำตอบของแต่ละกรณีทดสอบ แสดงให้เห็นว่า สำหรับการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงของระบบทดสอบนี้ การประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียว โดยทำการแบ่งแยกบัสที่ 13 และ 15 ร่วมกัน เป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถแก้ปัญหาได้ โดยที่ไม่เกิดการละเมิดเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบ และยังเป็นวิธีการที่ลดค่ากระแสลัดวงจรได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้ง CLR

สำหรับผลกระทบต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบ เมื่อวิเคราะห์ค่าดัชนี PQVSI พบว่าในกรณีที่ทำการแบ่งแยกบัสเพื่อแก้ปัญหากระแสลัดวงจร ทำให้ดัชนี PQVSI มีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีฐานเล็กน้อย หรือในทางทฤษฎีค่าดัชนีมีค่าเข้าใกล้ 1 คือ เข้าใกล้การสูญเสียเสถียรภาพมากขึ้น และสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal analysis ซึ่งค่าไอเกนแวลูที่ต่ำที่สุดมีค่าลดลงจากกรณีฐาน

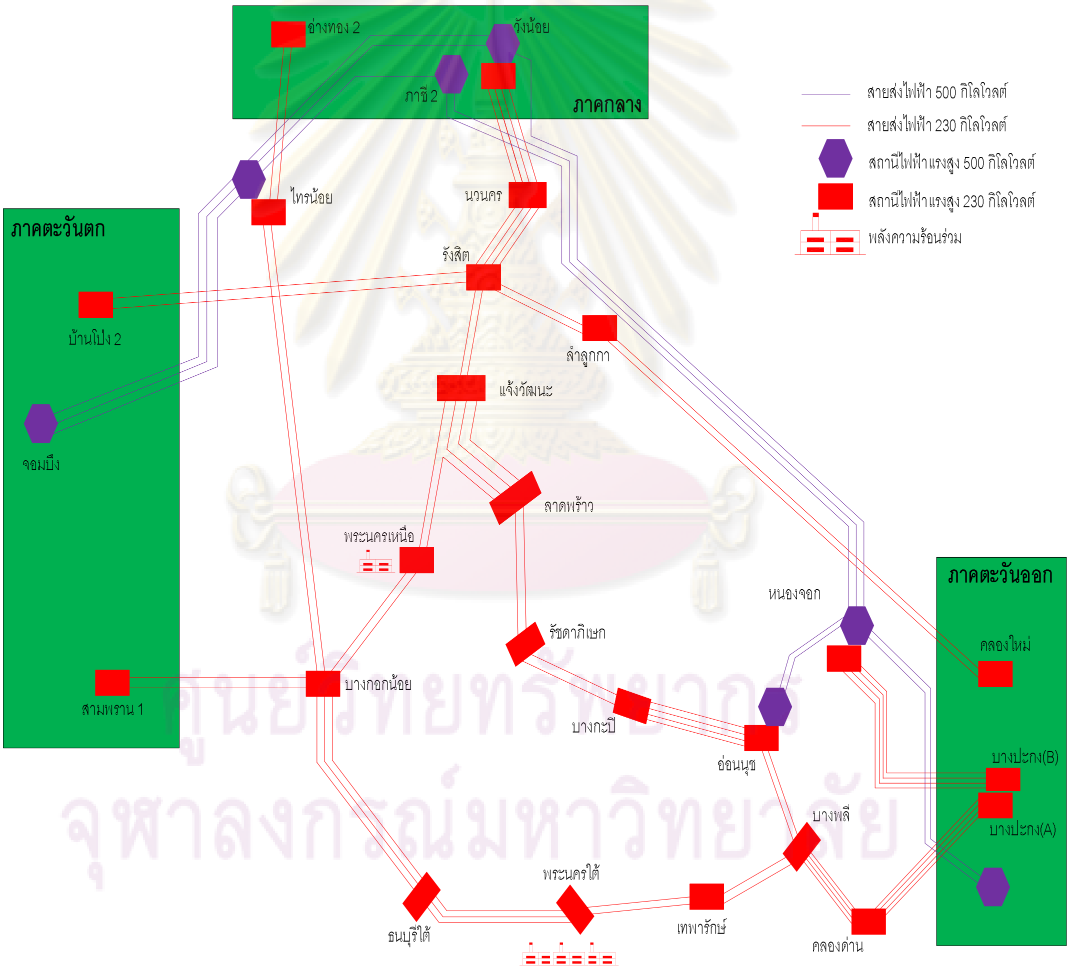
เมื่อเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวกับกรณีประยุกต์ใช้วิธีติดตั้ง CLR พบว่าการใช้วิธีติดตั้ง CLR สามารถลดกระแสลัดวงจรได้น้อยกว่าวิธีแบ่งแยกบัส ถึงแม้จะสามารถรักษาเสถียรภาพทางแรงดันได้ดีกว่าเล็กน้อย แต่ก็ต้องใช้เงินลงทุนในการแก้ปัญหาที่สูงกว่า ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบถึงความคุ้มค่าในการแก้ปัญหา จึงสรุปได้ว่าวิธีแบ่งแยกบัสเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแก้ปัญหากับระบบทดสอบนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 การทดสอบระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงในเขตกรุงเทพและปริมณฑลของ กฟผ.

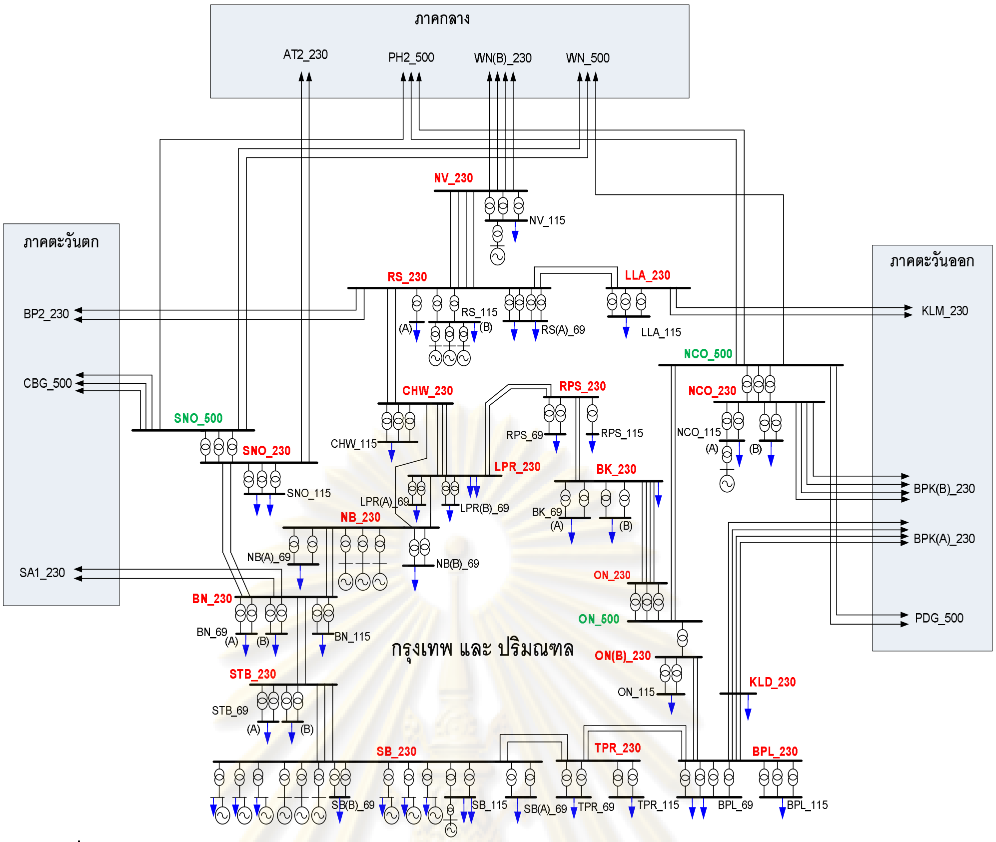
วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกนำไปทดสอบกับระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงของ กฟผ. โดยระบบที่นำมาใช้ทดสอบเป็นระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยที่ถูกลดรูปเพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าในเขตกรุงเทพและปริมณฑลของ กฟผ. ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่นำมาวิเคราะห์นี้เป็นระบบที่ถูกจำลองการเกิดปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินขีดจำกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 230 และ 500 kV ในเขตกรุงเทพและปริมณฑลในปี 2015 โดยแสดงจุดการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงดังรูปที่ 5.19 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแผนภาพเส้นเดียวดังรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.19 จุดการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงในเขตกรุงเทพ และปริมณฑล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.20 แผนภาพเส้นเดียวของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในเขตกรุงเทพ และปริมณฑล

รายละเอียดที่สำคัญของระบบประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 108 เครื่อง ขนาดกำลังการผลิตรวม 17,520 MW ขนาดของโหลดรวม เท่ากับ 17,402 MW มีจำนวนบัสในระบบรวม 254 บัส จำนวนสายส่งรวม 215 วงจร และมีหม้อแปลงในระบบรวม 214 ลูก

ระบบที่นำมาทดสอบเกิดปัญหากระแสลัดวงจรเกินพิกัดที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงในเขตกรุงเทพ และปริมณฑล ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.9 ค่ากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 50 kA

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.7 ผลการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่สถานีไฟฟ้าในเขตกรุงเทพและปริมณฑล

No.	Bus number	Bus name	Short circuit currents (kA)
1	11801	BK_230	49.35726717
2	*11802	BPL_230	51.97095602
3	*11803	BN_230	65.72089043
4	*11804	CHW_230	61.42871517
5	*11806	LPR_230	60.98699484
6	11807	NCO_230	38.76442775
7	*11808	NB_230	60.56828612
8	11809	ON_230	48.56134758
9	*11810	RS_230	60.09577446
10	*11811	RPS_230	52.05646361
11	11812	SNO_230	44.0740675
12	*11813	SB(A)_230	62.39289218
13	*11814	STB_230	61.46040442
14	*11815	TPR_230	52.45158974
15	11816	KLD_230	46.43213952
16	11819	NV_230	48.18934303
17	11820	LLA_230	32.64947374
18	11839	ON(B)_230	36.36822379
19	11907	NCO_500	41.07044231
20	11909	ON_500	35.22485733
21	11912	SNO(A)_500	35.05573082

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสอบเทียบผลการคำนวณกับผลการคำนวณจริงของ กฟผ. เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของวิธีที่ใช้ในการคำนวณ โดยทำการสอบเทียบผลคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ และขนาดของกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงชนิด 3 เฟสสมดุล ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของผลการสอบเทียบในภาคผนวก ข

สำหรับการทดสอบกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริงของ กฟผ. นี้ จะทำการทดสอบการแก้ปัญหาโดยแบ่งแยกเป็นกรณีใช้วิธีแบ่งแยกบัสแบบถาวร กรณีใช้วิธีการติดตั้ง CLR และกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสแบบถาวรร่วมกับการติดตั้ง CLR โดยจะแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน คือ ผลการทดสอบกรณีไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง และพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.2.1 **ผลการทดสอบกรณีไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง**

เนื่องจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ ถูกทำการลดรูปเพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าในเขตกรุงเทพและปริมณฑลของ กฟผ. ทำให้ในกรณีฐานที่ยังไม่มีการแบ่งแยกบัสในระบบ เกิดปัญหาไม่ผ่านเงื่อนไขความมั่นคง n-1 ของระบบ

ทำให้เมื่อนำไปคำนวณจะทำให้ไม่มีคำตอบใดๆ ที่ผ่านเงื่อนไขบังคับทั้งหมด ซึ่งมีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

5.2.1.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

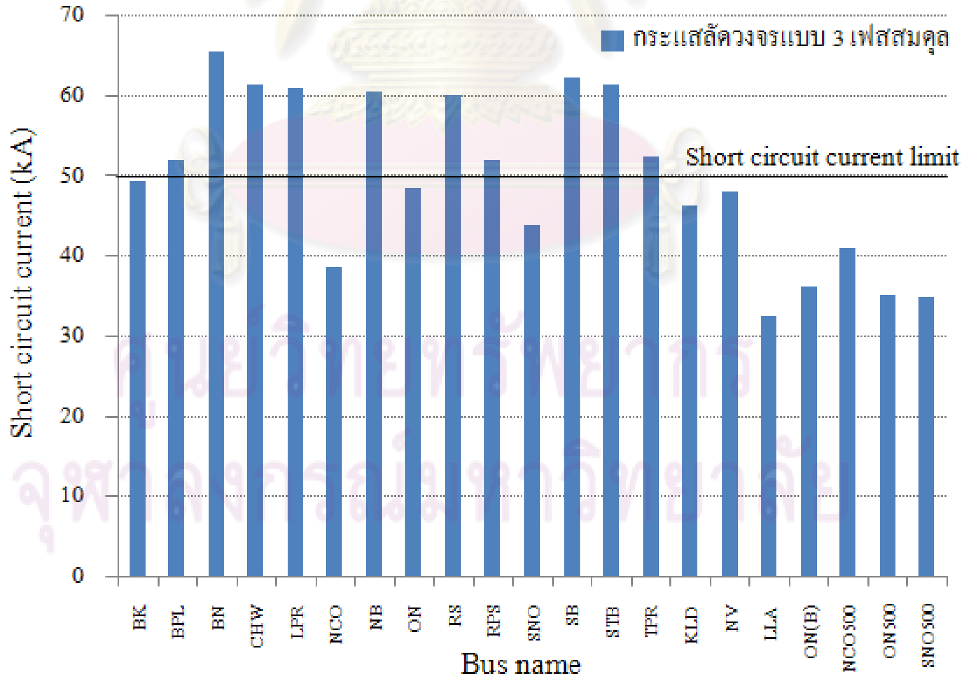
เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของการแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ กับวิธีการแบ่งแยกบัส ที่ผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ. นำมาใช้ ดังนั้นจะแบ่งการทดสอบผลออกเป็น 3 กรณี ได้แก่

1) กรณีฐาน
2) กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมากในระบบ
3) กรณีแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ

โดยผลการทดสอบของแต่ละกรณี แสดงดังต่อไปนี้

5.2.1.1.1 กรณีฐาน

เป็นกรณีที่ไม่มีการแบ่งแยกบัสในระบบทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับต่างๆ ยกเว้นเงื่อนไขของกระแสลัดวงจรดังรูปที่ 5.21 เนื่องจากระบบทดสอบนี้เป็นระบบที่ถูกจำลองการเพิ่มขึ้นของโหลดในปี 2015 ซึ่งคาดว่าจะเกิดปัญหาค่ากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ 50 kA



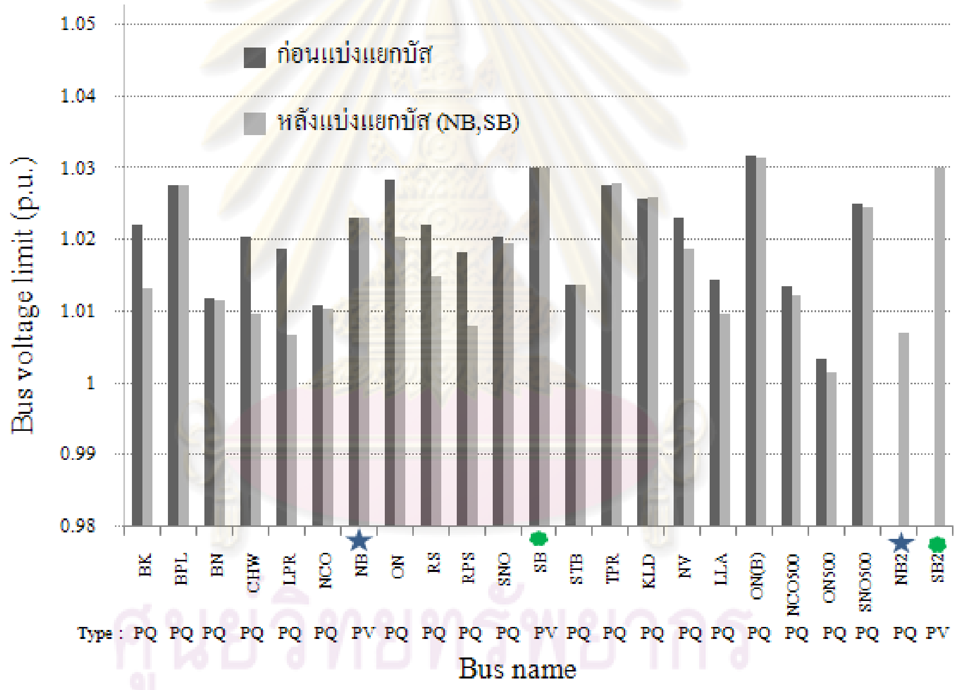
รูปที่ 5.21 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงของกรณีฐาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลของขนาดกระแสลัดวงจรดังรูปที่ 5.21 จะเห็นว่าในกรณีที่ไม่มีการแบ่งแยกบัส จะทำให้เกิดการเกินพิกัดของค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงรวมทั้งหมด 10 สถานี ซึ่งได้แสดงไว้แล้วในตารางที่ 5.7

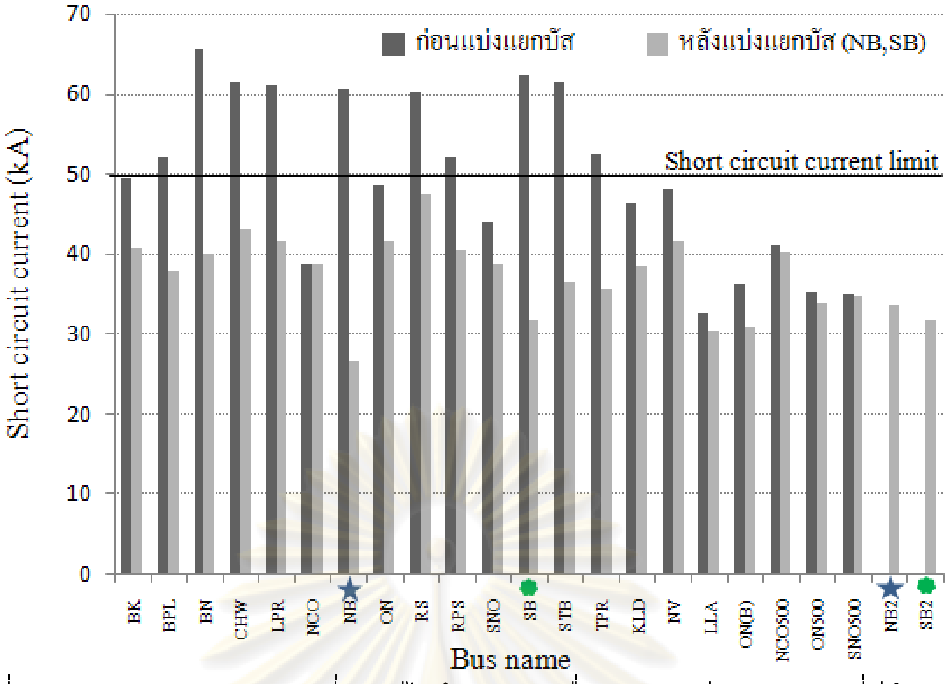
5.2.1.1.2 กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมาก

กรณีนี้เป็นหลักการที่ผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ. นำไปใช้แก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้นจริงดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.2.4 โดยทำการแบ่งแยกบัสที่มีกำลังการผลิตมากที่สุดในเขตพื้นที่ที่เกิดปัญหา คือ ทำการแบ่งแยกที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือและพระนครใต้ ซึ่งมีกำลังผลิตขนาด 700 และ 1,658 ตามลำดับ โดยสามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดได้ ในขณะที่ไม่เกิดการละเมิดเงื่อนไขการทำงานอื่นๆ ซึ่งแสดงผลของระดับแรงดันที่บัส และขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส เปรียบเทียบกับกรณีฐานดังรูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.23 ตามลำดับ



รูปที่ 5.22 ขนาดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.23 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากกรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังมาก

5.2.1.1.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ

สำหรับกรณีนี้จะทำการหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียว ซึ่งในการทดสอบนี้ กำหนดให้จำนวนของบัสที่จะทำการแบ่งแยกมีค่ามากกว่าจำนวนของบัสที่คาดว่าจะทำการแบ่งแยกเพื่อแก้ไขปัญหา โดยในการทดสอบนี้กำหนดให้มีการแบ่งแยกบัสในระบบสูงสุดได้จำนวน 3 บัส โดยเลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 200 คำตอบและค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด เท่ากับ 200 รอบ ซึ่งผลของการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยกบัสของแต่ละรอบการค้นหาแสดงดังตารางที่ ค.2 ในส่วนของภาคผนวก ค

จากผลการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยกบัสของทุกรอบในตารางที่ ค.2 เมื่อทำการพิจารณาเฉพาะชุดคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นจากทุกรอบการค้นหา สามารถแสดงดังตารางที่ 5.8 โดยในการค้นหาเจอคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นทั้งหมด 10 คำตอบ

ตารางที่ 5.8 ผลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส และไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

Answer Local	Location 1	Location 2	Location 3	Point
1	11813	11808	0	540000
2	11815	0	11808	540000
3	11816	0	0	450000
4	0	0	0	460000
5	0	11808	11815	540000
6	11808	11813	0	540000
7	11813	0	11808	540000
8	11815	11808	0	540000
9	11808	0	11815	540000
10	0	0	11807	450000

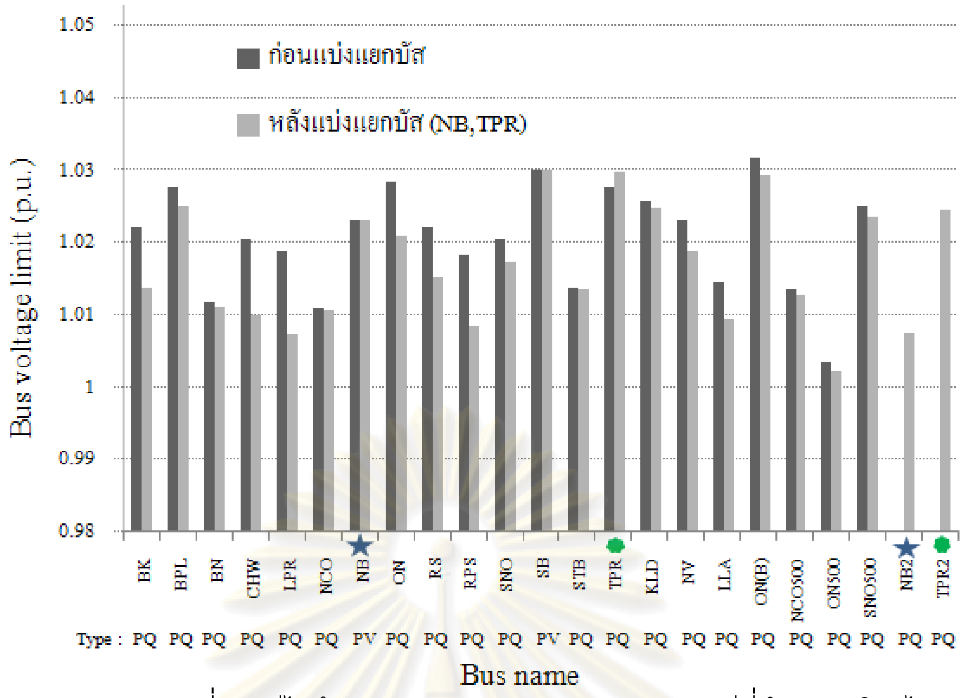
จากผลการค้นหาที่แสดงในตารางที่ 5.8 เมื่อทำการพิจารณาเฉพาะชุดคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น พบว่ามีจำนวนคำตอบทั้งหมด 2 คำตอบที่มีจำนวนตำแหน่งการแบ่งแยกน้อยที่สุด คือการแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ (11808) กับสถานีไฟฟ้าพระนครใต้ (11813) ตามวิธีการแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมาก และอีกคำตอบหนึ่งคือการแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และสถานีไฟฟ้าเทพารักษ์ (11815) โดยเมื่อนำคำตอบมาเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรที่สูงที่สุดในระบบจากน้อยไปหามาก สามารถแสดงดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ผลการเรียงลำดับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส และไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

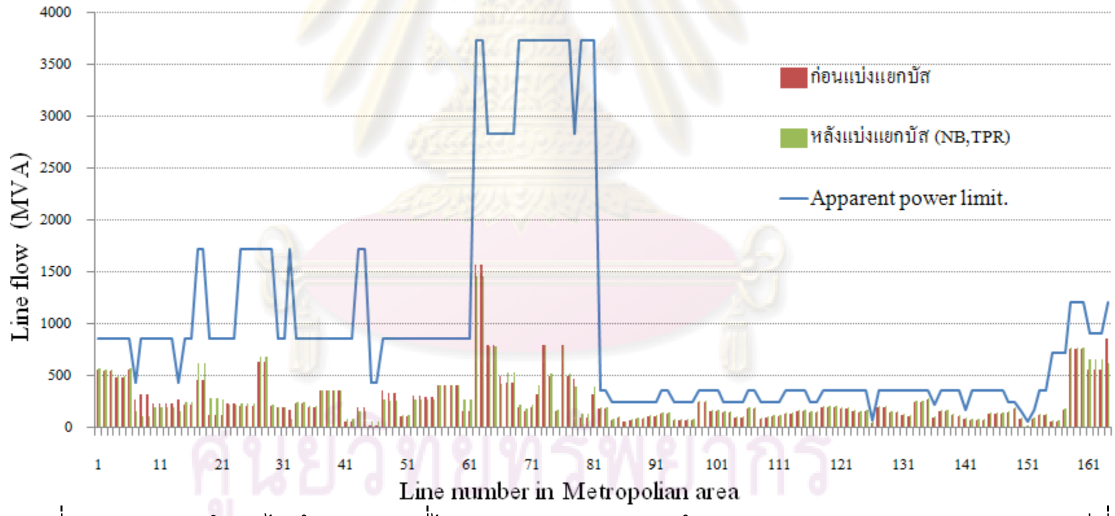
Answer	Location 1	Location 2	Location 3	Point	Max Isc (kA)
1	**0**	**11808**	**11815**	**540000**	**46.851722**
2	0	11808	11813	540000	47.54856925

จากตารางที่ 5.9 สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ โดยพิจารณาจากคำตอบที่มีจำนวนรวมของบัสที่ทำการแบ่งแยกน้อยที่สุด และมีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในระบบน้อยที่สุด โดยคำตอบที่เหมาะสมที่สุด คือ การแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และสถานีไฟฟ้าเทพารักษ์ และเมื่อทำการแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์จากโปรแกรมหาจำนวนและตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม พบว่าสามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดได้ โดยที่ไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบ สามารถแสดงผลของระดับแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขนาดกระแสลัดวงจรที่บัสเปรียบเทียบกับกรณีฐานแสดงดังรูปที่ 5.24 ถึง 5.27 ตามลำดับ

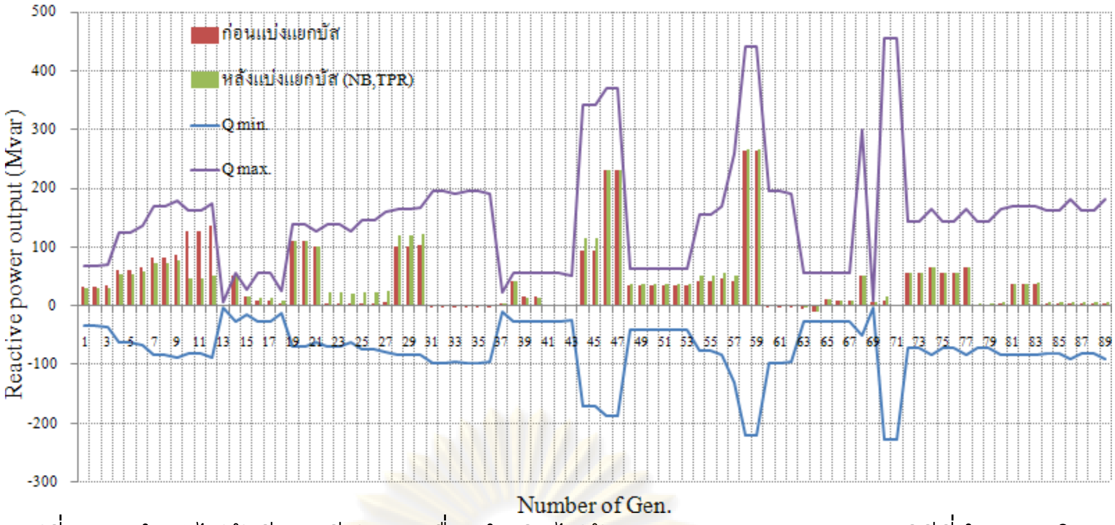
ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



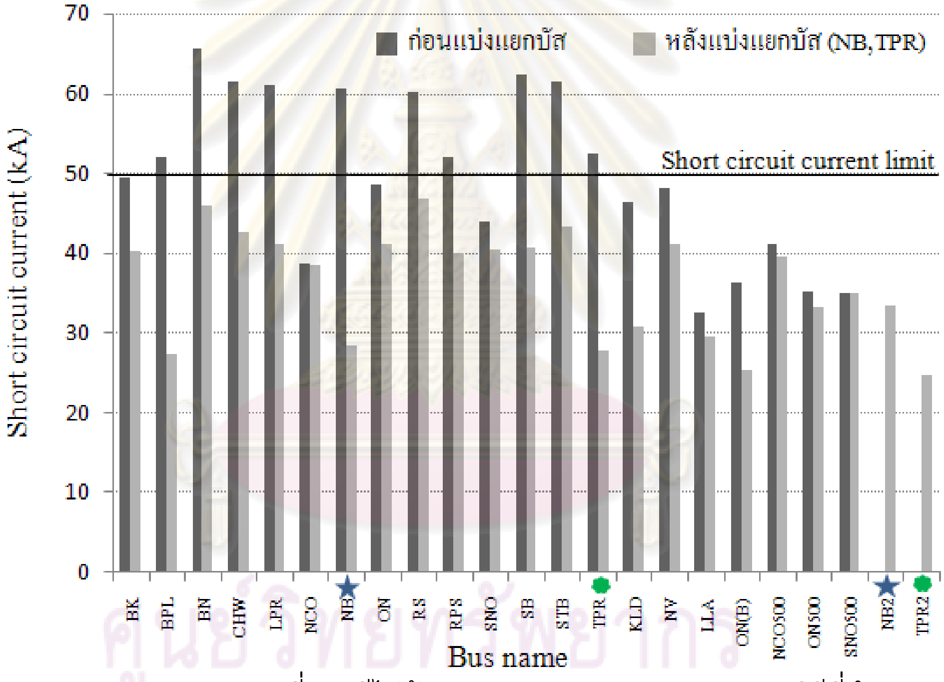
รูปที่ 5.24 ขนาดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง



รูปที่ 5.25 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลง จากการแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง



รูปที่ 5.26 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง



รูปที่ 5.27 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

5.2.1.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส ตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

จากผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสโดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงทั้ง 3 กรณีที่นำเสนอ สามารถแสดงผลสรุปของทุกกรณีการทดสอบดังตารางที่ 5.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.10 สรุปผลการทดสอบทุกกรณีของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส เมื่อทดสอบกับระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงในเขตกรุงเทพและปริมณฑล โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

กรณีการแบ่งแยกบัส	บัสที่แบ่งแยก	เงื่อนไขที่ละเมิด	บัสที่กระแสลัดวงจรเกิน	กระแสลัดวงจรค่ามากที่สุด ณ บัสที่แบ่งแยก		
				ก่อนแบ่ง (kA)	หลังแบ่ง (kA)	ลดลง (%)
1) พื้นฐาน	-	กระแสลัดวงจร	BPL, BN, CHW, LPR, NB, RS, RPS, SB, STB, TPR	-	-	-
2) กำลังมากที่สุดในระบบ	NB, SB	-	-	60.57, 62.39	26.65, 31.74	56.00, 49.13
3) หลักการที่นำเสนอ	NB, TPR	-	-	60.57, 52.45	28.50, 27.71	52.95, 47.17

ผลการทดสอบสมรรถนะแสดงให้เห็นว่า จำนวนและตำแหน่งการแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ สามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินในระบบได้โดยที่ไม่มีการละเมิดเงื่อนไขการทำงานของระบบ โดยมีจำนวนบัสที่ทำการแบ่งแยกเท่ากับ 2 บัส ซึ่งเท่ากันกับการแบ่งแยกตามหลักปฏิบัติของ กฟผ. แต่ค่ากระแสลัดวงจรที่สูงสุดหลังจากการแบ่งแยกตามวิธีที่นำเสนอ มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการแบ่งแยกบัสตามหลักปฏิบัติของ กฟผ.

5.2.1.2 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR

ในการทดสอบนี้จะประยุกต์วิธีการติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัส แทนการแบ่งแยกบัสแบบถาวร โดยมีรูปแบบการทดสอบเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้ในการทดสอบกับระบบทดสอบ RTS-79 ในหัวข้อ 5.1.2 และใช้ช่วงขนาดที่เหมาะสมของ CLR ในช่วงขนาด 0.001 ถึง 0.1 pu. โดยมีค่าความละเอียดของการหาขนาดติดตั้ง CLR เท่ากับ 0.001 pu. ตามที่ได้ทดสอบติดตั้ง CLR ในระบบจริง แล้วดูผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่ากระแสลัดวงจรที่บัสในหัวข้อ 3.5

5.2.1.2.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ

ในการทดสอบนี้อนุญาตให้มีตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง CLR ในระบบสูงสุดได้จำนวน 3 บัส โดยเลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 950 คำตอบและค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด เท่ากับ 400 รอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

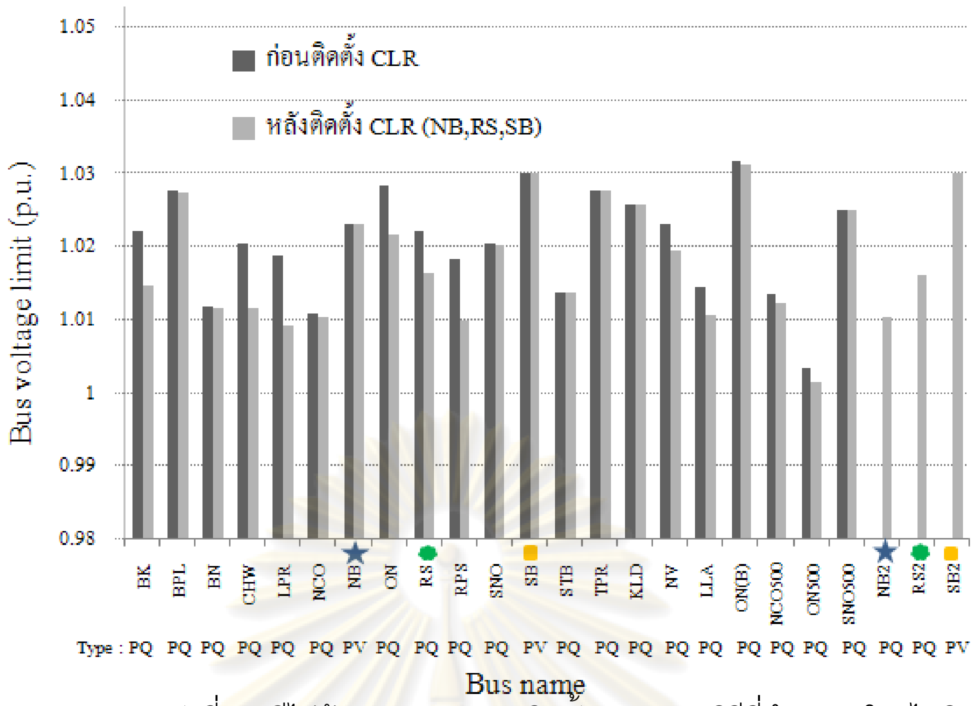
จากผลการค้นหาคำตอบของแต่ละรอบการคำนวณ สามารถนำคำตอบมาเรียงลำดับตามขนาดของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง และค่ากระแสลัดวงจรที่สูงที่สุดในระบบจากน้อยไปหามาก ซึ่งสามารถแสดงดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 ผลการเรียงลำดับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR และไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

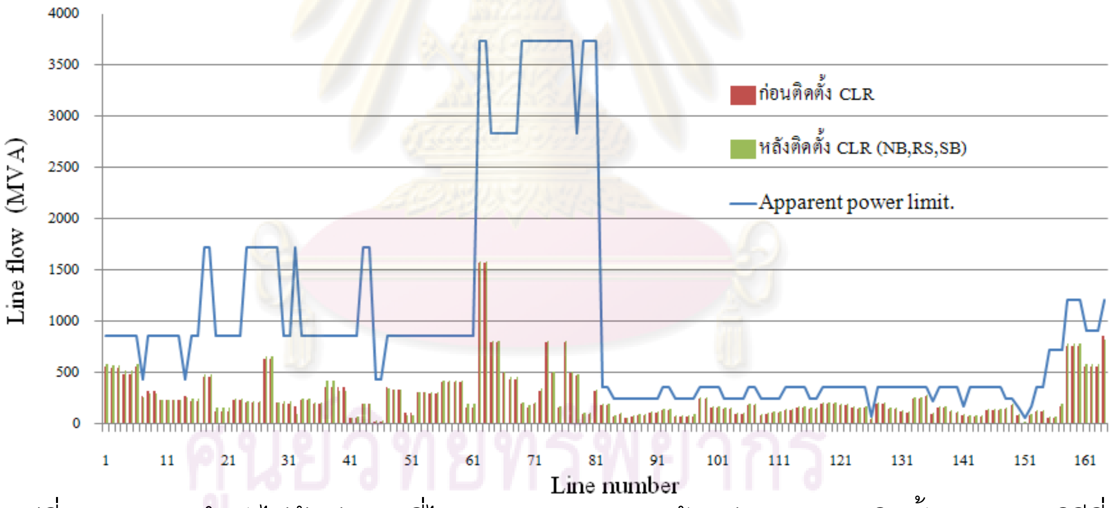
Answer	Location 1	Location 2	Location 3	CLR 1 (pu.)	CLR 2 (pu.)	CLR 3 (pu.)	Total CLR (pu.)	Point	Max Isc (kA)
1	**11808**	**11810**	**11813**	**0.022**	**0.002**	**0.023**	**0.047**	**500021.277**	**49.86971**
2	11808	11810	11813	0.021	0.002	0.024	0.047	500021.2766	49.8715331
3	11808	11810	11813	0.023	0.002	0.022	0.047	500021.2766	49.8845553
4	11808	11810	11813	0.02	0.002	0.025	0.047	500021.2766	49.8900775
5	11808	11810	11813	0.024	0.002	0.021	0.047	500021.2766	49.9161894
6	11808	11810	11813	0.019	0.002	0.026	0.047	500021.2766	49.9255637
7	11808	11810	11813	0.027	0.001	0.019	0.047	500021.2766	49.9576699
8	11808	11810	11813	0.025	0.002	0.02	0.047	500021.2766	49.9649018
9	11808	11810	11813	0.024	0.002	0.022	0.048	500020.8333	49.7602475
10	11808	11810	11813	0.028	0.001	0.019	0.048	500020.8333	49.8613219
11	11808	11810	11813	0.024	0.003	0.021	0.048	500020.8333	49.9104484

จากตารางที่ 5.11 สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ โดยพิจารณาจากคำตอบที่มีขนาดรวมของ CLR ที่ทำการติดตั้งน้อยที่สุด และมีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในระบบน้อยที่สุด โดยมีตำแหน่งของการติดตั้ง CLR ที่เหมาะสมจำนวน 3 สถานีไฟฟ้า คือ การติดตั้ง CLR ที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ (11808) สถานีไฟฟ้ารังสิต (11810) และสถานีไฟฟ้าพระนครใต้ (11813) โดยมีขนาดติดตั้ง CLR ที่เหมาะสม คือ 0.022, 0.002 และ 0.023 pu. ตามลำดับ และเมื่อทำการติดตั้ง CLR ตามผลลัพธ์จากโปรแกรมหาตำแหน่งและขนาดติดตั้งที่เหมาะสม พบว่าสามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดได้ โดยที่ไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบ ซึ่งแสดงผลของระดับแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขนาดกระแสลัดวงจรที่บัสเปรียบเทียบกับกรณีฐานแสดงดังรูปที่ 5.28 ถึง 5.31 ตามลำดับ

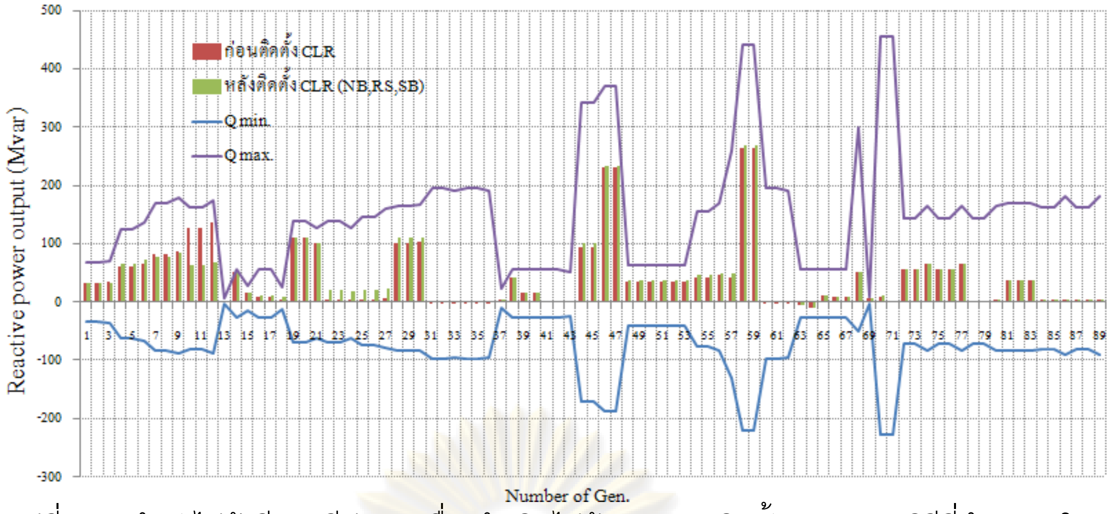
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



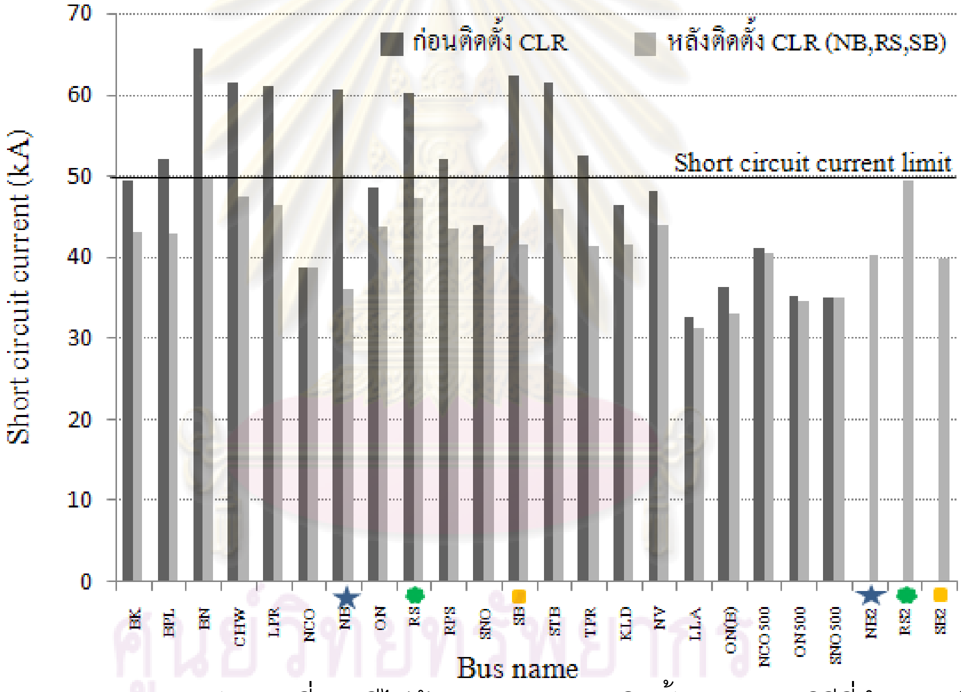
รูปที่ 5.28 ขนาดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง



รูปที่ 5.29 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง



รูปที่ 5.30 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง



รูปที่ 5.31 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.1.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ

ผลคำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาค่าที่เหมาะสม พบว่าทุกตำแหน่งในการติดตั้ง CLR เป็นตำแหน่งที่มีค่ากระแสลัดวงจรเกิน 60 kA และตำแหน่งกระจายตัวอยู่ครอบคลุมพื้นที่ในเขตที่เกิดปัญหา ที่สถานีไฟฟ้ารังสิต สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และสถานีไฟฟ้าพระนครใต้ ซึ่งเมื่อพิจารณาคำตอบที่แสดงในตารางที่ 5.11 พบว่าไม่มีคำตอบที่ใช้ตำแหน่งในการติดตั้งเพียง 2 ตำแหน่ง

เนื่องจากการติดตั้งเพียง 2 ตำแหน่งจำเป็นต้องใช้ขนาดรวมของการติดตั้งมากกว่าการติดตั้ง 3 ตำแหน่ง ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกรณีทดสอบนี้ให้น้ำหนักของขนาดรวมของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง มากกว่าจำนวนตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้งนั่นเอง

5.2.1.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

ในการทดสอบนี้จะประยุกต์วิธีการแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัส โดยมีรูปแบบการทดสอบเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้ในการทดสอบกับระบบทดสอบ RTS-79 ในหัวข้อ 5.1.3 และใช้ช่วงขนาดที่เหมาะสมของ CLR ในช่วงขนาด 0.001 ถึง 0.1 pu. โดยมีค่าความละเอียดของการหาขนาดติดตั้ง CLR เท่ากับ 0.001 pu. ตามที่ได้ทดสอบติดตั้ง CLR ในระบบจริงที่ใช้ในการทดสอบ แล้วดูผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่ากระแสลัดวงจรที่บัสในหัวข้อ 3.5

5.2.1.3.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ

ในการทดสอบนี้อนุญาตให้มีตำแหน่งที่ทำการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ในระบบสูงสุดได้จำนวน 3 บัส โดยเลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 950 คำตอบและค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด เท่ากับ 400 รอบ

จากผลการค้นหาคำตอบของแต่ละรอบการคำนวณ สามารถนำคำตอบมาเรียงลำดับตามจำนวนตำแหน่งที่ใช้ในการแบ่งแยกหรือติดตั้ง CLR ขนาดของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง และค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในระบบจากน้อยไปหามาก ซึ่งสามารถแสดงดังตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 ผลการเรียงลำดับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสหรือติดตั้ง CLR และไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

Answer	Location 1	Location 2	Location 3	CLR 1 (pu.)	CLR 2 (pu.)	CLR 3 (pu.)	Total CLR (pu.)	Point	Max Isc (kA)
1	0	11808	11815	0	Inf.	Inf.	0	542000	46.8517
2	0	11808	11813	0	Inf.	Inf.	0	542000	47.548569
3	0	11808	11815	0	0.038	Inf.	0.038	540026.3	49.969123
4	0	11808	11815	0	0.039	Inf.	0.039	540025.6	49.907417
5	0	11808	11815	0	0.04	Inf.	0.04	540025	49.848101
6	0	11808	11815	0	0.041	Inf.	0.041	540024.4	49.79104
7	0	11808	11815	0	0.042	Inf.	0.042	540023.8	49.736107
8	0	11808	11815	0	0.043	Inf.	0.043	540023.3	49.683185
9	0	11808	11815	0	0.044	Inf.	0.044	540022.7	49.632167
10	0	11808	11815	0	0.045	Inf.	0.045	540022.2	49.582951

จากตารางที่ 5.12 สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ โดยพิจารณาจากคำตอบที่มีจำนวนที่น้อยที่สุดของตำแหน่งในการแบ่งแยกหรือติดตั้ง CLR ขนาดรวมที่น้อยที่สุด

ของ CLR ที่ทำการติดตั้ง และค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในระบบที่น้อยที่สุดเรียงตามลำดับ โดยมีตำแหน่งของการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ที่เหมาะสมจำนวน 2 สถานีไฟฟ้า คือ การแบ่งแยกบัสแบบถาวรที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ (11808) และสถานีไฟฟ้าเทพารักษ์ (11815) ซึ่งเป็นคำตอบเดียวกันกับการทดสอบในกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียว ดังนั้นเมื่อทำการแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม จึงสามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดได้ โดยที่ไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบ ซึ่งแสดงผลของระดับแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขนาดกระแสลัดวงจรที่บัสเปรียบเทียบกับกรณีฐานแสดงดังรูปที่ 5.24 ถึง 5.27 ตามลำดับ

5.2.1.3.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ

ผลคำตอบที่ได้จากการทดสอบในกรณีนี้ เป็นคำตอบเดียวกันกับการทดสอบในกรณีใช้วิธีแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวในหัวข้อ 5.2.1.1 เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับการทดสอบกับระบบ RTS -79 คือ การทดสอบในกรณีนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการหาจำนวนตำแหน่งในการแบ่งแยกหรือติดตั้ง และหาขนาดรวมของการติดตั้ง CLR น้อยที่สุด ซึ่งจากการทดสอบในกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวนั้นมีคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม จึงไม่มีความจำเป็นต้องติดตั้ง CLR ดังนั้นในการทดสอบนี้เมื่อพิจารณากรณีติดตั้ง CLR ร่วมด้วย จึงทำให้คำตอบที่ได้มาเป็นคำตอบเดียวกัน

5.2.2 ผลการทดสอบกรณีพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

เนื่องจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ ถูกทำการลดรูปเพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าในเขตกรุงเทพและปริมณฑลของ กฟผ. ทำให้ในกรณีฐานที่ยังไม่มีการแบ่งแยกบัสในระบบ เกิดปัญหาไม่ผ่านเงื่อนไขความมั่นคง n-1 ของระบบ ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงทำการปรับเปลี่ยนค่าขีดจำกัดแรงดัน สายส่ง หม้อแปลงและขีดจำกัดการจ่ายกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้ระบบสามารถรองรับเงื่อนไขความมั่นคง n-1 ในกรณีที่ยังไม่มีการแบ่งแยกบัสใดๆ โดยมีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

5.2.2.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของการแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ กับวิธีการแบ่งแยกบัส ที่ผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ. นำมาใช้ ดังนั้นจะแบ่งการทดสอบผลออกเป็น 3 กรณี ได้แก่

1) กรณีฐาน

2) กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมากในระบบ

3) กรณีแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ

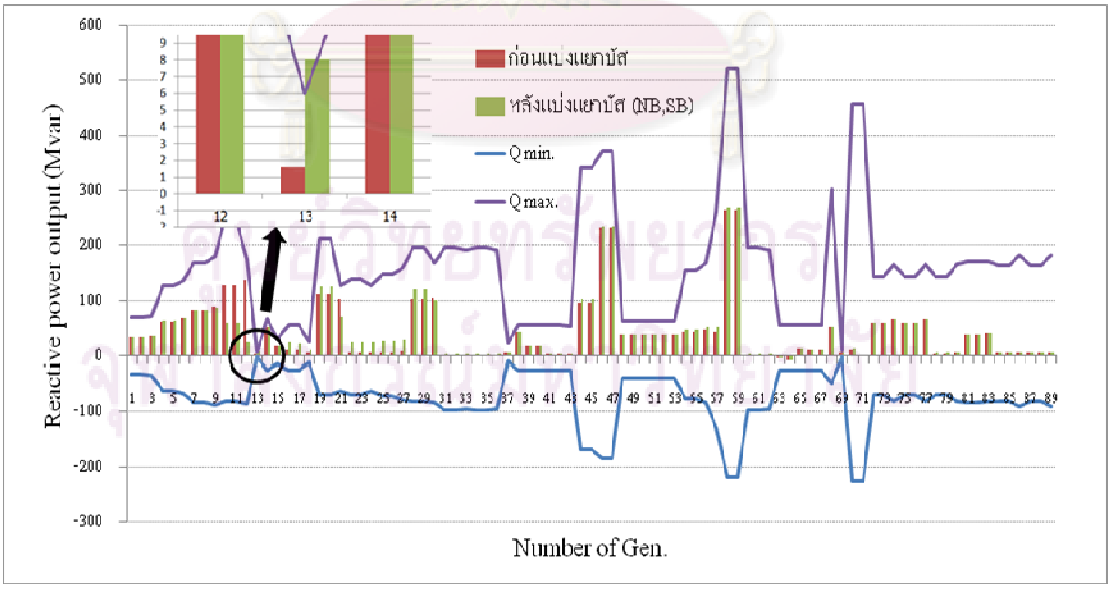
โดยผลการทดสอบของแต่ละกรณี แสดงดังต่อไปนี้

5.2.2.1.1 กรณีฐาน

เป็นกรณีที่ไม่มีการแบ่งแยกบัสในระบบทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับต่างๆ รวมถึงเงื่อนไขความมั่นคง n-1 ของระบบ แต่ในกรณีฐานยังมีปัญหากระแสลัดวงจรเกินขีดจำกัดซึ่งเป็นปัญหาเดียวกันกับการทดสอบในกรณีก่อนหน้านี้ คือ กรณีไม่พิจารณาเงื่อนไขวามมั่นคงของระบบ โดยสามารถแสดงการเกินพิกัดของกระแสลัดวงจรดังรูปที่ 5.21

5.2.2.1.2 กรณีแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมาก

กรณีนี้เป็นหลักการที่ผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ. นำไปใช้แก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้นจริง โดยทำการแบ่งแยกบัสที่มีกำลังการผลิตมากที่สุดในเขตพื้นที่ที่เกิดปัญหา คือ ทำการแบ่งแยกที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือและพระนครใต้ ซึ่งมีกำลังผลิตขนาด 700 และ 1,658 ตามลำดับ โดยสามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดได้ แต่เมื่อพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง n-1 เกิดการละเมิดเงื่อนไขกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 13 ดังรูปที่ 5.40 โดยมีสาเหตุเนื่องมาจากสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสรังสิต 230 kV (11810) กับบัสรังสิต 115 kV (11740) หลุดออกจากระบบ ดังนั้นทำให้การแบ่งแยกบัสตามหลักปฏิบัติของ กฟผ. ไม่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาได้ เมื่อพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงร่วมด้วย



รูปที่ 5.32 การละเมิดเงื่อนไขกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการแบ่งแยกบัสตามหลักปฏิบัติของ กฟผ. โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

5.2.2.1.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสตามวิธีการที่นำเสนอ

สำหรับกรณีนี้จะทำการหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียว ซึ่งในการทดสอบนี้ กำหนดให้จำนวนของบัสที่จะทำการแบ่งแยกมีค่ามากกว่าจำนวนของบัสที่คาดว่าจะทำการแบ่งแยกเพื่อแก้ไขปัญหา โดยในการทดสอบนี้กำหนดให้มีการแบ่งแยกบัสในระบบสูงสุดได้จำนวน 3 บัส โดยเลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 300 คำตอบและค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด เท่ากับ 300 รอบ

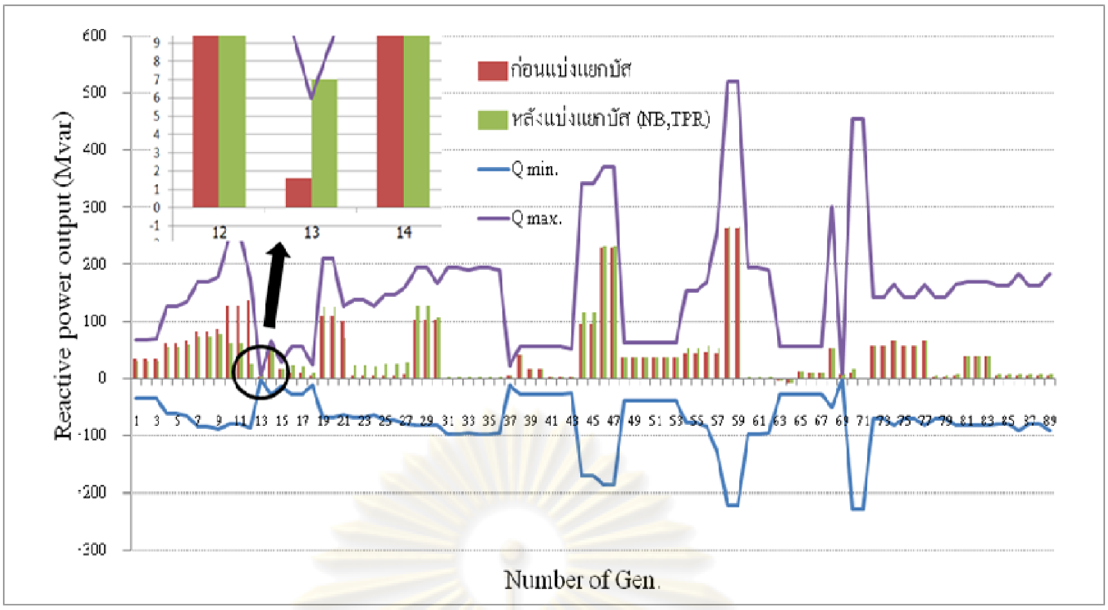
จากผลการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยกบัสของทุกรอบ เมื่อทำการพิจารณาเฉพาะชุดคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นจากทุกรอบการค้นหา สามารถแสดงดังตารางที่ 5.13 โดยมีทั้งหมด 6 คำตอบ

ตารางที่ 5.13 ผลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส และพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

Answer Local	Location 1	Location 2	Location 3	Point
1	11808	0	11815	540000
2	0	11808	11813	540000
3	11815	0	11808	540000
4	0	11813	11808	540000
5	0	11808	11815	540000
6	0	0	0	460000

จากผลการค้นหาที่แสดงในตารางที่ 5.13 เมื่อทำการพิจารณาค่าคุณภาพของแต่ละคำตอบ พบว่าค่าคุณภาพของคำตอบที่ดีที่สุด คือ 540000 ซึ่งหมายความว่าคำตอบนี้สามารถลดกระแสลัดวงจรให้ต่ำกว่าพิกัดได้แต่ไม่สามารถผ่านเงื่อนไขความมั่นคง n-1 ของระบบ ซึ่งมีค่าคุณภาพคำตอบที่ 600000 ตามที่ได้อธิบายในขั้นตอนวิเคราะห์คุณภาพคำตอบในหัวข้อ 4.3.2.2

คำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม ไม่สามารถผ่านเงื่อนไขความมั่นคง n-1 ของระบบ โดยมีสาเหตุเนื่องมาจากสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสรังสิต 230 kV (11810) กับบัสรังสิต 115 kV (11740) หลุดออกจากระบบ ทำให้เกิดการละเมิดเงื่อนไขกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 13 ดังรูปที่ 5.41



รูปที่ 5.33 การละเมิดเงื่อนไขกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการแบ่งแยกบัสตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวในการแก้ปัญหา คำตอบที่ดีที่สุดซึ่งได้จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสมมีการละเมิดเงื่อนไขบังคับ ดังนั้นในกรณีทดสอบกับระบบจริงของ กฟผ. เมื่อพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง วิธีการแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวจึงไม่สามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้นได้

5.2.2.1.4 **วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับตามวิธีที่นำเสนอ**

จากผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสโดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงทั้ง 3 กรณีที่นำเสนอ สามารถแสดงผลสรุปของทุกกรณีการทดสอบดังตารางที่ 5.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.14 สรุปผลการทดสอบทุกกรณีของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส เมื่อทดสอบกับระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงในเขตกรุงเทพและปริมณฑล โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

กรณีการแบ่งแยกบัส	บัสที่แบ่งแยก	เงื่อนไขที่ละเมิด	บัสที่กระแสลัดวงจรเกิน	กระแสลัดวงจรค่ามากที่สุด ณ บัสที่แบ่งแยก		
				ก่อนแบ่ง (kA)	หลังแบ่ง (kA)	ลดลง (%)
1) พื้นฐาน	-	กระแสลัดวงจร	BPL, BN, CHW, LPR, NB, RS, RPS, SB, STB,	-	-	-
2) กำลังมากที่สุดในระบบ	NB, SB	ความมั่นคง	-	60.57, 62.39	26.65, 31.74	56.00, 49.13
3) หลักการที่นำเสนอ	NB, TPR	ความมั่นคง	-	60.57, 52.45	28.50, 27.71	52.95, 47.17

ผลการทดสอบสมรรถนะแสดงให้เห็นว่า แบ่งแยกบัสตามหลักปฏิบัติของ กฟผ. และการแบ่งแยกบัสตามคำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม ไม่สามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินในระบบได้โดยที่ไม่มีการละเมิดเงื่อนไขการทำงานของระบบ เมื่อพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงร่วมด้วย ซึ่งเงื่อนไขที่มีการละเมิดของทั้ง 2 กรณี ก็คือเงื่อนไขความมั่นคง n-1 นั่นเอง

5.2.2.2 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR

ในการทดสอบนี้จะประยุกต์วิธีการติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัส แทนการแบ่งแยกบัสแบบถาวร โดยมีรูปแบบการทดสอบเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้ในการทดสอบกับระบบทดสอบ RTS-79 ในหัวข้อ 5.1.2 และใช้ช่วงขนาดที่เหมาะสมของ CLR ในช่วงขนาด 0.001 ถึง 0.1 pu. โดยมีค่าความละเอียดของการหาขนาดติดตั้ง CLR เท่ากับ 0.001 pu. ตามที่ได้ทดสอบติดตั้ง CLR ในระบบจริง แล้วดูผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่ากระแสลัดวงจรที่บัสในหัวข้อ 3.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.2.2.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ

ในการทดสอบนี้อนุญาตให้มีตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง CLR ในระบบสูงสุดได้จำนวน 3 บัส โดยเลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 950 คำตอบและค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด เท่ากับ 400 รอบ ซึ่งผลของการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง CLR ของแต่ละรอบการคำนวณ แสดงดังตารางที่ ค.3 ในเนื้อหาส่วนภาคผนวก ค

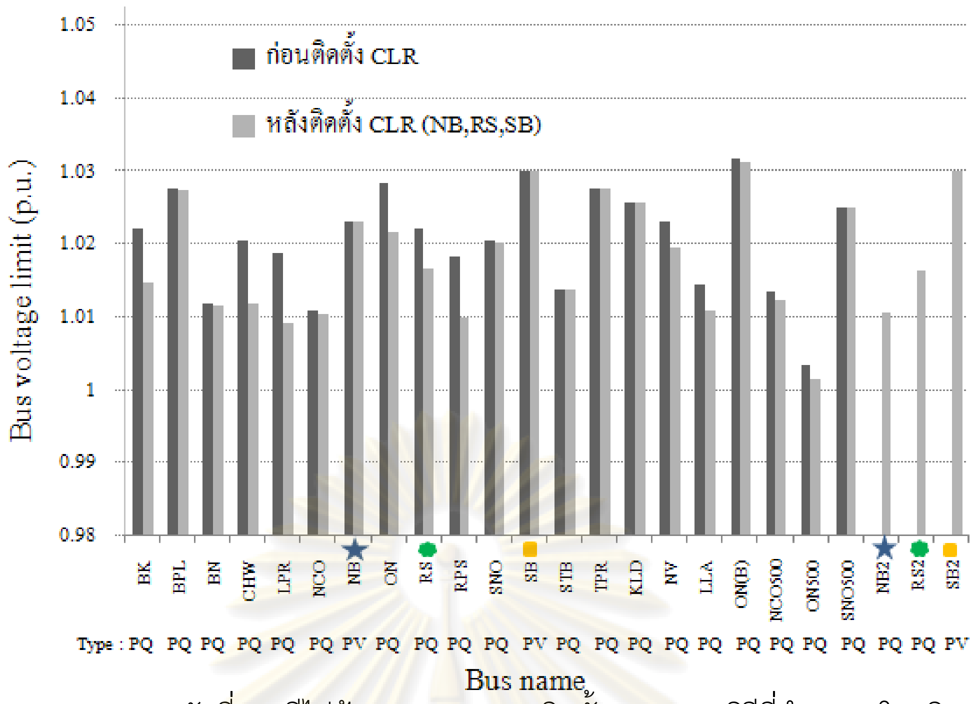
จากผลการค้นหาคำตอบของแต่ละรอบการคำนวณจากตารางที่ ค.5 สามารถนำคำตอบมาเรียงลำดับตามขนาดของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง และค่ากระแสลัดวงจรที่สูงที่สุดในระบบจากน้อยไปหามาก ซึ่งสามารถแสดงดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 ผลการเรียงลำดับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR และพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

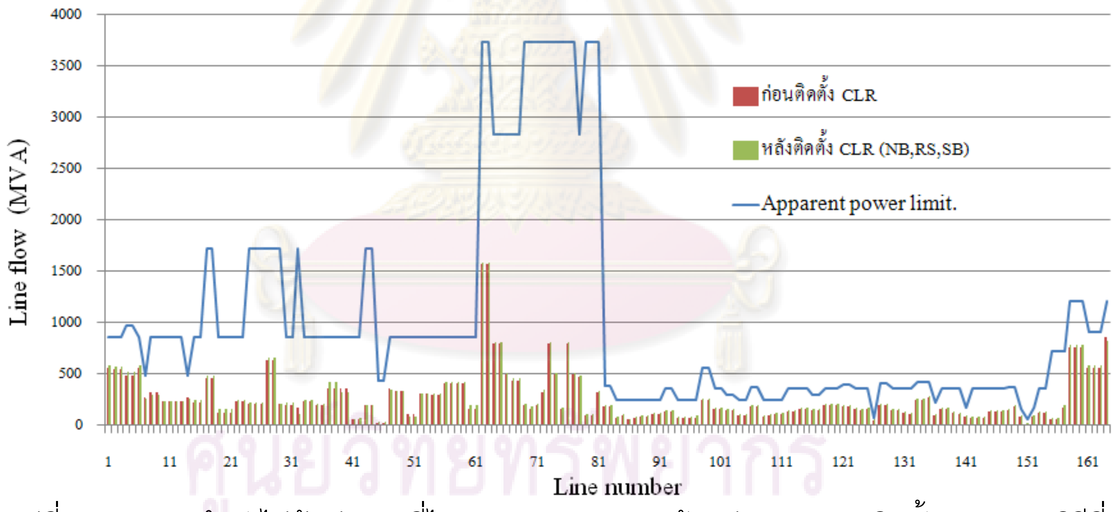
Answer	Location 1	Location 2	Location 3	CLR 1 (pu.)	CLR 2 (pu.)	CLR 3 (pu.)	Total CLR (pu.)	Point	Max Isc (kA)
1	**11808**	**11810**	**11813**	**0.02**	**0.002**	**0.025**	**0.047**	**600021.277**	**49.89008**
2	11808	11810	11813	0.027	0.001	0.019	0.047	600021.2766	49.9576699
3	11808	11810	11813	0.028	0.001	0.019	0.048	600020.8333	49.8613219
4	11808	11810	11813	0.019	0.002	0.027	0.048	600020.8333	49.8984785
5	11808	11810	11813	0.029	0.001	0.018	0.048	600020.8333	49.926481
6	11808	11810	11813	0.027	0.001	0.02	0.048	600020.8333	49.9573815
7	11808	11813	11820	0.029	0.018	0.006	0.053	600018.8679	49.9291926
8	11808	11813	11820	0.03	0.018	0.005	0.053	600018.8679	49.938436
9	11808	11813	11820	0.031	0.017	0.005	0.053	600018.8679	49.956673
10	11808	11813	11820	0.032	0.017	0.004	0.053	600018.8679	49.9854938

จากตารางที่ 5.15 สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ โดยพิจารณาจากคำตอบที่มีขนาดรวมของ CLR ที่ทำการติดตั้งน้อยที่สุด และมีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในระบบน้อยที่สุด โดยมีตำแหน่งของการติดตั้ง CLR ที่เหมาะสมจำนวน 3 สถานีไฟฟ้า คือ การติดตั้ง CLR ที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ (11808) สถานีไฟฟ้ารังสิต (11810) และสถานีไฟฟ้าพระนครใต้ (11813) โดยมีขนาดติดตั้ง CLR ที่เหมาะสม คือ 0.02, 0.002 และ 0.025 pu. ตามลำดับ และเมื่อทำการติดตั้ง CLR ตามผลลัพธ์จากโปรแกรมหาตำแหน่งและขนาดติดตั้งที่เหมาะสม พบว่าสามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดได้ โดยที่ไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบ และผ่านเงื่อนไขความมั่นคง n-1 ของระบบ ซึ่งแสดงผลของระดับแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขนาดกระแสลัดวงจรที่บัสเปรียบเทียบกับกรณีฐานแสดงดังรูปที่ 5.34 ถึง 5.37 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

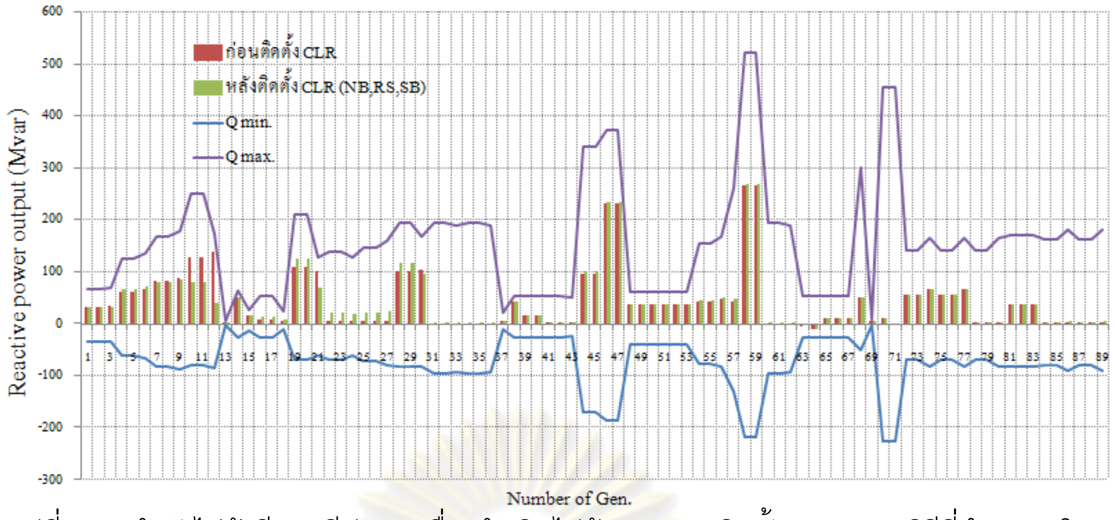


รูปที่ 5.34 ขนาดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

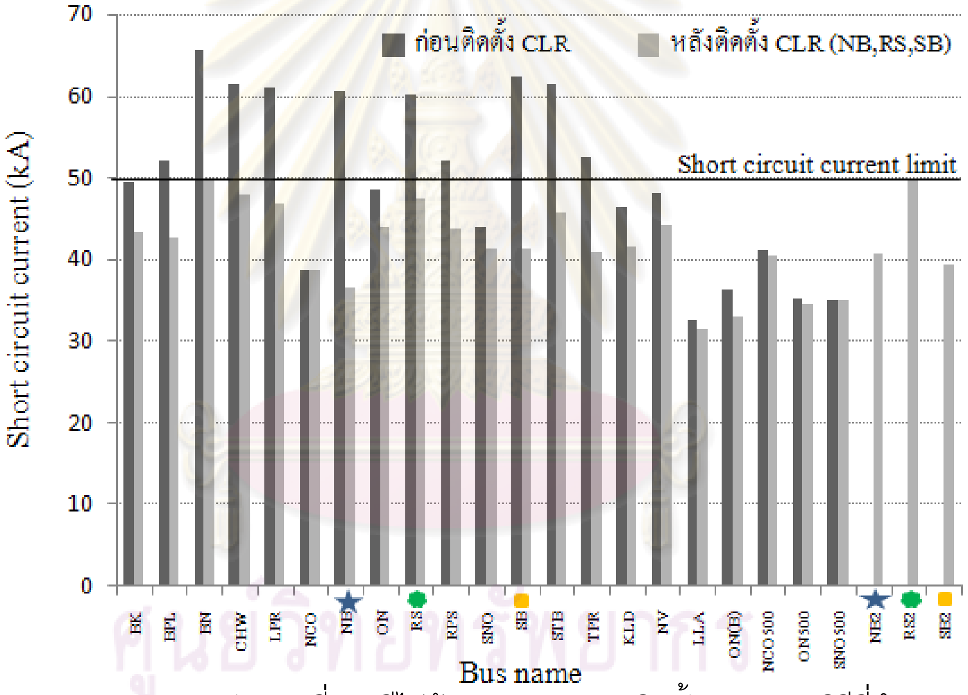


รูปที่ 5.35 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.36 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง



รูปที่ 5.37 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

5.2.2.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ

กรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR สามารถให้คำตอบที่เหมาะสมได้ ในกรณีที่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงร่วมด้วย เนื่องจากการติดตั้ง CLR แทนการแบ่งแยกบัสแบบถาวรส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส หรือกำลังที่ไหลในสายส่งน้อยกว่า ทำให้ในการพิจารณา

เงื่อนไขความมั่น n-1 ของระบบ มีโอกาสผ่านมากกว่า ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ในกรณีทดสอบก่อนหน้านี้ไม่มีคำตอบที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้ในกรณีนี้ จะเห็นได้ว่าผลคำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม มีตำแหน่งการติดตั้งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับคำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสมในกรณีที่ไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง แต่จะสังเกตได้ว่ามีขนาดติดตั้ง CLR ที่ไม่เหมือนกันกับคำตอบในกรณีที่ไม่พิจารณาความมั่นคงของระบบ เนื่องจากเมื่อเพิ่มการพิจารณาความมั่นคงของระบบ เปรียบเสมือนการเพิ่มเงื่อนไขบังคับเข้าไปในระบบ ทำให้จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้น้อยลงซึ่งทำให้คำตอบของจำนวนตำแหน่งและขนาดของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้งในกรณีที่ไม่พิจารณาความมั่นคง เกิดการละเมิดเงื่อนไขความมั่นคงนั่นเอง

5.2.2.3 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

ในการทดสอบนี้จะประยุกต์วิธีการแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัส โดยมีรูปแบบการทดสอบเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้ในการทดสอบกับระบบทดสอบ RTS-79 ในหัวข้อ 5.1.3 และใช้ช่วงขนาดที่เหมาะสมของ CLR ในช่วงขนาด 0.001 ถึง 0.1 pu. โดยมีค่าความละเอียดของการหาขนาดติดตั้ง CLR เท่ากับ 0.001 pu. ตามที่ได้ทดสอบติดตั้ง CLR ในระบบจริงที่ใช้ในการทดสอบ แล้วดูผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่ากระแสลัดวงจรที่บัสในหัวข้อ 3.5

5.2.2.3.1 กรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีการที่นำเสนอ

ในการทดสอบนี้อนุญาตให้มีตำแหน่งที่ทำการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ในระบบสูงสุดได้จำนวน 3 บัส โดยเลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 950 คำตอบและค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด เท่ากับ 400 รอบ ซึ่งผลของการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ของแต่ละรอบการคำนวณ

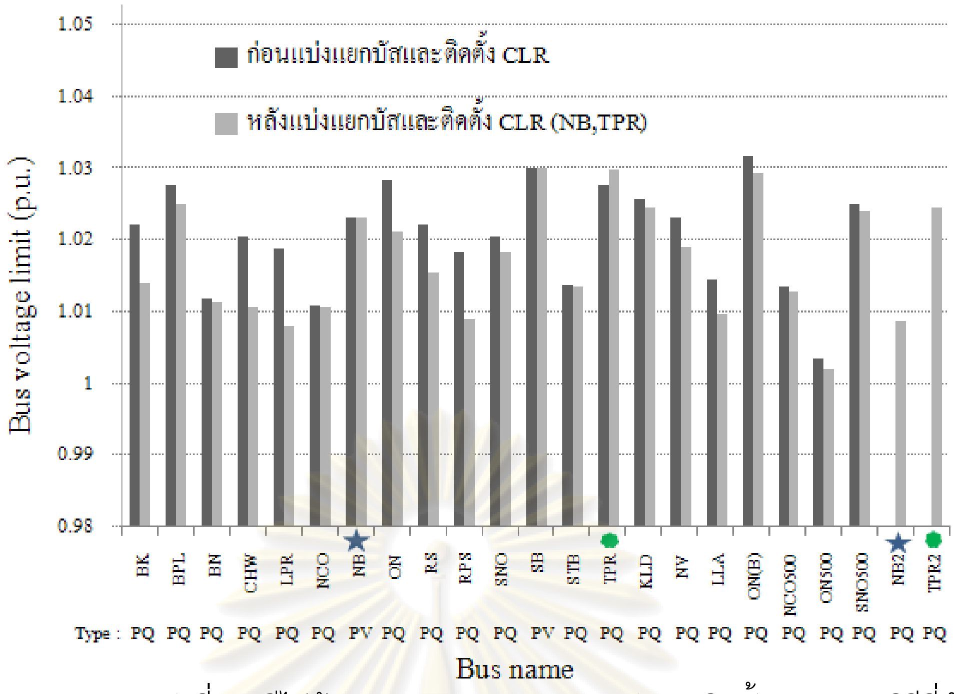
จากผลการค้นหาคำตอบของแต่ละรอบการคำนวณ สามารถนำคำตอบมาเรียงลำดับตามจำนวนตำแหน่งที่ใช้ในการแบ่งแยกหรือติดตั้ง CLR ขนาดของ CLR ที่ใช้ในการติดตั้ง และเรียงตามค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในระบบจากน้อยไปหามาก ซึ่งสามารถแสดงดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 ผลการเรียงลำดับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัส หรือติดตั้ง CLR และพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

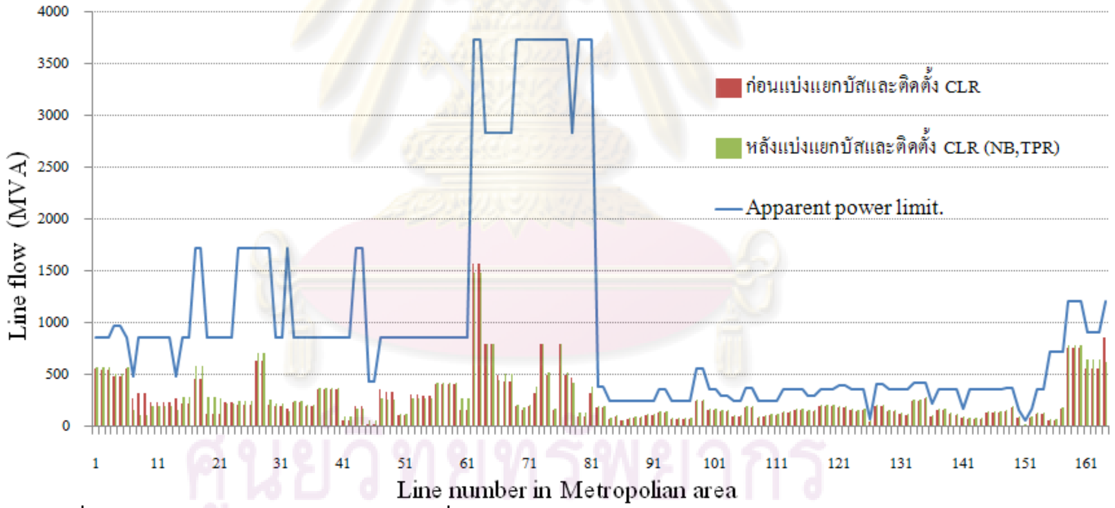
Answer	Location 1	Location 2	Location 3	CLR 1 (pu.)	CLR 2 (pu.)	CLR 3 (pu.)	Total CLR (pu.)	Point	Max Isc (kA)
1	0	11808	11815	0	0.038	Inf.	0.038	640026	49.9691
2	0	11808	11813	0	0.051	Inf.	0.051	640019.61	49.965707
3	0	11808	11813	0	0.052	Inf.	0.052	640019.23	49.928047
4	0	11808	11813	0	0.053	Inf.	0.053	640018.87	49.89154
5	0	11808	11813	0	0.052	0.013	0.065	640015.38	49.976001
:									
15	11808	11813	11815	0.038	0.005	Inf.	0.043	630023.26	49.973303
16	11808	11813	11815	0.038	0.006	Inf.	0.044	630022.73	49.969151
17	11808	11813	11815	0.038	0.007	Inf.	0.045	630022.22	49.965252
18	11808	11813	11815	0.038	0.008	Inf.	0.046	630021.74	49.961584
19	11808	11810	11813	0.02	0.002	0.025	0.047	630021.28	49.890077
20	11808	11810	11813	0.019	0.002	0.026	0.047	630021.28	49.925564
21	11808	11810	11813	0.027	0.001	0.019	0.047	630021.28	49.95767
22	11808	11813	11815	0.038	0.009	Inf.	0.047	630021.28	49.958128

จากตารางที่ 5.12 สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ โดยพิจารณาจากคำตอบที่มีจำนวนตำแหน่งที่น้อยที่สุดในการแบ่งแยกหรือติดตั้ง CLR ขนาดรวมที่น้อยที่สุดของ CLR ที่ทำการติดตั้ง และค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในระบบที่น้อยที่สุดเรียงตามลำดับ โดยมีตำแหน่งของการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ที่เหมาะสมจำนวน 2 สถานีไฟฟ้า คือ การติดตั้ง CLR ขนาด 0.038 pu. ที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ (11808) ร่วมกับการแบ่งแยกบัสแบบถาวรที่สถานีไฟฟ้าเทพารักษ์ (11815) และเมื่อทำการแบ่งแยกบัสตามผลลัพธ์จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม พบว่าสามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดได้ โดยที่ไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับ และผ่านเงื่อนไขความมั่นคง n-1 ของระบบ ซึ่งแสดงผลของระดับแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขนาดกระแสลัดวงจรที่บัสเปรียบเทียบกับกรณีฐานแสดงดังรูปที่ 5.38 ถึง 5.41 ตามลำดับ

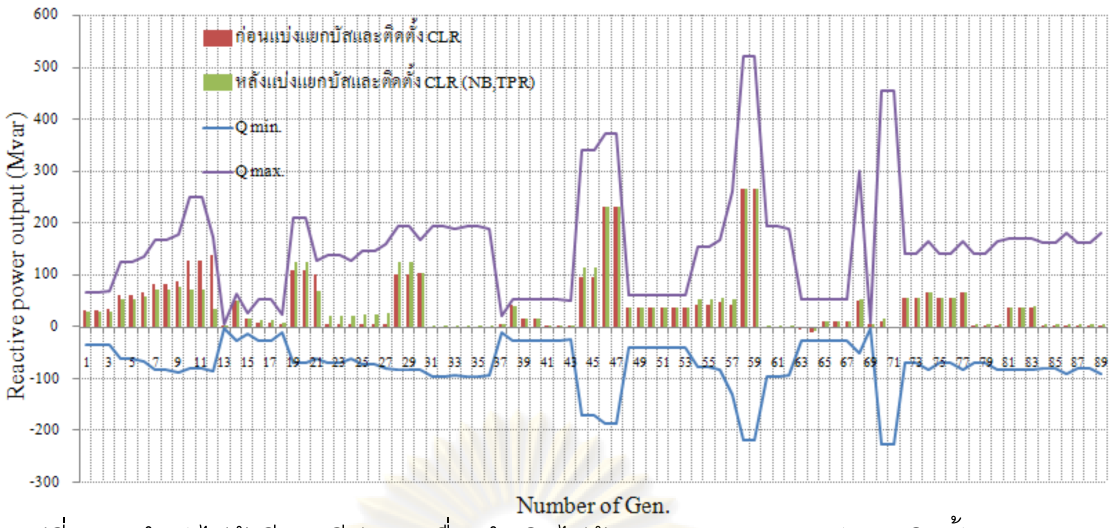
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



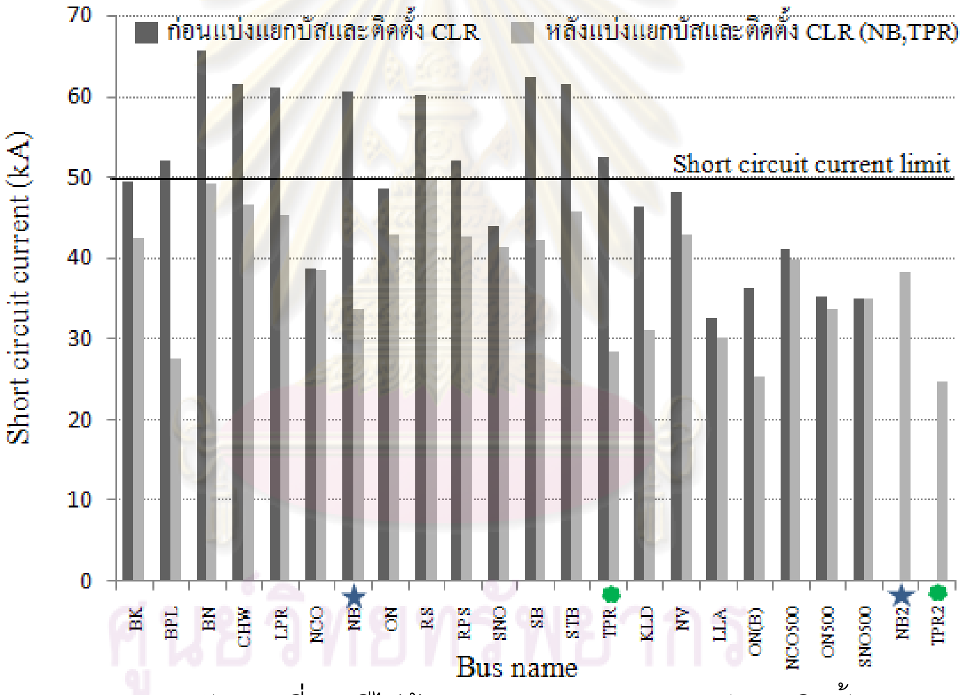
รูปที่ 5.38 ขนาดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการแบ่งแยกบัสและติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง



รูปที่ 5.39 ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลง จากการแบ่งแยกบัสและติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง



รูปที่ 5.40 กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการแบ่งแยกบัสและติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง



รูปที่ 5.41 ขนาดกระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการแบ่งแยกบัสและติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

5.2.2.3.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR ตามวิธีที่นำเสนอ

ผลคำตอบที่ได้จากการทดสอบในกรณีนี้ มีการผสมผสานกันระหว่างการแบ่งแยกบัสแบบถาวร และการติดตั้ง CLR เนื่องจากในกรณีทดสอบที่ประยุกต์ใช้การแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวในหัวข้อ 5.2.1.1.3 ไม่มีคำตอบที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมด ซึ่งคำตอบในกรณีทดสอบนี้มีตำแหน่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เดียวกันกับคำตอบที่ไม่ผ่านเงื่อนไขบังคับในกรณีประยุกต์ใช้การแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียว คือที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และเทพารักษ์ ซึ่งเมื่อเปลี่ยนจากการแบ่งแยกบัสแบบถาวรเป็นการติดตั้ง CLR ขนาด 0.038 pu. ที่สถานีพระนครเหนือ ทำให้สามารถเป็นคำตอบที่ผ่านเงื่อนไขบังคับทั้งหมดของระบบได้ โดยสังเกตได้จากคุณภาพคำตอบมากกว่า 600000 จากในตารางที่

5.2.3 วิเคราะห์ผลคำตอบที่ได้ในแต่ละกรณีการทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์คำตอบที่ได้ในแต่ละกรณีทดสอบ คือ กรณีใช้วิธีแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียว กรณีใช้การติดตั้ง CLR เพียงอย่างเดียว และกรณีใช้การแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR เพื่อหาวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดกระแสลัดวงจร เงินลงทุนที่ใช้โดยประมาณ รวมถึงพิจารณาเสถียรภาพทางแรงดันในสภาวะอยู่ตัว ของคำตอบที่ได้ในแต่ละกรณี โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดันที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 คือ วิธีการ Modal Analysis และการใช้ดัชนี PQVSI เป็นตัวชี้วัดความมีเสถียรภาพทางแรงดัน

5.2.3.1 กรณีไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง

เมื่อนำคำตอบที่ได้ในแต่ละกรณีทดสอบมาวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพทางแรงดันของระบบโดยวิธีการ Modal Analysis และการใช้ดัชนี PQVSI ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงเมื่อทดสอบกับระบบจริงของ กฟผ.

<table>
<tr><th colspan="6">กรณีทดสอบ</th><th>Isc_{max} (kA)</th><th>$PQVSI_{max}$ (1=unstable)</th><th>PQVSI Order</th><th>$Eigen_{min}$ (0=unstable)</th><th>Eigen Order</th><th>Size (pu.)</th></tr>
<tr><td colspan="6">กรณีฐาน</td><td>65.7209</td><td>0.7552374</td><td>4</td><td>1.2909986</td><td>4</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="6">กฟผ.</td><td rowspan="3">47.5486</td><td rowspan="3">0.7515309</td><td rowspan="3">1</td><td rowspan="3">1.2910297</td><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3">-</td></tr>
<tr><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td></tr>
<tr><td>NB</td><td>SB</td><td>-</td><td>inf</td><td>inf</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="6">แบ่งแยกบัส</td><td rowspan="3">46.8517</td><td rowspan="3">0.7516039</td><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3">1.2910799</td><td rowspan="3">1</td><td rowspan="3">-</td></tr>
<tr><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td></tr>
<tr><td>NB</td><td>TPR</td><td>-</td><td>inf</td><td>inf</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="6">ติดตั้ง CLR</td><td rowspan="3">49.8697</td><td rowspan="3">0.7522721</td><td rowspan="3">3</td><td rowspan="3">1.2910075</td><td rowspan="3">3</td><td rowspan="3">0.047</td></tr>
<tr><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td></tr>
<tr><td>NB</td><td>RS</td><td>SB</td><td>0.022</td><td>0.002</td><td>0.023</td></tr>
<tr><td colspan="6">แบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR</td><td rowspan="3">46.8517</td><td rowspan="3">0.7516039</td><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3">1.2910799</td><td rowspan="3">1</td><td rowspan="3">-</td></tr>
<tr><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td></tr>
<tr><td>NB</td><td>TPR</td><td>-</td><td>inf</td><td>inf</td><td>-</td></tr>
</table>

จากตารางที่ 5.17 เมื่อพิจารณาค่าดัชนี PQVSI และค่าไอเกนแวลู จะเห็นว่าความมีเสถียรภาพแรงดันของระบบเพิ่มขึ้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนโครงข่ายระบบด้วยการแบ่งแยกบัส หรือ

ติดตั้ง CLR ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยกบัสตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 3.3.5 โดยมีสาเหตุเนื่องมาจากระบบที่พิจารณามีขนาดใหญ่ ซึ่งค่าดัชนี PQVSI ที่นำมาชี้วัดเสถียรภาพโดยรวมของระบบ เป็นค่าดัชนีของสายส่งเส้นที่อ่อนแอที่สุด ซึ่งสายส่งเส้นดังกล่าวอยู่ห่างไกลกับบริเวณที่ทำการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายมาก ส่วนค่าไอเกนแวลูที่นำมาชี้วัดเสถียรภาพโดยรวมของระบบ เป็นค่าไอเกนแวลูของโหมดที่อ่อนแอที่สุด โดยเมื่อทำการวิเคราะห์จาก Participation matrix พบว่าเป็นโหมดที่มีความสัมพันธ์กับบัสที่อยู่ในพื้นที่ภาคกลาง ซึ่งอยู่ห่างไกลกับเขตกรุงเทพและปริมณฑลซึ่งเป็นบริเวณที่ทำการปรับเปลี่ยนโครงข่ายของระบบ ทำให้ค่าที่นำมาชี้วัดดังกล่าวไม่อาจสะท้อนความมีเสถียรภาพทางแรงดันของระบบภายหลังการปรับเปลี่ยนโครงข่ายของระบบได้

ดังนั้นในกรณีทดสอบกับระบบจริงของ กฟผ. จะนำค่าดัชนี PQVSI ของสายส่งที่เชื่อมต่อในเขตกรุงเทพและปริมณฑล และค่าไอเกนแวลูของโหมดที่มีความสัมพันธ์กับบัสในเขตกรุงเทพและปริมณฑล ซึ่งสามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของความมีเสถียรภาพของระบบภายหลังการปรับเปลี่ยนโครงข่ายของระบบได้ดังตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงเมื่อทดสอบกับระบบจริงของ กฟผ. และใช้ค่าดัชนีชี้วัดที่เหมาะสม

<table>
<tr><th colspan="6">กรณีทดสอบ</th><th>Isc_{max} (kA)</th><th>$PQVSI_{267}$ (1=unstable)</th><th>$PQVSI_{295}$ (1=unstable)</th><th>$PQVSI_{254}$ (1=unstable)</th><th>$Eigen_{min,mode5}$ (0=unstable)</th><th>VS. Order</th><th>Size (pu.)</th></tr>
<tr><td colspan="6">กรณีฐาน</td><td>65.72089</td><td>0.3133653</td><td>0.2925253</td><td>0.1996911</td><td>12.337551</td><td>1</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="6">กฟผ.</td><td rowspan="3">47.548569</td><td rowspan="3">0.3142472</td><td rowspan="3">0.3087958</td><td rowspan="3">0.1997843</td><td rowspan="3">9.1347294</td><td rowspan="3">3</td><td rowspan="3">-</td></tr>
<tr><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td></tr>
<tr><td>NB</td><td>SB</td><td>-</td><td>inf</td><td>inf</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="6">แบ่งแยกบัส</td><td rowspan="3">46.8517</td><td rowspan="3">0.33819</td><td rowspan="3">0.31608</td><td rowspan="3">0.2</td><td rowspan="3">9.097974</td><td rowspan="3">4</td><td rowspan="3">-</td></tr>
<tr><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td></tr>
<tr><td>NB</td><td>TPR</td><td>-</td><td>inf</td><td>inf</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="6">ติดตั้ง CLR</td><td rowspan="3">49.869709</td><td rowspan="3">0.313617</td><td rowspan="3">0.2974426</td><td rowspan="3">0.1997166</td><td rowspan="3">10.039539</td><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3">0.047</td></tr>
<tr><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td></tr>
<tr><td>NB</td><td>RS</td><td>SB</td><td>0.022</td><td>0.002</td><td>0.023</td></tr>
<tr><td colspan="6">แบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR</td><td rowspan="3">46.851722</td><td rowspan="3">0.3381857</td><td rowspan="3">0.3160808</td><td rowspan="3">0.2</td><td rowspan="3">9.0979745</td><td rowspan="3">4</td><td rowspan="3">-</td></tr>
<tr><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td></tr>
<tr><td>NB</td><td>TPR</td><td>-</td><td>inf</td><td>inf</td><td>-</td></tr>
</table>

ผลจากการเปรียบเทียบคำตอบของแต่ละกรณีทดสอบ แสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียว โดยใช้คำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม คือ ทำการแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือและสถานีไฟฟ้าเทพารักษ์ร่วมกัน เป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถแก้ปัญหาได้ โดยที่ไม่เกิดการละเมิดเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบ และยังเป็นวิธีการที่ลดค่ากระแสลัดวงจรได้มากที่สุด และทำให้ความมี

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เสถียรภาพแรงดันของระบบอ่อนแอลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีแบ่งแยกบัสตามหลักปฏิบัติของ กฟผ. หรือกรณีติดตั้ง CLR

สำหรับผลกระทบต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบ เมื่อวิเคราะห์ค่าดัชนี PQVSI ของสายส่งทั้งสามเส้น และค่าไอเกนแวลูจากวิธีการ Modal Analysis พบว่า กรณีใช้การแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวทำให้เสถียรภาพแรงดันของระบบแย่ลง ส่วนกรณีใช้การติดตั้ง CLR ทำให้เสถียรภาพแรงดันของระบบแย่ลงจากเดิมเล็กน้อย โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จากดัชนีทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวกับกับกรณีประยุกต์ใช้วิธีติดตั้ง CLR พบว่าการใช้วิธีติดตั้ง CLR สามารถลดกระแสลัดวงจรได้น้อยกว่าวิธีแบ่งแยกบัส ถึงแม้จะสามารถรักษาเสถียรภาพทางแรงดันได้ดีกว่าเล็กน้อย แต่ก็ต้องใช้เงินลงทุนในการแก้ปัญหาที่สูงกว่า ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบถึงความคุ้มค่าในการแก้ปัญหา จึงสรุปได้ว่าวิธีแบ่งแยกบัสตามคำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม เป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแก้ปัญหากับระบบทดสอบนี้

5.2.3.2 **กรณีพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง**

เมื่อนำคำตอบที่ได้ในแต่ละกรณีทดสอบมาวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพทางแรงดันของระบบโดยวิธีการ Modal Analysis และการใช้ดัชนี PQVSI ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง เมื่อทดสอบกับระบบจริงของ กฟผ.

กรณีทดสอบ	L1	L2	L3	S1	S2	S3	Isc_{max} (kA)	$PQVSI_{max}$ (1=unstable)	PQVSI Order	$Eigen_{min}$ (0=unstable)	Eigen Order	Size (pu.)
กรณีฐาน							65.7209	0.7552374	3	1.2909986	3	-
กฟผ.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
แบ่งแยกบัส	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ติดตั้ง CLR	NB	RS	SB	0.02	0.002	0.025	49.8901	0.7523284	2	1.291008	2	0.047
แบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR	NB	TPR	-	0.038	inf	-	49.9691	0.751801	1	1.2910623	1	0.038

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 5.19 เมื่อพิจารณาค่าดัชนี PQVSI และค่าไอเกนแวลู จะเห็นว่าความมีเสถียรภาพแรงดันของระบบเพิ่มขึ้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนโครงข่ายระบบด้วยการแบ่งแยกบัส หรือติดตั้ง CLR ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยกบัสตามสาเหตุที่ได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้

ดังนั้นในกรณีทดสอบกับระบบจริงของ กฟผ. โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง จะนำค่าดัชนี PQVSI ของสายส่งที่เชื่อมต่อในเขตกรุงเทพและปริมณฑล และค่าไอเกนแวลูของโหมดที่มีความสัมพันธ์กับบัสในเขตกรุงเทพและปริมณฑล ซึ่งสามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของความมีเสถียรภาพของระบบภายหลังการปรับเปลี่ยนโครงข่ายของระบบได้ดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 สรุปผลการทดสอบของทุกกรณีการทดสอบ โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง เมื่อทดสอบกับระบบจริงของ กฟผ. และใช้ค่าดัชนีชี้วัดที่เหมาะสม

กรณีทดสอบ	L1	L2	L3	S1	S2	S3	Isc_{max} (kA)	$PQVSI_{267}$ (1=unstable)	$PQVSI_{295}$ (1=unstable)	$PQVSI_{254}$ (1=unstable)	$Eigen_{min,mode5}$ (0=unstable)	VS. Order	Size (pu.)
กรณีฐาน							65.72089	0.3133653	0.2925253	0.1996911	12.337551	1	-
กฟผ.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
แบ่งแยกบัส	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ติดตั้ง CLR	NB	RS	SB	0.02	0.002	0.025	**49.8901**	**0.31363**	**0.29768**	**0.19972**	**10.15001**	**2**	**0.05**
แบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR	NB	TPR	-	0.038	inf	-	49.969123	0.3272307	0.3153725	0.1999241	9.8502746	3	0.038

ผลจากการเปรียบเทียบคำตอบของแต่ละกรณีทดสอบ แสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้คำตอบที่เหมาะสมได้ เนื่องจากไม่มีคำตอบใดๆที่ผ่านเงื่อนไขบังคับทั้งหมด โดยในกรณีนี้รวมเงื่อนไขความมั่นคง n-1 ของระบบมาร่วมพิจารณาด้วย ซึ่งทำให้การแบ่งแยกบัสตามหลักปฏิบัติของ กฟผ. ไม่สามารถให้คำตอบที่สามารถแก้ปัญหาได้ในกรณีนี้

เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม โดยใช้การติดตั้ง CLR ร่วมด้วย ทำให้สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาได้ คือ ทำการติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัสภายในสถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ รังสิตและพระนครใต้ โดยติดตั้ง CLR ขนาด 0.02, 0.002 และ 0.025 ตามลำดับ เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถแก้ปัญหาได้ โดยที่ไม่เกิดการละเมิดเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบ และยังเป็นคำตอบที่สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรได้มากที่สุด และทำให้ความมีเสถียรภาพแรงดันของระบบแย่ลงน้อยกว่าการแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR และ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อ่อนแอลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นฐาน โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จากดัชนีทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวกับกับกรณีประยุกต์ใช้วิธีติดตั้ง CLR พบว่าการใช้วิธีติดตั้ง CLR สามารถลดกระแสลัดวงจรได้น้อยกว่าวิธีแบ่งแยกบัส ถึงแม้จะสามารถรักษาเสถียรภาพทางแรงดันได้ดีกว่าเล็กน้อย แต่ก็ต้องใช้เงินลงทุนในการแก้ปัญหาที่สูงกว่า ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบถึงความคุ้มค่าในการแก้ปัญหา พบว่าการติดตั้ง CLR เพียงอย่างเดียวใช้เงินลงทุนมากกว่าการติดตั้ง CLR ร่วมกับการแบ่งแยกบัสเล็กน้อย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการลดกระแสลัดวงจร และเสถียรภาพทางแรงดันของระบบที่ดีกว่า จึงสรุปได้ว่าวิธีการติดตั้ง CLR ตามคำตอบที่ได้จากโปรแกรมหาค่าเหมาะสม เป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีทดสอบนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงข้อสรุปวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการกำหนดตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม เพื่อลดกระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยนำวิธีค้นหาตาบูชนิดปรับตัวได้มาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งของบัสที่จะทำการแบ่งแยก เพื่อลดกระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้น โดยให้มีจำนวนบัสของการแบ่งแยกที่น้อยที่สุด ซึ่งแปรผันตรงกับผลกระทบต่อการทำงานของระบบ และจำนวนเงินลงทุนที่ใช้สำหรับแก้ปัญหา โดยในการพิจารณามีเงื่อนไขบังคับของระบบ ได้แก่ พิกัดกระแสลัดวงจร พิกัดแรงดันบัส พิกัดสายส่ง การแยกตัวจากกันของระบบ ความมั่นคงของระบบ n-1 และเงื่อนไขบังคับสำหรับการแบ่งแยกบัสในทางปฏิบัติ นอกจากจะใช้วิธีแบ่งแยกบัสแบบถาวรในการแก้ปัญหาแล้วในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังพิจารณาการหาตำแหน่งของการแบ่งแยกบัสแบบถาวร ร่วมกับการพิจารณาการติดตั้ง Current Limiting Reactor ในขนาดที่น้อยที่สุด เพื่อความยืดหยุ่นในการพิจารณาเงื่อนไขบังคับ สำหรับการหาคำตอบที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาอีกด้วย สมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอถูกนำมาทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE RTS-79 และระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริงในเขตกรุงเทพ และปริมณฑล เพื่อให้รองรับกับการนำไปใช้แก้ปัญหาในทางปฏิบัติ ซึ่งในส่วนท้ายของการทดสอบยังได้นำคำตอบที่ได้ในแต่ละกรณีการทดสอบมาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพทางแรงดัน เพื่อสะท้อนให้เห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบจากการแก้ปัญหาในแต่ละวิธี

จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าวิธีการหาจำนวนและตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่นำเสนอสามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดได้ทั้งในกรณีที่พิจารณาและไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคง โดยสามารถแบ่งแยกบัสหรือติดตั้ง CLR เพื่อลดกระแสลัดวงจรสูงที่เกินพิกัดในขณะที่เงื่อนไขบังคับอื่นๆ ของระบบยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวางแผนระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคตของ กฟผ. โดยจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1) คำตอบที่ได้จากวิธีการแบ่งแยกบัสเพื่อแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงที่นำเสนอ สามารถลดค่าแกระแสลัดวงจรที่บัสแบบสามเฟสสมดุลได้มากกว่าการแบ่งแยกบัสตามหลักปฏิบัติของ กฟผ. โดยจะทำการแบ่งแยกบัสที่มีกำลังผลิตมากในระบบ

2) ในกรณีที่ระบบส่งกำลังไฟฟ้าไม่ซับซ้อน ตำแหน่งของบัสที่ต้องทำการแบ่งแยกเพื่อแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูง มักเป็นบัสที่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด หรือบัสที่มีกำลังผลิตมากที่สุดในระบบ อย่างไรก็ตาม แนวทางการแบ่งแยกบัสดังกล่าว อาจไม่เป็นเช่นนั้นเสมอไปในกรณีที่ระบบมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการในการวิเคราะห์หาตำแหน่งการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมที่สุดเพื่อแก้ปัญหากระแสลัดวงจรเกินพิกัดที่เกิดขึ้นในระบบ

3) การติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัสแทนการแบ่งแยกบัสแบบถาวร สามารถลดขนาดของกระแสลัดวงจรที่บัสที่ติดตั้งและบริเวณข้างเคียงได้น้อยกว่าการแบ่งแยกบัสแบบถาวร แต่มีข้อดี คือ การติดตั้ง CLR ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส หรือกำลังที่ไหลในสายส่งในระบบน้อยกว่าการแบ่งแยกบัสแบบถาวร ทำให้ในการรวมเงื่อนไขความมั่นคงเข้าไปพิจารณาในเงื่อนไขบังคับ วิธีการติดตั้ง CLR มีโอกาสมากกว่าที่จะให้คำตอบที่สามารถแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงได้ และไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับใดๆ

4) สำหรับผลกระทบต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Analysis และดัชนี PQVSI พบว่ากรณีใช้การแบ่งแยกบัสเพียงอย่างเดียวทำให้เสถียรภาพแรงดันของระบบอ่อนแอลงมากกว่ากรณีใช้การติดตั้ง CLR ซึ่งทำให้เสถียรภาพแรงดันของระบบอ่อนแอลงจากเดิมเล็กน้อย โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทั้ง 2 มีความสอดคล้องกัน

5) การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยรวมของระบบที่มีขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนด้วยวิธี Modal Analysis และดัชนี PQVSI การเลือกใช้ค่าไอเกนแวลูที่ต่ำที่สุด หรือใช้ค่าดัชนี PQVSI ของสายส่งที่มีค่ามากที่สุด อาจไม่สามารถสะท้อนความมีเสถียรภาพทางแรงดันของระบบภายหลังการปรับเปลี่ยนโครงข่ายของระบบได้ในกรณีที่ตำแหน่งที่นำค่าดัชนีมาชี้วัดอยู่ห่างไกลจากจุดที่ทำการปรับเปลี่ยนโครงข่ายของระบบ ซึ่งจะเห็นได้จากผลการเปรียบเทียบเสถียรภาพแรงดันในแต่ละกรณีทดสอบกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริงของ กฟผ. โดยต้องนำค่าไอเกนแวลูของโหมดที่มีความสัมพันธ์กับบัสในพื้นที่ๆทำการปรับเปลี่ยนโครงข่าย และนำค่าดัชนี PQVSI ของสายส่งที่อยู่ใกล้เคียงกับบริเวณที่ทำการปรับเปลี่ยนโครงข่าย มาวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพทางแรงดันของระบบภายหลังการปรับเปลี่ยนโครงข่ายของระบบ

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในวิทยานิพนธ์นี้ยังไม่รวมการพิจารณาเงื่อนไขความน่าเชื่อถือของระบบ ดังนั้นสำหรับการนำไปใช้วางแผนระบบส่งกำลังไฟฟ้าทางปฏิบัติจริง เพื่อแก้ไขปัญหากระแสลัดวงจรสูง ควรเพิ่มเงื่อนไขความน่าเชื่อถือเข้าไปในเงื่อนไขบังคับในการพิจารณา

2. ในทางปฏิบัติค่ากระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้นจริงอาจเป็นไปได้ทั้งชนิด 3 เฟสสมดุล หรือ 1 เฟสลงดิน ดังนั้นในการพิจารณาเงื่อนไขกระแสลัดวงจรควรพิจารณากระแสลัดวงจรแบบ 1 เฟสลงดินร่วมด้วย

3. ในวิทยานิพนธ์นี้จำนวนสูงสุดของตำแหน่งที่อนุญาตให้แบ่งแยก จะแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดยจำนวนของบัสที่อนุญาตให้แบ่งแยกเพิ่มขึ้น เปรียบเสมือนพื้นที่ทั้งหมดในการหาคำตอบมากขึ้นด้วย ดังนั้นในการนำไปแก้ปัญหาควรกำหนดจำนวนตำแหน่งสูงสุดของการแบ่งแยกให้เหมาะสมกับระยะเวลาที่มีในการแก้ปัญหา

4. สำหรับการนำไปพัฒนาต่อ อาจจะผนวกวิธีการปรับปรุงโครงข่ายประเภทอื่นๆ เข้ากับวิธีการแบ่งแยกบัส หรือติดตั้ง CLR อย่างเช่นการปลดวงจรสายส่ง หรือการเชื่อมต่อวงจรสายส่งเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มความหลากหลายในการแก้ปัญหา ทำให้มีโอกาสเจอคำตอบที่มีความเหมาะสมในการแก้ปัญหามากขึ้น และในส่วนของเงินลงทุนที่ใช้ในการแก้ปัญหา ควรพิจารณาเงินลงทุนของการติดตั้ง CLR ในทางปฏิบัติจริง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการพิจารณาเลือกวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] กฟผ. แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553 – 2573. 2010.

[2] กฟน. แผนปรับปรุงและขยายระบบจำหน่าย พ.ศ. 2551 – 2554. เล่มที่ 2 : รายละเอียดด้านเทคนิค. 2010.

[3] Adapa, R. Fault Current Management Guidebook. EPRI Solutions Inc., 2006.

[4] Taylor, T., Hanson, A., Lubkeman, D. and Mousavi, M. Fault Current Review Study. ABB Inc., 2005.

[5] Sarmiento, H. G., Castellanos, R., Pampin, G., Tovar, C. and Naude, J. An Example in Controlling Short Circuit Levels in a Large Metropolitan Area. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 13-17. July 2003.

[6] Kovalsky, L., Yuan, X., Tekletsadik, K., Keri, A., Bock, J. and Breuer, F. Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems. IEEE Transactions Applied Superconductivity 15 (June 2005): 2130-2133.

[7] Power, A. J. An Overview of Transmission Fault Current Limiters. Leatherhead : The National Grid Company plc., 2002.

[8] Neumann, A. Application of Fault Current Limiters. BERR Department for Business Enterprise & Regulatory Reform, 2007.

[9] Wu, X., Mutale, J., Jenkins, N., and Strbac, G. An Investigation of Network Splitting for Fault Level Reduction. Working Paper 25 Tyndall Centre for Climate Change Research Manchester, 2003.

[10] Gilany, M. and Hasawi, W. A. Reducing the Short Circuit Levels in Kuwait Transmission Network. Proceedings of WASET vol. 2 (2009).

[11] Lee, S. H., Lee, K. W., Yoon, Y. B. and Hyun, O. B. FCL Application Issues in Korean Electric Power Grid. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.

[12] DTI Technology programme. The Performance of Networks Using Alternative Network Splitting Configurations. WS3. 2004.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[13] Khorrami, M., Nader, M.S. and Nejhad, N. K. Short Circuit Current Level Control and its Effects on Circuit Breakers Transient Studies. HyperSciences Publisher Journal of Electrical Engineering: Theory and Application vol. 1 (2010): 4-17.

[14] Song, Y. H. and Irving, M. R. Optimization techniques for electrical power systems part 2 Heuristic optimization methods. Power Engineering journal (June 2001): 151-160.

[15] Srikaew, A. Computational Intelligence. Suranaree University of Technology, 2009.

[16] Puansdownreong, D., Areerak, K. N., Srikaew, A., Sujitjorn, S. and Totarong, P. System Identification via Adaptive Tabu Search. Proceedings of IEEE International Conference Industrial Technology vol. 2 (2002): 915-920.

[17] Sujitjorn, S., Kluabwang, J., Puangdownreong, D. and Sarasiri, N. Adaptive Tabu Search and Management Agent. Transactions of ECTI vol. 8 (February 2010).

[18] Goldberg, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley Inc., 1989.

[19] Goldberg, D. E. Genetic and evolutionary algorithms come of age. Proceedings of Communication of the ACM 37 (1994): 113-119.

[20] Davis, L. Genetic Algorithms and Simulated Annealing. Morgan Kaufmann, 1997.

[21] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., C. D. and Vecchi, M. P. Optimization by simulated Annealing. Anderson and Rosenfeld, 1988.

[22] Ratanathavorn, W. and Prichanont, S. Heuristics for Dynamic Capacitated Facility Location Problems. Engineering Journal of CU vol. 2 (2010).

[23] Mori, H. and Ogita, Y. Parallel Tabu Search for Capacitor Placement in Radial Distribution Systems. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting vol. 4, 2334-2339. 2000.

[24] Nara, K., Hayashi, Y., Ikeda, K. and Ashizawa, T. Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting vol. 2, 918-923. 2001.

[25] Saadat, H. Power System Analysis. 2^{ed}. Mcgraw hill, 2004.

[26] Glover, J. D., Sarma, M. S. and Overbye, T. J. Power System Analysis and Design. Thomson corp., 2008.

[27] Tongsrichantra, S., Suwanasri, T. and Suwanasri, C. System Study and Fault Level Reduction Techniques for a Small Scale Power Plant in Thailand. GMSARN International Conference on Sustainable Development, November 2008.

[28] Amon F., J., Fernandez, P. C., Rose, E. H., D´Ajuz, A. and Castanheira, A. Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation. International Conference on Power Systems Transients (IPST'05), Montreal, June 2005.

[29] IEEE Guide for Protective Relay Applications to Distribution Lines IEEE Std C37.230-2007, (2008): 1-100.

[30] Zidi, S. A., Hadjeri, S. and Fellah, M. K. Dynamic Performance of an HVDC Link. J. Electrical Systems 1-3. 2005.

[31] Dorigo, M., Birattari, M. and Stutzle T. Ant colony optimization: Artificial ants as a computational intelligence technique. IEEE Computational Intelligence Magazine, 28-39. 2006.

[32] Glover, F. Tabu search – Part I. ORSA Journal on Computing vol. 1 no. 3 (1989): 190–206.

[33] Glover, F. Tabu search – Part II. ORSA Journal on Computing vol. 2 no. 1 (1990): 4–32.

[34] Glover, F. and laguna, M. Tabu Search. Kluwer Academic Publishers, 1997.

[35] Kundur, P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994.

[36] Gao, B., Morrison, G. K. and Kunder, P. Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis. IEEE Transactions PWRS-7 (November 1992): 1529-1542.

[37] พรเทพ เทียบรัตน์, วัชรินทร์ ยกย่อง และ กุลยศ อุดมวงศ์เสรี. PQ Voltage Stability Index (PQVSI) for Voltage Stability Analysis. Electrical Engineering Conference-31 1 (Oct 2008): 355-358.

[38] IEEE Reliability Test System. IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems vol. PAS-98 (December 1979).

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลระบบทดสอบ

เนื้อหาในภาคผนวก ก จะนำเสนอข้อมูลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ โดยประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานของระบบทดสอบ IEEE RTS-79 และข้อมูลพื้นฐานของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ก.1 ข้อมูลระบบทดสอบ IEEE-RTS79

ระบบทดสอบ IEEE RTS-79 ประกอบด้วยบัส 24 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 11 เครื่อง และสายส่ง 38 เส้น โดยค่าฐานของการคำนวณเป็น 100 MVA รายละเอียดของข้อมูลบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่ง แสดงได้ดังตารางที่ ก.1 ก.2 และ ก.3 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบ IEEE-RTS79

Bus Number	Type	Pd (MW)	Qd (MW)	Gs	Bs	Area	V (pu.)	Angle	Base kV	Zone	Vmax (pu.)	Vmin (pu.)	Isc Rating (kA)
1	2	108	22	0	0	1	1	0	138	1	1.05	0.95	25
2	2	97	20	0	0	1	1	0	138	1	1.05	0.95	25
3	1	180	37	0	0	1	1	0	138	1	1.05	0.95	25
4	1	74	15	0	0	1	1	0	138	1	1.05	0.95	25
5	1	71	14	0	0	1	1	0	138	1	1.05	0.95	25
6	1	136	28	0	-100	2	1	0	138	1	1.05	0.95	25
7	2	125	25	0	0	2	1	0	138	1	1.05	0.95	25
8	1	171	35	0	0	2	1	0	138	1	1.05	0.95	25
9	1	175	36	0	0	1	1	0	138	1	1.05	0.95	25
10	1	195	40	0	0	2	1	0	138	1	1.05	0.95	25
11	1	0	0	0	0	3	1	0	230	1	1.05	0.95	50
12	1	0	0	0	0	3	1	0	230	1	1.05	0.95	50
13	3	265	54	0	0	3	1	0	230	1	1.05	0.95	50
14	2	194	39	0	0	3	1	0	230	1	1.05	0.95	50
15	2	317	64	0	0	4	1	0	230	1	1.05	0.95	50
16	2	100	20	0	0	4	1	0	230	1	1.05	0.95	50
17	1	0	0	0	0	4	1	0	230	1	1.05	0.95	50
18	2	333	68	0	0	4	1	0	230	1	1.05	0.95	50
19	1	181	37	0	0	3	1	0	230	1	1.05	0.95	50
20	1	128	26	0	0	3	1	0	230	1	1.05	0.95	50
21	2	0	0	0	0	4	1	0	230	1	1.05	0.95	50
22	2	0	0	0	0	4	1	0	230	1	1.05	0.95	50
23	2	0	0	0	0	3	1	0	230	1	1.05	0.95	50
24	1	0	0	0	0	4	1	0	230	1	1.05	0.95	50

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ IEEE-RTS79

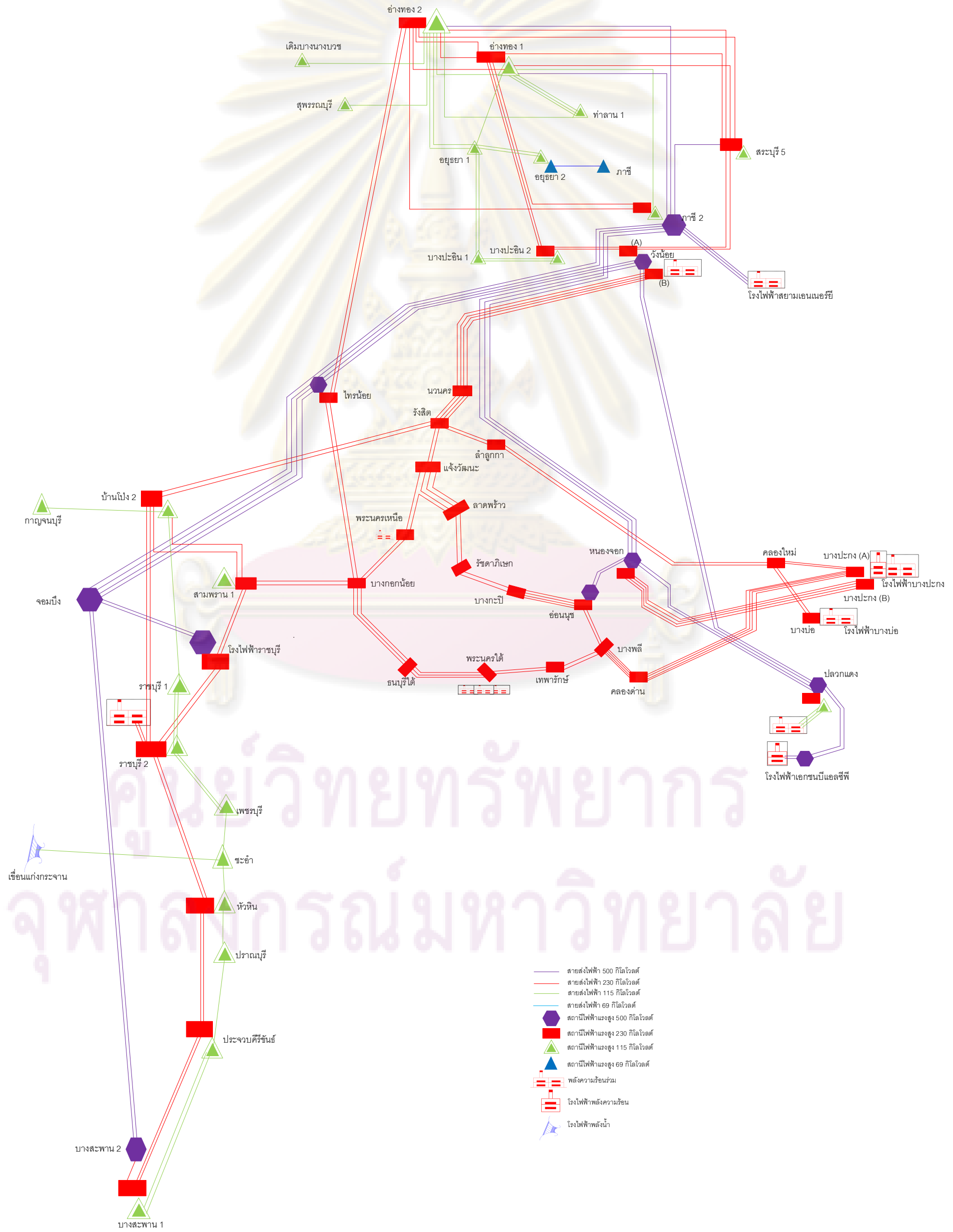
Bus Number	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	V (pu.)	Mbase (MVA)	Status	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Subtransient Reactance (pu.)
1	10	0	10	0	1.035	100	1	20	16	0.3
1	76	0	30	-25	1.035	100	1	76	15.2	0.32
1	10	0	10	0	1.035	100	1	20	16	0.3
1	76	0	30	-25	1.035	100	1	76	15.2	0.32
2	10	0	10	0	1.035	100	1	20	16	0.3
2	76	0	30	-25	1.035	100	1	76	15.2	0.32
2	10	0	10	0	1.035	100	1	20	16	0.3
2	76	0	30	-25	1.035	100	1	76	15.2	0.32
7	80	0	60	0	1.025	100	1	100	25	0.14
7	80	0	60	0	1.025	100	1	100	25	0.14
7	80	0	60	0	1.025	100	1	100	25	0.14
13	95.1	0	90	0	1.02	100	1	197	69	0.0319
13	95.1	0	90	0	1.02	100	1	197	69	0.0319
13	95.1	0	90	0	1.02	100	1	197	69	0.0319
14	0	35.3	200	-50	0.98	100	1	0	0	0.17
15	155	0	80	-60	1.014	100	1	155	54.3	0.135
15	12	0	12	0	1.014	100	1	12	2.4	0.085
15	12	0	12	0	1.014	100	1	12	2.4	0.085
15	12	0	12	0	1.014	100	1	12	2.4	0.085
15	12	0	12	0	1.014	100	1	12	2.4	0.085
15	12	0	12	0	1.014	100	1	12	2.4	0.085
16	155	0	80	-50	1.017	100	1	155	54.3	0.0235
18	400	0	200	-50	1.05	100	1	400	100	0.0194
21	400	0	200	-50	1.05	100	1	400	100	0.0297
22	50	0	16	-10	1.05	100	1	50	10	0.07
22	50	0	16	-10	1.05	100	1	50	10	0.07
22	50	0	16	-10	1.05	100	1	50	10	0.07
22	50	0	16	-10	1.05	100	1	50	10	0.07
22	50	0	16	-10	1.05	100	1	50	10	0.07
22	50	0	16	-10	1.05	100	1	50	10	0.07
23	155	0	80	-50	1.05	100	1	155	54.3	0.03217
23	155	0	80	-50	1.05	100	1	155	54.3	0.03217
23	350	0	150	-25	1.05	100	1	350	140	0.06217

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบ IEEE-RTS79

From bus	To bus	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Rate (MVA)	Ratio	Angle	Status	Ang. Min.	Ang. Max.
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	175	0	0	1	-360	360
1	3	0.0546	0.2112	0.0572	175	0	0	1	-360	360
1	5	0.0218	0.0845	0.0229	175	0	0	1	-360	360
2	4	0.0328	0.1267	0.0343	175	0	0	1	-360	360
2	6	0.0497	0.192	0.052	175	0	0	1	-360	360
3	9	0.0308	0.119	0.0322	175	0	0	1	-360	360
4	9	0.0268	0.1037	0.0281	175	0	0	1	-360	360
5	10	0.0228	0.0883	0.0239	175	0	0	1	-360	360
6	10	0.0139	0.0605	2.459	175	0	0	1	-360	360
7	8	0.0159	0.0614	0.0166	175	0	0	1	-360	360
8	9	0.0427	0.1651	0.0447	175	0	0	1	-360	360
8	10	0.0427	0.1651	0.0447	175	0	0	1	-360	360
3	24	0.0023	0.0839	0	400	1.03	0	1	-360	360
9	11	0.0023	0.0839	0	400	1.03	0	1	-360	360
9	12	0.0023	0.0839	0	400	1.03	0	1	-360	360
10	11	0.0023	0.0839	0	400	1.02	0	1	-360	360
10	12	0.0023	0.0839	0	400	1.02	0	1	-360	360
11	13	0.0061	0.0476	0.0999	500	0	0	1	-360	360
11	14	0.0054	0.0418	0.0879	500	0	0	1	-360	360
12	13	0.0061	0.0476	0.0999	500	0	0	1	-360	360
12	23	0.0124	0.0966	0.203	500	0	0	1	-360	360
13	23	0.0111	0.0865	0.1818	500	0	0	1	-360	360
14	16	0.005	0.0389	0.0818	500	0	0	1	-360	360
15	16	0.0022	0.0173	0.0364	500	0	0	1	-360	360
15	21	0.0063	0.049	0.103	500	0	0	1	-360	360
15	21	0.0063	0.049	0.103	500	0	0	1	-360	360
15	24	0.0067	0.0519	0.1091	500	0	0	1	-360	360
16	17	0.0033	0.0259	0.0545	500	0	0	1	-360	360
16	19	0.003	0.0231	0.0485	500	0	0	1	-360	360
17	18	0.0018	0.0144	0.0303	500	0	0	1	-360	360
17	22	0.0135	0.1053	0.2212	500	0	0	1	-360	360
18	21	0.0033	0.0259	0.0545	500	0	0	1	-360	360
18	21	0.0033	0.0259	0.0545	500	0	0	1	-360	360
19	20	0.0051	0.0396	0.0833	500	0	0	1	-360	360
19	20	0.0051	0.0396	0.0833	500	0	0	1	-360	360
20	23	0.0028	0.0216	0.0455	500	0	0	1	-360	360
20	23	0.0028	0.0216	0.0455	500	0	0	1	-360	360
21	22	0.0087	0.0678	0.1424	500	0	0	1	-360	360

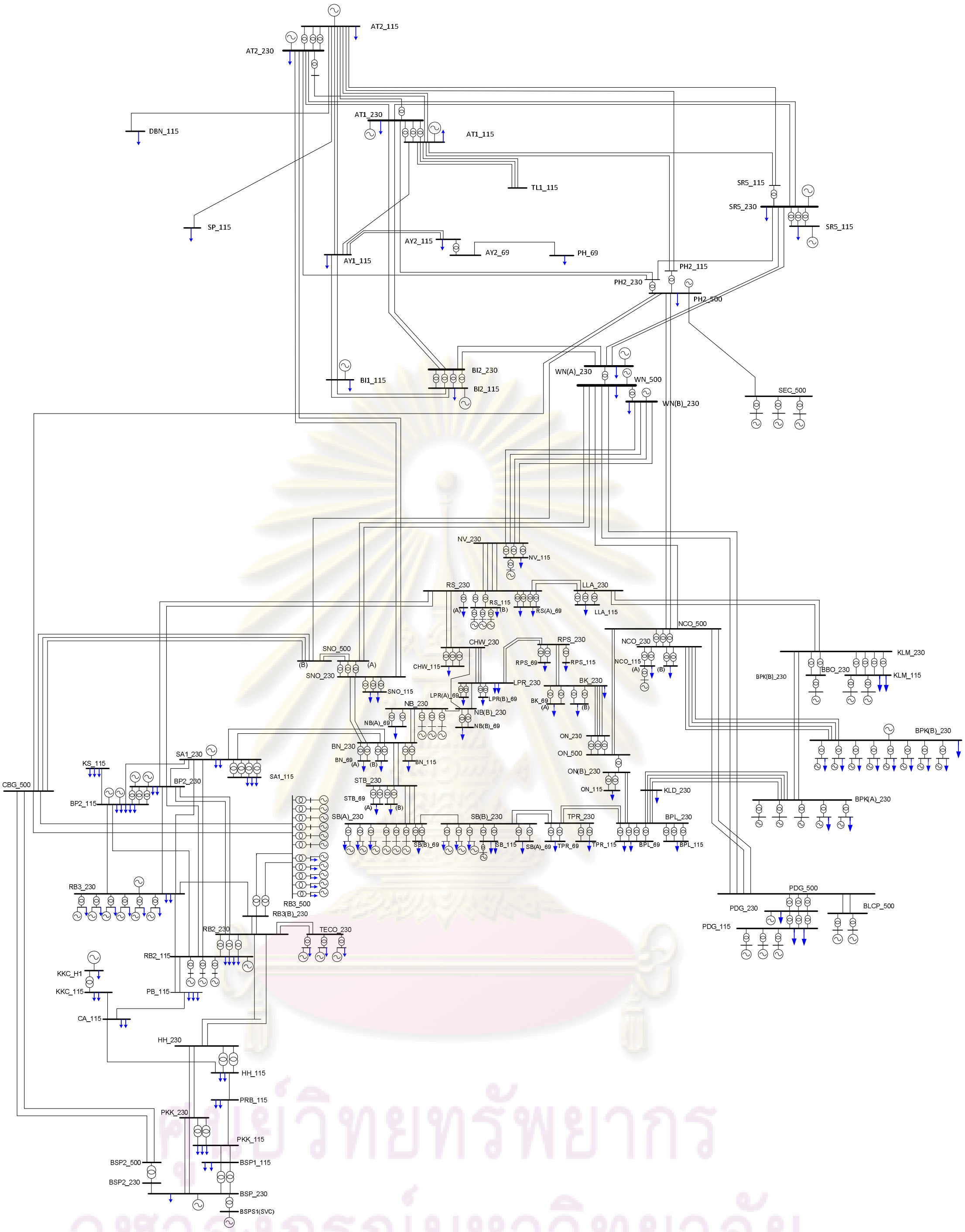
ก.2 ข้อมูลระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าและกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล

ระบบส่งไฟฟ้ากำลังจริงของ กฟผ. ที่นำมาใช้ทดสอบเป็นระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยที่ถูกลดรูปเพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าในเขตกรุงเทพและปริมณฑลของ กฟผ. ซึ่งประกอบไปด้วยพื้นที่ในเขตกรุงเทพและปริมณฑลเชื่อมต่อกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าในภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก โดยแสดงจุดการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงดังรูปที่ ก.1 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแผนภาพเส้นเดียวดังรูปที่ ก.2



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.1 จุดการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงของเขตกรุงเทพ และปริมณฑล กับพื้นที่ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.2 แผนภาพเส้นเดียวแสดงการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าแรงสูงของเขตกรุงเทพ และปริมณฑล กับพื้นที่ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก

รายละเอียดที่สำคัญของระบบประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 108 เครื่อง ขนาดกำลังการผลิตรวม 17,520 MW ขนาดของโหลดรวม เท่ากับ 17,402 MW มีจำนวนบัสในระบบรวม 254 บัส จำนวนสายส่งรวม 215 วงจร และมีหม้อแปลงในระบบรวม 214 ลูก โดยค่าฐานของการคำนวณเป็น 100 MVA รายละเอียดของข้อมูลบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่งแสดงได้ดังตารางที่ ก.4 ก.5 และ ก.6 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัสของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล

Bus Number	Type	Pd (MW)	Qd (MW)	Gs	Bs	Area	V (pu.)	Angle	Base kV	Zone	Vmax (pu.)	Vmin (pu.)	Isc Rating (kA)
11011	2	2	1.239	0	0	1	1.0037	-8.59	11.5	1	1.053	0.98	-
11012	2	2	1.239	0	0	1	1.0041	-8.498	11.5	1	1.053	0.98	-
11013	2	5	3.099	0	0	1	1.0035	-8.531	11.5	1	1.053	0.98	-
11014	2	4	2.479	0	0	1	1.0363	-9.71	15	1	1.053	0.98	-
11015	2	4	2.479	0	0	1	1.0363	-9.71	15	1	1.053	0.98	-
11016	2	10	6.197	0	0	1	1.0379	-9.533	15	1	1.053	0.98	-
11017	2	0	0	0	0	1	1.0087	-7.57	21	1	1.053	0.98	-
11018	2	0	0	0	0	1	1.0087	-7.57	21	1	1.053	0.98	-
11019	2	0	0	0	0	1	1.0083	-7.666	21	1	1.053	0.98	-
11031	2	0	0	0	0	1	1.0397	-6.847	15.75	1	1.053	0.98	-
11032	2	0	0	0	0	1	1.0397	-6.847	15.75	1	1.053	0.98	-
11033	2	0	0	0	0	1	1.0402	-7.024	18	1	1.053	0.98	-
11601	1	365.74	177.14	0	145	1	1.0503	12.628	69	1	1.053	0.98	-
11602	1	240.27	116.37	0	205	1	1.0389	15.937	69	1	1.053	0.98	-
11603	1	175.29	84.894	0	106	1	1.0319	12.601	69	1	1.053	0.98	-
11606	1	227.39	110.13	0	137	1	1.0495	13.352	69	1	1.053	0.98	-
11608	1	276.11	133.73	0	126	1	1.0196	13.036	69	1	1.053	0.98	-
11610	1	148.81	73.74	0	317	1	1.046	17.509	69	1	1.053	0.98	-
11611	1	433.28	209.85	0	0	1	1.0158	12.292	69	1	1.053	0.98	-
11613	1	320.91	155.42	0	105	1	1.0388	11.767	69	1	1.053	0.98	-
11614	1	286.07	138.55	0	132	1	1.021	10.206	69	1	1.053	0.98	-
11615	1	201.79	97.731	0	79	1	1.0083	13.579	69	1	1.053	0.98	-
11631	1	365.74	177.14	0	212	1	1.0317	12.133	69	1	1.053	0.98	-
11633	1	175.29	84.894	0	99	1	1.0393	12.886	69	1	1.053	0.98	-
11636	1	227.39	110.13	0	126	1	1.044	14.509	69	1	1.053	0.98	-
11638	1	276.11	133.73	0	122	1	1.0324	13.139	69	1	1.053	0.98	-
11643	1	320.91	155.42	0	126	1	1.0185	11.559	69	1	1.053	0.98	-
11644	1	286.07	138.55	0	159	1	1.0183	10.101	69	1	1.053	0.98	-
11702	1	570.79	276.45	0	209	1	1.0109	11.924	115	1	1.053	0.98	-
11703	1	314.64	152.39	0	0	1	0.991	11.249	115	1	1.053	0.98	-
11704	1	461.92	223.72	0	176	1	1.0435	13.473	115	1	1.053	0.98	-
11707	1	426.86	206.74	0	271	1	1.0155	23.289	115	1	1.053	0.98	-
11709	1	299.35	144.98	0	117	1	1.0237	14.076	115	1	1.053	0.98	-
11710	1	116.51	56.426	0	99	1	1.0451	16.248	115	1	1.053	0.98	-
11711	1	113.35	54.896	0	66	1	1.0523	14.512	115	1	1.053	0.98	-
11712	1	716.97	371.42	0	209	1	0.9875	11.618	115	1	1.053	0.98	-
11713	1	403.03	195.2	0	136	1	1.0148	11.868	115	1	1.053	0.98	-
11715	1	231.91	112.32	0	132	1	1.0231	13.337	115	1	1.053	0.98	-
11719	1	285.05	157.72	0	91	1	1.024	18.933	115	1	1.053	0.98	-
11720	1	379.14	209.77	0	81	1	1.042	14.907	115	1	1.053	0.98	-
11737	1	284.57	137.82	0	0	1	0.9814	23.922	115	1	1.053	0.98	-
11740	1	420.95	232.91	0	176	1	1.0209	15.259	115	1	1.053	0.98	-
11801	1	505.44	244.79	0	195	1	1.0223	18.483	230	1	1.053	0.98	50
11802	1	0	0	0	72	1	1.0275	17.706	230	1	1.053	0.98	50
11803	1	0	0	0	72	1	1.011	16.079	230	1	1.053	0.98	50
11804	1	0	0	0	65	1	1.0206	17.758	230	1	1.053	0.98	50
11806	1	512.67	248.3	0	0	1	1.0188	17.308	230	1	1.053	0.98	50
11807	1	0	0	0	120	1	1.0108	29.312	230	1	1.053	0.98	50
11808	1	0	0	0	65	1	1.023	17.211	230	1	1.053	0.98	50
11809	1	0	0	0	0	1	1.0283	19.868	230	1	1.053	0.98	50
11810	1	0	0	0	130	1	1.0225	18.975	230	1	1.053	0.98	50
11811	1	0	0	0	0	1	1.0184	17.763	230	1	1.053	0.98	50
11812	1	0	0	0	65	1	1.0201	19.537	230	1	1.053	0.98	50
11813	1	0	0	0	260	1	1.03	17.011	230	1	1.053	0.98	50
11814	1	630.14	305.19	0	0	1	1.0134	15.827	230	1	1.053	0.98	50
11815	1	0	0	0	0	1	1.0277	17.35	230	1	1.053	0.98	50
11816	1	310.37	150.32	0	0	1	1.0258	19.185	230	1	1.053	0.98	50
11819	1	0	0	0	0	1	1.0233	20.865	230	1	1.053	0.98	50
11820	1	0	0	0	0	1	1.0147	18.777	230	1	1.053	0.98	50
11838	1	0	0	0	0	1	1.023	17.211	230	1	1.053	0.98	50
11839	1	0	0	0	0	1	1.0317	18.896	230	1	1.053	0.98	50
11843	1	0	0	0	0	1	1.03	17.011	230	1	1.053	0.98	50
11907	1	0	0	0	0	1	1.0134	28.517	500	1	1.053	0.98	50
11909	1	0	0	0	0	1	1.0033	26.826	500	1	1.053	0.98	50

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัสของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล (ต่อ)

Bus Number	Type	Pd (MW)	Qd (MW)	Gs	Bs	Area	V (pu.)	Angle	Base kV	Zone	Vmax (pu.)	Vmin (pu.)	Isc Rating (kA)
11912	1	0	0	0	0	1	1.025	28.41	500	1	1.053	0.98	50
11942	1	0	0	0	0	1	1.025	28.41	500	1	1.053	0.98	50
15001	2	0	0	0	0	1	1	-13.08	11.5	2	1.053	0.98	-
15002	2	0	0	0	0	1	1	-14.38	11.5	2	1.053	0.98	-
15003	2	0	0	0	0	1	1	-0.882	11.5	2	1.053	0.98	-
15004	2	0	0	0	0	1	1	-9.928	11.5	2	1.053	0.98	-
15005	2	0	0	0	0	1	1	-9.626	11.5	2	1.053	0.98	-
15006	2	0	0	0	0	1	1	-6.248	11.5	2	1.053	0.98	-
15803	1	0	0	0	0	1	1.0195	19.663	230	1	1.053	0.98	-
15804	1	0	0	0	0	1	1.0195	19.663	230	1	1.053	0.98	-
15805	1	0	0	0	0	1	1.0235	21.014	230	1	1.053	0.98	-
15806	1	0	0	0	0	1	1.0235	21.014	230	1	1.053	0.98	-
15902	1	0	0	0	0	1	1.0281	29.252	500	1	1.053	0.98	-
15903	1	0	0	0	0	1	1.0281	29.252	500	1	1.053	0.98	-
16805	1	0	0	0	0	1	1.0167	30.16	230	1	1.053	0.98	-
16806	1	0	0	0	0	1	1.0167	30.16	230	1	1.053	0.98	-
16807	1	0	0	0	0	1	1.02	30.605	230	1	1.053	0.98	-
16808	1	0	0	0	0	1	1.02	30.605	230	1	1.053	0.98	-
16811	1	0	0	0	0	1	1.028	20.358	230	5	1.053	0.98	-
16812	1	0	0	0	0	1	1.028	20.358	230	5	1.053	0.98	-
16813	1	0	0	0	0	1	1.028	20.381	230	5	1.053	0.98	-
16814	1	0	0	0	0	1	1.028	20.381	230	5	1.053	0.98	-
16901	1	0	0	0	0	1	1.0145	29.596	500	1	1.053	0.98	-
16902	1	0	0	0	0	1	1.0299	31.331	500	1	1.053	0.98	-
17801	1	0	0	0	0	1	1.0032	15.79	230	1	1.053	0.98	-
17802	1	0	0	0	0	1	1.0032	15.79	230	1	1.053	0.98	-
17803	1	0	0	0	0	1	1.0174	20.27	230	1	1.053	0.98	-
17804	1	0	0	0	0	1	1.0174	20.27	230	1	1.053	0.98	-
17902	1	0	0	0	0	1	1.0264	28.494	500	1	1.053	0.98	-
17903	1	0	0	0	0	1	1.0267	28.496	500	5	1.053	0.98	-
17904	1	0	0	0	0	1	1.0271	28.515	500	1	1.053	0.98	-
17905	1	0	0	0	0	1	1.0264	28.495	500	1	1.053	0.98	-
19801	1	0	0	0	0	1	1.0235	21.014	230	1	1.053	0.98	-
19802	1	0	0	0	0	1	1.0235	21.014	230	1	1.053	0.98	-
19803	1	0	0	0	0	1	1.0191	19.816	230	1	1.053	0.98	-
19804	1	0	0	0	0	1	1.0191	19.816	230	1	1.053	0.98	-
19902	1	0	0	0	0	1	1.0144	29.36	500	1	1.053	0.98	-
19904	1	0	0	0	0	1	1.0301	31.185	500	1	1.053	0.98	-
19905	1	0	0	0	0	1	1.0144	29.36	500	1	1.053	0.98	-
19906	1	0	0	0	0	1	1.0145	29.596	500	1	1.053	0.98	-
19907	1	0	0	0	0	1	1.0301	31.185	500	1	1.053	0.98	-
19908	1	0	0	0	0	1	1.0299	31.331	500	1	1.053	0.98	-
19915	1	0	0	0	0	1	1.0282	29.81	500	5	1.053	0.98	-
19917	1	0	0	0	0	1	1.0368	29.789	500	5	1.053	0.98	-
19918	1	0	0	0	0	1	1.0263	28.664	500	5	1.053	0.98	-
19919	1	0	0	0	0	1	1.0262	29.624	500	5	1.053	0.98	-
19920	1	0	0	0	0	1	1.0365	29.839	500	5	1.053	0.98	-
19921	1	0	0	0	0	1	1.027	28.832	500	5	1.053	0.98	-
19922	1	0	0	0	0	1	1.0369	29.772	500	5	1.053	0.98	-
51001	2	4	2.479	0	0	1	1.0274	2.0176	15	1	1.053	0.98	-
51002	2	4	2.479	0	0	1	1.0274	2.0176	15	1	1.053	0.98	-
51003	2	10	6.197	0	0	1	1.0335	2.7636	15	1	1.053	0.98	-
51004	2	4	2.479	0	0	1	1.0108	-0.948	15	1	1.053	0.98	-
51005	2	4	2.479	0	0	1	1.0108	-0.948	15	1	1.053	0.98	-
51006	2	10	6.197	0	0	1	1.0096	-0.17	15	1	1.053	0.98	-
51007	2	4	2.479	0	0	1	0.987	-0.488	15	1	1.053	0.98	-
51008	2	4	2.479	0	0	1	0.987	-0.488	15	1	1.053	0.98	-
51009	2	10	6.197	0	0	1	0.9861	-0.049	15	1	1.053	0.98	-
51010	2	0	0	0	0	1	1.026	5.8102	15	1	1.053	0.98	-
51011	2	0	0	0	0	1	1.026	5.8102	15	1	1.053	0.98	-
51012	2	0	0	0	0	1	1.0269	5.9154	15	1	1.053	0.98	-
51604	1	0	0	0	20	1	1.0303	17.721	69	1	1.053	0.98	-
51613	1	0.8	0.496	0	0	1	1.0285	17.667	69	1	1.053	0.98	-
51701	2	227.54	60.326	0	0	1	1.0293	19.223	115	1	1.053	0.98	-

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัสของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล (ต่อ)

Bus Number	Type	Pd (MW)	Qd (MW)	Gs	Bs	Area	V (pu.)	Angle	Base kV	Zone	Vmax (pu.)	Vmin (pu.)	Isc Rating (kA)
51702	2	256.7	85.018	0	61	1	1.0422	17.06	115	1	1.053	0.98	-
51703	1	43.831	24.251	0	13	1	1.0059	17.91	115	1	1.053	0.98	-
51704	1	40.881	22.619	0	0	1	1.0056	17.859	115	1	1.053	0.98	-
51705	1	171.21	94.729	0	11	1	0.9889	19.337	115	1	1.053	0.98	-
51706	1	581.71	321.85	0	88	1	0.9897	19.628	115	1	1.053	0.98	-
51708	1	84.564	46.788	0	27	1	0.9838	12.254	115	1	1.053	0.98	-
51720	1	41.649	23.044	0	17	1	1.0024	14.836	115	1	1.053	0.98	-
51722	1	88.57	49.004	0	28	1	1.018	17.725	115	1	1.053	0.98	-
51728	1	184.17	101.9	0	0	1	1.0012	28.21	115	1	1.053	0.98	-
51801	2	116	-60.17	0	130	1	1.0201	22.333	230	1	1.053	0.98	-
51802	2	196.91	-16.92	0	130	1	1.0151	20.128	230	1	1.053	0.98	-
51806	1	0	0	0	0	1	1.0135	24.809	230	1	1.053	0.98	-
51826	1	0	0	0	0	1	1.029	27.285	230	1	1.053	0.98	-
51828	2	-191.8	-30.44	0	0	1	1.0229	27.33	230	1	1.053	0.98	-
51856	1	0	0	0	0	1	1.03	24.361	230	1	1.053	0.98	-
51926	1	0	0	0	0	1	1.03	29.998	500	1	1.053	0.98	-
51940	2	587.76	-256.1	0	0	1	1.03	30.278	500	1	1.053	0.98	-
54011	2	0	0	0	0	1	1.0341	35.782	21	4	1.053	0.98	-
54012	2	0	0	0	0	1	1.0341	35.782	21	4	1.053	0.98	-
54013	2	0	0	0	0	1	1.0341	35.695	16.5	4	1.053	0.98	-
54014	2	0	0	0	0	1	1.0341	35.782	21	4	1.053	0.98	-
54015	2	0	0	0	0	1	1.0341	35.782	21	4	1.053	0.98	-
54016	2	0	0	0	0	1	1.0341	35.695	16.5	4	1.053	0.98	-
55001	2	0	0	0	0	1	1	-8.884	11.5	2	1.053	0.98	-
55004	2	0	0	0	0	1	1	-5.406	11.5	2	1.053	0.98	-
55005	2	0	0	0	0	1	1	-5.528	11.5	2	1.053	0.98	-
55006	2	0	0	0	0	1	1	-5.219	11.5	2	1.053	0.98	-
55011	2	0	0	0	0	1	1	3.587	11.5	2	1.053	0.98	-
55012	2	0	0	0	0	1	1	3.2535	11.5	2	1.053	0.98	-
55013	2	0	0	0	0	1	1	3.4386	11.5	2	1.053	0.98	-
55901	1	0	0	0	0	1	1.025	29.663	500	5	1.053	0.98	-
55902	1	0	0	0	0	1	1.025	29.663	500	5	1.053	0.98	-
55903	1	0	0	0	0	1	1.0325	30.156	500	5	1.053	0.98	-
55904	1	0	0	0	0	1	1.0306	30.249	500	5	1.053	0.98	-
55905	1	0	0	0	0	1	1.0298	29.883	500	5	1.053	0.98	-
55906	1	0	0	0	0	1	1.03	30.184	500	5	1.053	0.98	-
61001	2	25	15.494	0	0	1	1.0264	-3.573	22	1	1.053	0.98	-
61002	2	25	15.494	0	0	1	1.0264	-3.573	22	1	1.053	0.98	-
61003	2	30	18.592	0	0	1	1.0268	7.7071	23	1	1.053	0.98	-
61004	2	30	18.592	0	0	1	1.0268	7.7071	23	1	1.053	0.98	-
61021	2	2	1.239	0	0	1	1.0394	9.3848	11.5	1	1.053	0.98	-
61022	2	2	1.239	0	0	1	1.0394	9.3848	11.5	1	1.053	0.98	-
61023	2	5	3.099	0	0	1	1.0346	8.7428	13.8	1	1.053	0.98	-
61024	2	2	1.239	0	0	1	1.0394	9.3848	11.5	1	1.053	0.98	-
61025	2	2	1.239	0	0	1	1.0394	9.3848	11.5	1	1.053	0.98	-
61026	2	5	3.099	0	0	1	1.0346	8.7428	13.8	1	1.053	0.98	-
61027	2	0	0	0	0	1	1.0105	-1.375	20	1	1.053	0.98	-
61028	2	0	0	0	0	1	1.0105	-1.375	20	1	1.053	0.98	-
61029	2	0	0	0	0	1	1.0094	-1.671	20	1	1.053	0.98	-
61716	1	723.82	400.48	0	198	1	1.0086	15.846	115	1	1.053	0.98	-
61727	1	501.41	277.42	0	0	1	0.9947	37.563	115	1	1.053	0.98	-
61807	1	0	0	0	0	1	1.03	21.346	230	1	1.053	0.98	-
61808	2	886.05	433.76	0	0	1	1.03	32.023	230	1	1.053	0.98	-
61816	1	0	0	0	0	1	1.0231	20.778	230	1	1.053	0.98	-
61827	2	-1490	277.59	0	0	1	1.0325	39.901	230	1	1.053	0.98	-
61927	1	0	0	0	0	1	1.0141	35.825	500	1	1.053	0.98	-
64027	2	0	0	0	0	1	1.0184	-3.036	21	4	1.053	0.98	-
64031	2	0	0	0	0	1	1.0298	73.693	24	4	1.053	0.98	-
64032	2	0	0	0	0	1	1.0298	73.693	24	4	1.053	0.98	-
64061	2	0	0	0	0	1	1.0341	35.782	21	4	1.053	0.98	-
64062	2	0	0	0	0	1	1.0341	35.782	21	4	1.053	0.98	-
64063	2	0	0	0	0	1	1.0341	35.695	16.5	4	1.053	0.98	-
64805	1	0	0	0	0	1	1.03	22.256	230	4	1.053	0.98	-
64901	1	0	0	0	0	1	1.03	37.555	500	4	1.053	0.98	-
65038	2	0	0	0	0	1	1	-8.916	11.5	2	1.053	0.98	-

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัสของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล (ต่อ)

Bus Number	Type	Pd (MW)	Qd (MW)	Gs	Bs	Area	V (pu.)	Angle	Base kV	Zone	Vmax (pu.)	Vmin (pu.)	Isc Rating (kA)
65039	2	0	0	0	0	1	1	-10.75	11.5	2	1.053	0.98	-
65040	2	0	0	0	0	1	1	11.016	11.5	2	1.053	0.98	-
65041	2	0	0	0	0	1	1	12.827	11.5	2	1.053	0.98	-
65042	2	0	0	0	0	1	1	13.245	11.5	2	1.053	0.98	-
66901	1	0	0	0	-100	1	1.0141	35.825	500	1	1.053	0.98	-
66902	1	0	0	0	-100	1	1.0141	35.825	500	1	1.053	0.98	-
69901	1	0	0	0	-100	1	1.0141	35.825	500	1	1.053	0.98	-
69902	1	0	0	0	-100	1	1.0141	35.825	500	1	1.053	0.98	-
71001	2	0	0	0	0	1	1.0017	-9.543	16	1	1.053	0.98	-
71021	2	0.2	0.124	0	0	1	1.0056	-8.174	11	1	1.053	0.98	-
71031	3	35	21.691	0	0	1	1.03	0	23	1	1.053	0.98	-
71032	2	35	21.691	0	0	1	1.0016	-0.489	23	1	1.053	0.98	-
71041	2	4	2.479	0	0	1	1.032	-6.694	11.5	1	1.053	0.98	-
71042	2	4	2.479	0	0	1	1.032	-6.694	11.5	1	1.053	0.98	-
71043	2	0.21	0.13	0	0	1	1.0329	-6.589	11.5	1	1.053	0.98	-
71044	2	4	2.479	0	0	1	1.032	-6.694	11.5	1	1.053	0.98	-
71045	2	4	2.479	0	0	1	1.032	-6.694	11.5	1	1.053	0.98	-
71046	2	0.21	0.13	0	0	1	1.0329	-6.589	11.5	1	1.053	0.98	-
71047	2	4	2.479	0	0	1	1.0013	3.2016	11.5	1	1.053	0.98	-
71048	2	4	2.479	0	0	1	1.0013	3.2016	11.5	1	1.053	0.98	-
71049	2	0.21	0.13	0	0	1	1.0022	3.3099	11.5	1	1.053	0.98	-
71702	2	392.99	163.68	0	0	1	1.0341	17.399	115	1	1.053	0.98	-
71703	1	99.537	55.072	0	0	1	1.0257	18.73	115	1	1.053	0.98	-
71705	1	22.198	12.282	0	4	1	1.0251	18.504	115	1	1.053	0.98	-
71707	1	128.16	70.906	0	0	1	1.0435	18.344	115	1	1.053	0.98	-
71708	1	8.042	4.449	0	0	1	1.03	18.768	115	1	1.053	0.98	-
71709	1	66.358	36.714	0	7	1	0.9996	15.362	115	1	1.053	0.98	-
71716	1	72.262	39.982	0	13	1	1.014	19.533	115	1	1.053	0.98	-
71717	1	45.074	24.939	0	0	1	1.0217	18.581	115	1	1.053	0.98	-
71718	1	37.911	20.975	0	0	1	1.02	17.504	115	1	1.053	0.98	-
71721	2	427.75	177.1	0	55	1	1.0255	21.973	115	1	1.053	0.98	-
71724	1	545.06	301.57	0	6	1	1.0271	11.01	115	1	1.053	0.98	-
71802	2	-278.1	28.199	0	0	1	1.0078	22.463	230	1	1.053	0.98	-
71803	2	398.72	-44.23	0	0	1	1.03	20.457	230	1	1.053	0.98	-
71804	1	0	0	0	0	1	1.0303	20.692	230	1	1.053	0.98	-
71807	1	0	0	0	0	1	0.999	20.99	230	1	1.053	0.98	-
71817	1	0	0	0	0	1	1.0185	20.274	230	1	1.053	0.98	-
71821	1	0	0	0	0	1	1.0274	25.469	230	1	1.053	0.98	-
71823	2	368.94	223.3	0	0	1	1.03	20.017	230	1	1.053	0.98	-
71824	2	381.59	136.76	0	0	1	0.9984	15.613	230	1	1.053	0.98	-
71853	1	0	0	0	0	1	1.0422	26.567	230	1	1.053	0.98	-
71904	1	0	0	0	0	1	1.0353	25.403	500	1	1.053	0.98	-
71906	1	0	0	0	0	1	1.0328	29.205	500	1	1.053	0.98	-
71923	1	0	0	0	0	1	1.03	29.812	500	1	1.053	0.98	-
74001	2	4	2.479	0	0	1	0.9942	0.6457	15.8	4	1.053	0.98	-
74002	2	4	2.479	0	0	1	0.9942	0.6457	15.8	4	1.053	0.98	-
74003	2	10	6.197	0	0	1	0.9934	0.6302	15.8	4	1.053	0.98	-
74011	2	0	0	0	0	1	0.9879	3.6076	21	4	1.053	0.98	-
74012	2	0	0	0	0	1	0.9879	3.6076	21	4	1.053	0.98	-
74013	2	0	0	0	0	1	0.9876	3.848	21	4	1.053	0.98	-
74014	2	0	0	0	0	1	0.9879	3.6076	21	4	1.053	0.98	-
74015	2	0	0	0	0	1	0.9879	3.6076	21	4	1.053	0.98	-
74016	2	0	0	0	0	1	0.9876	3.848	21	4	1.053	0.98	-
74802	1	0	0	0	0	1	1.03	26.135	230	4	1.053	0.98	-
75001	2	0	0	0	0	1	1.0238	-4.751	11.5	2	1.053	0.98	-
75002	2	0	0	0	0	1	1.0238	-4.751	11.5	2	1.053	0.98	-
75003	2	0	0	0	0	1	1.0238	-4.751	11.5	2	1.053	0.98	-
77901	1	0	0	0	-100	1	1.0353	25.403	500	1	1.053	0.98	-
77902	1	0	0	0	-100	1	1.0328	29.205	500	1	1.053	0.98	-
77903	1	0	0	0	-100	1	1.0353	25.403	500	1	1.053	0.98	-
77904	1	0	0	0	-100	1	1.0328	29.205	500	1	1.053	0.98	-

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล

Bus Number	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	V (pu.)	Mbase (MVA)	Status	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Subtransient	
										Resistance (pu.)	Reactance (pu.)
11011	110	38.066	68	-34	1.004	129.4	1	116.5	0	0	0.2
11012	110	38.066	68	-34	1.004	129.4	1	116.5	0	0	0.2
11013	115	39.862	70	-35	1.003	135.3	1	121.8	0	0	0.2
11014	202	116.353	125	-62	1.036	291.25	1	262.1	0	0.003	0.2
11015	202	116.353	125	-62	1.036	291.25	1	262.1	0	0.003	0.2
11016	219	126.409	135	-67	1.038	257.65	1	231.9	0	0	0.2
11017	230	79.724	167.92	-83.96	1.009	320	1	288	0	0	0.2
11018	230	79.724	167.92	-83.96	1.009	320	1	288	0	0	0.2
11019	240	83.315	178.86	-89.43	1.008	340	1	306	0	0	0.2
11031	230	161.1	161.1	-80.55	1.04	307	1	276.3	0	0	0.2
11032	230	161.1	161.1	-80.55	1.04	307	1	276.3	0	0	0.2
11033	240	173.59	173.59	-86.8	1.04	330	1	297	0	0	0.2
15001	10	1.529	6.2	-3	1	47.1	1	42.39	0	0	0.2
15002	90	50.688	55	-27	1	150.6	1	135.5	0	0	0.2
15003	40	15.42	27.5	-13.5	1	52.94	1	47.65	0	0	0.2
15004	90	8.089	55	-27	1	140	1	126	0	0	0.2
15005	90	8.073	55	-27	1	131.76	1	118.6	0	0	0.2
15006	90	4.845	25	-12	1	139.4	1	125.5	0	0	0.2
51001	220	138	138	-69	1.027	262.76	1	236.5	0	0	0.2
51002	220	138	138	-69	1.027	262.76	1	236.5	0	0	0.2
51003	205	127	127	-63	1.034	241.68	1	217.5	0	0	0.2
51004	220	26.914	138	-69	1.011	262.76	1	236.5	0	0	0.2
51005	220	26.914	138	-69	1.011	262.76	1	236.5	0	0	0.2
51006	205	25.087	127	-63	1.01	241.68	1	217.5	0	0	0.2
51007	230	28.077	146	-73	0.987	277.65	1	249.9	0	0	0.2
51008	230	28.077	146	-73	0.987	277.65	1	249.9	0	0	0.2
51009	255	31.234	159	-79	0.986	302.35	1	272.1	0	0	0.2
51010	265	133.717	163.94	-81.97	1.026	311.77	1	280.6	0	0	0.2
51011	265	133.717	163.94	-81.97	1.026	311.77	1	280.6	0	0	0.2
51012	270	136.545	167.05	-83	1.027	317.65	1	285.9	0	0	0.2
51701	0	0	0	0	1.029	100	1	90	0	0.11589	0.57228
51702	0	0	0	0	1.042	100	1	90	0	0.19481	1.91531
51801	0	0	0	0	1.02	100	1	90	0	0.01901	0.2228
51802	0	0	0	0	1.015	100	1	90	0	0.00827	0.04827
51828	0	0	0	0	1.023	100	1	90	0	0.00641	0.03068
51940	0	0	0	0	1.03	100	1	90	0	0.00138	0.02654
54011	270	24.184	194.16	-97.08	1.034	370	1	333	0	0	0.2
54012	270	24.184	194.16	-97.08	1.034	370	1	333	0	0	0.2
54013	260	23.114	190.43	-95.21	1.034	362	1	325.8	0	0	0.2
54014	270	24.184	194.16	-97.08	1.034	370	1	333	0	0	0.2
54015	270	24.184	194.16	-97.08	1.034	370	1	333	0	0	0.2
54016	260	23.114	190.43	-95.21	1.034	362	1	325.8	0	0	0.2
55001	27	3.813	22	-11	1	55.76	1	50.18	0	0	0.2
55004	90	41.028	55	-27	1	141.2	1	127.1	0	0	0.2
55005	90	14.938	55	-27	1	141.2	1	127.1	0	0	0.2
55006	90	14.955	55	-27	1	124.71	1	112.2	0	0	0.2
55011	90	3.087	55	-27	1	124.71	1	112.2	0	0	0.2
55012	90	2.75	55	-27	1	132.94	1	119.6	0	0	0.2
55013	90	2.938	51.45	-25.03	1	168.5	1	151.7	0	0	0.2
61001	550	165.597	341	-170	1.026	680	1	612	0	0	0.2
61002	550	165.597	341	-170	1.026	680	1	612	0	0	0.2
61003	600	315.698	371	-186	1.027	706	1	635.4	0	0	0.2
61004	600	315.698	371	-186	1.027	706	1	635.4	0	0	0.2
61021	100	53.09	62	-40	1.039	128.6	1	115.7	0	0	0.2

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล (ต่อ)

Bus Number	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	V (pu.)	Mbase (MVA)	Status	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Subtransient	
										Resistance (pu.)	Reactance (pu.)
61022	100	53.09	62	-40	1.039	128.6	1	115.7	0	0	0.2
61023	100	53.09	62	-40	1.035	145	1	130.5	0	0	0.2
61024	100	53.09	62	-40	1.039	128.6	1	115.7	0	0	0.2
61025	100	53.09	62	-40	1.039	128.6	1	115.7	0	0	0.2
61026	100	53.09	62	-40	1.035	145	1	130.5	0	0	0.2
61027	230	69.269	153.75	-76.88	1.01	293	1	263.7	0	0	0.2
61028	230	69.269	153.75	-76.88	1.01	293	1	263.7	0	0	0.2
61029	240	71.975	168.33	-84.17	1.009	320	1	288	0	0	0.2
61808	0	0	0	0	1.03	100	1	90	0	0.00216	0.02175
61827	0	0	0	0	1.032	100	1	90	0	0.00488	0.01513
64027	350	71.865	260	-130	1.018	500	1	450	0	0	0.2
64031	673	349.634	440	-220	1.03	844	1	759.6	0	0	0.2
64032	673	349.634	440	-220	1.03	844	1	759.6	0	0	0.2
64061	270	24.184	194.16	-97.08	1.034	370	1	333	0	0	0.2
64062	270	24.184	194.16	-97.08	1.034	370	1	333	0	0	0.2
64063	260	23.114	190.43	-95.21	1.034	362	1	325.8	0	0	0.2
65038	90	-4.255	55	-27	1	127.06	1	114.4	0	0	0.2
65039	90	-10.193	55	-27	1	127.06	1	114.4	0	0	0.2
65040	90	10.635	55	-27	1	195.3	1	175.8	0	0	0.2
65041	90	9.338	55	-27	1	195.3	1	175.8	0	0	0.2
65042	90	9.285	55	-27	1	118.8	1	106.9	0	0	0.2
71001	0	51.855	300	-50	1.002	100	1	90	0	999	999
71021	13	6.484	9	-4	1.006	21.2	1	19.08	0	0	0.2
71031	57.54	193.09	455	-227	1.03	990	1	891	0	0	0.2
71032	0	0	455	-227	1.002	990	0	891	0	0	0.2
71041	138	69.26	142	-71	1.032	270.6	1	243.5	0	0	0.2
71042	138	69.26	142	-71	1.032	270.6	1	243.5	0	0	0.2
71043	159	79.714	164	-82	1.033	311.76	1	280.6	0	0	0.2
71044	138	69.26	142	-71	1.032	270.6	1	243.5	0	0	0.2
71045	138	69.26	142	-71	1.032	270.6	1	243.5	0	0	0.2
71046	159	79.714	164	-82	1.033	311.76	1	280.6	0	0	0.2
71047	138	-1.616	142	-71	1.001	270.6	1	243.5	0	0	0.2
71048	138	-1.616	142	-71	1.001	270.6	1	243.5	0	0	0.2
71049	159	-1.868	164	-82	1.002	311.76	1	280.6	0	0	0.2
71702	0	0	0	0	1.034	100	1	90	0	173.8475	185.8896
71702	0	0	0	0	1.034	100	1	90	0	0.60979	1.0913
71721	0	0	0	0	1.025	100	1	90	0	209.8607	144.7399
71802	0	0	0	0	1.008	100	1	90	0	0.02467	0.05619
71802	0	0	0	0	1.008	100	1	90	0	52.02229	55.09021
71803	0	0	0	0	1.03	100	1	90	0	0.00147	0.07443
71823	0	0	0	0	1.03	100	1	90	0	4.58863	-5.78259
71824	0	0	0	0	0.998	100	1	90	0	32.68908	29.90524
74001	237	51.695	168.76	-82.83	0.994	322	1	289.8	0	0	0.2
74002	237	51.695	168.76	-82.83	0.994	322	1	289.8	0	0	0.2
74003	244	53.262	169	-82	0.993	322	1	289.8	0	0	0.2
74011	138	-1.616	162.15	-81.07	0.988	309	1	278.1	0	0	0.2
74012	138	-1.616	162.15	-81.07	0.988	309	1	278.1	0	0	0.2
74013	159	-1.868	182.01	-91.01	0.988	346	1	311.4	0	0	0.2
74014	138	-1.616	162.15	-81.07	0.988	309	1	278.1	0	0	0.2
74015	138	-1.616	162.15	-81.07	0.988	309	1	278.1	0	0	0.2
74016	159	-1.868	182.01	-91.01	0.988	346	1	311.4	0	0	0.2
75001	90	0	0	0	1.024	150	1	135	0	0	0.2
75002	90	0	0	0	1.024	150	1	135	0	0	0.2
75003	90	0	0	0	1.024	150	1	135	0	0	0.2

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล

From bus	To bus	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Rate (MVA)	Ratio	Angle	Status	Ang. Min.	Ang. Max.
11801	11809	0.00044	0.00467	0.01904	858.89	1	0	1	-180	180
11801	11809	0.00045	0.00474	0.01935	858.89	1	0	1	-180	180
11801	11809	0.00045	0.00474	0.01935	858.89	1	0	1	-180	180
11801	11811	0.00024	0.0028	0.00866	858.89	1	0	1	-180	180
11801	11811	0.00024	0.0028	0.00866	858.89	1	0	1	-180	180
11801	11809	0.00044	0.00467	0.01904	858.89	1	0	1	-180	180
11802	11839	0.00115	0.00829	0.01831	429.44	1	0	1	-180	180
11802	11815	0.0002	0.00204	0.00865	858.89	1	0	1	-180	180
11802	11815	0.0002	0.00204	0.00865	858.89	1	0	1	-180	180
11802	11816	0.00112	0.01174	0.04365	858.89	1	0	1	-180	180
11802	11816	0.00112	0.01174	0.04365	858.89	1	0	1	-180	180
11802	11816	0.00112	0.01174	0.04365	858.89	1	0	1	-180	180
11802	11816	0.00112	0.01174	0.04365	858.89	1	0	1	-180	180
11802	11839	0.00115	0.00829	0.01831	429.44	1	0	1	-180	180
11803	11808	0.00092	0.01075	0.03545	858.89	1	0	1	-180	180
11803	11808	0.00092	0.01075	0.03545	858.89	1	0	1	-180	180
11803	11812	0.00074	0.01379	0.06997	1717.8	1	0	1	-180	180
11803	11812	0.00074	0.01379	0.06997	1717.8	1	0	1	-180	180
11803	11814	0.00037	0.00385	0.01689	858.89	1	0	1	-180	180
11803	11814	0.00037	0.00385	0.01689	858.89	1	0	1	-180	180
11803	11814	0.00038	0.00389	0.01709	858.89	1	0	1	-180	180
11803	17801	0.00037	0.00378	0.01597	858.89	1	0	1	-180	180
11803	17802	0.00037	0.00378	0.01597	858.89	1	0	1	-180	180
11804	11806	0.00024	0.00398	0.02587	1717.8	1	0	1	-180	180
11804	11806	0.00024	0.00398	0.02587	1717.8	1	0	1	-180	180
11804	11806	0.00024	0.00398	0.02587	1717.8	1	0	1	-180	180
11804	11810	0.00019	0.00348	0.01763	1717.8	1	0	1	-180	180
11804	11810	0.00019	0.00348	0.01763	1717.8	1	0	1	-180	180
11804	11838	0.0003	0.00505	0.03284	1717.8	1	0	1	-180	180
11806	11811	0.00035	0.00404	0.01249	858.89	1	0	1	-180	180
11806	11811	0.00035	0.00404	0.01249	858.89	1	0	1	-180	180
11806	11838	0.00016	0.00272	0.01766	1717.8	1	0	1	-180	180
11807	16805	0.00065	0.00685	0.02816	858.89	1	0	1	-180	180
11807	16806	0.00065	0.00685	0.02816	858.89	1	0	1	-180	180
11807	16807	0.00121	0.01272	0.05224	858.89	1	0	1	-180	180
11807	16808	0.00121	0.01272	0.05224	858.89	1	0	1	-180	180
11808	11838	0	0.0001	0	0	1	0	1	-180	180
11809	11839	0	0.0001	0	0	1	0	0	-180	180
11810	11819	0.0009	0.00945	0.03856	858.89	1	0	1	-180	180
11810	11819	0.0009	0.00945	0.03856	858.89	1	0	1	-180	180
11810	11819	0.0009	0.00945	0.03856	858.89	1	0	1	-180	180
11810	11819	0.0009	0.00945	0.03856	858.89	1	0	1	-180	180
11810	11820	0.00149	0.01574	0.06429	858.89	1	0	1	-180	180
11810	11820	0.00149	0.01574	0.06429	858.89	1	0	1	-180	180
11810	17803	0.00074	0.01212	0.07934	1717.8	1	0	1	-180	180
11810	17804	0.00074	0.01212	0.07934	1717.8	1	0	1	-180	180
11812	15803	0.00156	0.01121	0.02478	429.44	1	0	1	-180	180
11812	15804	0.00156	0.01121	0.02478	429.44	1	0	1	-180	180
11813	11814	0.00079	0.00764	0.03704	858.89	1	0	1	-180	180
11813	11814	0.00079	0.00802	0.03524	858.89	1	0	1	-180	180
11813	11814	0.00079	0.00802	0.03524	858.89	1	0	1	-180	180
11813	11843	0	0.0001	0	0	1	0	1	-180	180
11815	11843	0.00058	0.00596	0.0252	858.89	1	0	1	-180	180
11815	11843	0.00058	0.00596	0.0252	858.89	1	0	1	-180	180
11816	16811	0.00067	0.00697	0.02591	858.89	1	0	1	-180	180
11816	16812	0.00067	0.00697	0.02591	858.89	1	0	1	-180	180
11816	16813	0.00067	0.00727	0.02488	858.89	1	0	1	-180	180
11816	16814	0.00067	0.00727	0.02488	858.89	1	0	1	-180	180
11819	15805	6.00E-05	0.00066	0.0027	858.89	1	0	1	-180	180
11819	15806	6.00E-05	0.00066	0.0027	858.89	1	0	1	-180	180
11819	19801	6.00E-05	0.00066	0.0027	858.89	1	0	1	-180	180
11819	19802	6.00E-05	0.00066	0.0027	858.89	1	0	1	-180	180

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล (ต่อ)

From bus	To bus	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Rate (MVA)	Ratio	Angle	Status	Ang. Min.	Ang. Max.
11820	19803	0.00111	0.01171	0.04783	858.89	1	0	1	-180	180
11820	19804	0.00111	0.01171	0.04783	858.89	1	0	1	-180	180
11907	11909	0.00011	0.00201	0.19479	3734.3	1	0	1	-180	180
11907	11909	0.00011	0.00201	0.19479	3734.3	1	0	1	-180	180
11907	19902	0.00015	0.00189	0.17763	2833.6	1	0	1	-180	180
11907	19905	0.00015	0.00189	0.17763	2833.6	1	0	1	-180	180
11907	19919	0.00038	0.00495	0.4683	2833.6	1	0	1	-180	180
11907	55901	0.00041	0.00508	0.47817	2833.6	1	0	1	-180	180
11907	55902	0.00041	0.00508	0.47817	2833.6	1	0	1	-180	180
11912	11942	0	#####	0	3734.3	1	0	1	-180	180
11912	11942	0	#####	0	3734.3	1	0	1	-180	180
11912	15902	0.00029	0.00361	0.33965	2833.6	1	0	1	-180	180
11912	15903	0.00029	0.00361	0.33965	2833.6	1	0	1	-180	180
11942	17902	6.00E-05	0.00111	0.10804	3734.3	1	0	1	-180	180
11942	17903	8.00E-05	0.00148	0.14327	3734.3	1	0	1	-180	180
11942	17905	6.00E-05	0.00111	0.10804	3734.3	1	0	1	-180	180
11942	19918	8.00E-05	0.00148	0.14327	3734.3	1	0	1	-180	180
15803	51802	0.0055	0.03957	0.08751	429.44	1	0	1	-180	180
15804	51802	0.0055	0.03957	0.08751	429.44	1	0	1	-180	180
15805	51856	0.00141	0.01492	0.06087	858.89	1	0	1	-180	180
15806	51856	0.00141	0.01492	0.06087	858.89	1	0	1	-180	180
15902	51926	0.00026	0.00319	0.30079	2833.6	1	0	1	-180	180
15903	51926	0.00026	0.00319	0.30079	2833.6	1	0	1	-180	180
16805	61808	0.00146	0.01531	0.06291	858.89	1	0	1	-180	180
16806	61808	0.00146	0.01531	0.06291	858.89	1	0	1	-180	180
16807	61808	0.00135	0.01418	0.05826	858.89	1	0	1	-180	180
16808	61808	0.00135	0.01418	0.05826	858.89	1	0	1	-180	180
16811	61807	0.00056	0.00589	0.02189	858.89	1	0	1	-180	180
16812	61807	0.00056	0.00589	0.02189	858.89	1	0	1	-180	180
16813	61807	0.00056	0.00589	0.02189	858.89	1	0	1	-180	180
16814	61807	0.00056	0.00589	0.02189	858.89	1	0	1	-180	180
16901	19902	3.00E-05	0.00053	0.05113	3734.3	1	0	1	-180	180
16901	66901	0.00073	0.01385	1.342	3734.3	1	0	1	-180	180
16902	19904	3.00E-05	0.00055	0.05293	3734.3	1	0	1	-180	180
16902	66902	0.00086	0.01639	1.58794	3734.3	1	0	1	-180	180
17801	71824	0.00022	0.00229	0.00966	858.89	1	0	1	-180	180
17802	71824	0.00022	0.00229	0.00966	858.89	1	0	1	-180	180
17803	71802	0.00123	0.02015	0.13193	1717.8	1	0	1	-180	180
17804	71802	0.00123	0.02015	0.13193	1717.8	1	0	1	-180	180
17902	71906	0.00049	0.00927	1.0542	3734.3	1	0	1	-180	180
17903	17904	2.00E-05	0.00034	0.03293	3734.3	1	0	1	-180	180
17904	71906	0.00061	0.01162	1.1257	3734.3	1	0	1	-180	180
17905	71906	0.00049	0.00926	1.05467	3734.3	1	0	1	-180	180
19801	51856	0.00141	0.01492	0.06087	858.89	1	0	1	-180	180
19802	51856	0.00141	0.01492	0.06087	858.89	1	0	1	-180	180
19803	61816	0.00103	0.01089	0.04448	858.89	1	0	1	-180	180
19804	61816	0.00103	0.01089	0.04448	858.89	1	0	1	-180	180
19904	51926	0.00036	0.00444	0.41848	2833.6	1	0	1	-180	180
19905	19906	3.00E-05	0.00053	0.05113	3734.3	1	0	1	-180	180
19906	69901	0.00073	0.01385	1.342	3734.3	1	0	1	-180	180
19907	51926	0.00036	0.00444	0.41848	2833.6	1	0	1	-180	180
19907	19908	3.00E-05	0.00055	0.05293	3734.3	1	0	1	-180	180
19908	69902	0.00086	0.01639	1.58794	3734.3	1	0	1	-180	180
19915	51926	4.00E-05	0.00084	0.08151	3734.3	1	0	1	-180	180
19915	19919	6.00E-05	0.00084	0.07976	2833.6	1	0	1	-180	180
19917	19922	2.00E-05	0.00034	0.03293	3734.3	1	0	1	-180	180
19917	19920	5.00E-05	0.00098	0.09528	3734.3	1	0	1	-180	180
19918	19921	5.00E-05	0.00098	0.09528	3734.3	1	0	1	-180	180
19920	55903	0.00032	0.00612	0.59283	3734.3	1	0	1	-180	180
19921	55905	0.00032	0.00612	0.59283	3734.3	1	0	1	-180	180
19922	71906	0.00061	0.01162	1.1257	3734.3	1	0	1	-180	180
51604	51613	0.14206	0.19104	0.00246	43.38	1	0	1	-180	180

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล (ต่อ)

From bus	To bus	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Rate (MVA)	Ratio	Angle	Status	Ang. Min.	Ang. Max.
51801	51701	0	0.06135	0	200	0.957	0	1	-180	180
51701	51802	0.12097	0.54603	0	100	1	0	1	-180	180
51701	51702	2.46861	8.32223	0	100	1	0	1	-180	180
51701	51703	0.01833	0.08137	0.01069	162.93	1	0	1	-180	180
51701	51722	0.03332	0.09589	0.01288	117.52	1	0	1	-180	180
51701	51722	0.03393	0.09948	0.01287	117.52	1	0	1	-180	180
51701	51722	0.03332	0.09589	0.01288	117.52	1	0	1	-180	180
51701	51828	0.11669	0.68072	0	100	1	0	1	-180	180
51701	51940	0.02426	0.45258	0	100	1	0	1	-180	180
51702	51708	0.03757	0.11047	0.01409	119.51	1	0	1	-180	180
51702	51720	0.07987	0.10779	0.01064	72.3	1	0	1	-180	180
51702	51801	0.72428	3.75613	0	100	1	0	1	-180	180
51802	51702	0	0.055	0	300	0.95	0	1	-180	180
51702	51703	0.03858	0.10824	0.01519	119.51	1	0	1	-180	180
51702	51703	0.03858	0.10824	0.01519	119.51	1	0	1	-180	180
51702	51722	0.13037	0.17204	0.01786	72.3	1	0	1	-180	180
51702	51828	0.44879	4.55978	0	100	1	0	1	-180	180
51702	51940	0.02671	0.88495	0	100	1	0	1	-180	180
51703	51704	0.00099	0.00435	0.00065	162.93	1	0	1	-180	180
51703	51704	0.00099	0.00435	0.00065	162.93	1	0	1	-180	180
51703	51705	0.02105	0.05906	0.00828	119.51	1	0	1	-180	180
51703	51705	0.02105	0.05906	0.00828	119.51	1	0	1	-180	180
51705	51706	0.00108	0.00722	0.00186	325.87	1	0	1	-180	180
51705	51706	0.00108	0.00722	0.00186	325.87	1	0	1	-180	180
51801	51806	0.00493	0.03542	0.0783	429.44	1	0	1	-180	180
51801	51806	0.00493	0.03542	0.0783	429.44	1	0	1	-180	180
51801	51802	0.04524	0.3025	0	100	1	0	1	-180	180
51801	51828	0.03655	0.51886	0	100	1	0	1	-180	180
51801	51940	0.00253	0.09411	0	100	1	0	1	-180	180
51802	51828	0.00486	0.04667	0	100	1	0	1	-180	180
51802	51940	-0.00086	0.06723	0	100	1	0	1	-180	180
51806	51826	0.00112	0.01176	0.04795	858.89	1	0	1	-180	180
51806	51826	0.00112	0.01176	0.04795	858.89	1	0	1	-180	180
51826	51828	0.00145	0.01523	0.06213	858.89	1	0	1	-180	180
51826	51828	0.00145	0.01523	0.06213	858.89	1	0	1	-180	180
51828	51940	0.00394	0.114	0	100	1	0	1	-180	180
51940	55904	3.00E-05	0.00055	0.05293	3734.3	1	0	1	-180	180
51940	55906	3.00E-05	0.00055	0.05293	3734.3	1	0	1	-180	180
51940	55901	0.00014	0.00272	0.26344	3734.3	1	0	1	-180	180
51940	55902	0.00014	0.00272	0.26344	3734.3	1	0	1	-180	180
55903	55904	9.00E-05	0.00175	0.16938	3734.3	1	0	1	-180	180
55905	55906	9.00E-05	0.00175	0.16938	3734.3	1	0	1	-180	180
61807	61816	0.0004	0.00423	0.01726	858.89	1	0	1	-180	180
61807	61816	0.0004	0.00423	0.01726	858.89	1	0	1	-180	180
61816	64805	0.0022	0.01582	0.03484	429.44	1	0	1	-180	180
61816	64805	0.0022	0.01582	0.03484	429.44	1	0	1	-180	180
61927	64901	0.0004	0.00486	0.51586	2833.6	1	0	1	-180	180
61927	64901	0.0004	0.00486	0.51586	2833.6	1	0	1	-180	180
61927	66901	0	0.0001	0	3464.1	1	0	1	-180	180
61927	69901	0	0.0001	0	3464.1	1	0	1	-180	180
61927	66902	0	0.0001	0	3464.1	1	0	1	-180	180
61927	69902	0	0.0001	0	3464.1	1	0	1	-180	180
71802	71702	0	0.06845	0	200	0.927	0	1	-180	180
71702	71709	0.02213	0.06515	0.00829	119.51	1	0	1	-180	180
71702	71721	0.08494	0.21806	0	100	1	0	1	-180	180
71802	71702	0	0.06864	0	200	0.927	0	1	-180	180
71702	71823	0.10006	1.21826	0	100	1	0	1	-180	180
71702	71824	0.04951	0.47682	0	100	1	0	1	-180	180
71703	71717	0.05909	0.16586	0.02328	119.51	1	0	1	-180	180
71703	71717	0.05909	0.16586	0.02328	119.51	1	0	1	-180	180
71705	71716	0.03208	0.09627	0.01187	117.52	1	0	1	-180	180
71705	71707	0.02912	0.08554	0.01092	119.51	1	0	1	-180	180

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล (ต่อ)

From bus	To bus	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Rate (MVA)	Ratio	Angle	Status	Ang. Min.	Ang. Max.
71705	71708	0.05807	0.12473	0.01484	96.41	1	0	1	-180	180
71707	71718	0.02587	0.076	0.00971	119.51	1	0	1	-180	180
71716	71721	0.01664	0.10395	0.03043	325.87	1	0	1	-180	180
71716	71721	0.01664	0.10395	0.03043	325.87	1	0	1	-180	180
71717	71718	0.06332	0.1795	0.02469	119.51	1	0	1	-180	180
71721	71802	0.05076	0.67162	0	100	1	0	1	-180	180
71721	71823	0.03983	0.26849	0	100	1	0	1	-180	180
71721	71824	0.09852	0.4695	0	100	1	0	1	-180	180
71802	71821	0.00104	0.0173	0.11252	1717.8	1	0	1	-180	180
71802	71821	0.00104	0.0173	0.11252	1717.8	1	0	1	-180	180
71802	71823	-0.03599	0.3846	0	100	1	0	1	-180	180
71802	71824	-0.00562	0.13462	0	100	1	0	1	-180	180
71803	71817	0.00586	0.04251	0.09271	429.44	1	0	1	-180	180
71803	71817	0.00586	0.04251	0.09271	429.44	1	0	1	-180	180
71803	71804	5.00E-05	0.00083	0.00538	1717.8	1	0	1	-180	180
71807	71817	0.00976	0.07055	0.15527	429.44	1	0	1	-180	180
71807	71817	0.00976	0.07055	0.15527	429.44	1	0	1	-180	180
71807	71821	0.01206	0.08728	0.19233	429.44	1	0	1	-180	180
71807	71821	0.01206	0.08728	0.19233	429.44	1	0	1	-180	180
71821	74802	0.00034	0.00356	0.01449	858.89	1	0	1	-180	180
71821	74802	0.00034	0.00356	0.01449	858.89	1	0	1	-180	180
71821	71853	0.00058	0.00959	0.06235	1717.8	1	0	1	-180	180
71821	71853	0.00058	0.00959	0.06235	1717.8	1	0	1	-180	180
71823	71824	0.0027	0.01634	0	100	1	0	1	-180	180
71823	71853	0	0.0001	0	0	1	0	0	-180	180
71904	77901	0	0.0001	0	3464.1	1	0	1	-180	180
71904	77903	0	0.0001	0	3464.1	1	0	1	-180	180
71906	77902	0	0.0001	0	3464.1	1	0	1	-180	180
71906	77904	0	0.0001	0	3464.1	1	0	1	-180	180
71906	71923	0.00015	0.00264	0.29944	3734.3	1	0	1	-180	180
71906	71923	0.00015	0.00264	0.29944	3734.3	1	0	1	-180	180
77901	77902	0.00142	0.02679	3.09692	3734.3	1	0	1	-180	180
77903	77904	0.00142	0.02679	3.09692	3734.3	1	0	1	-180	180
11813	11011	0	0.06993	0	140	1.05	30	1	-180	180
11813	11012	0	0.07143	0	140	1.05	30	1	-180	180
11813	11013	0	0.06957	0	140	1.05	30	1	-180	180
11843	11014	0	0.03009	0	327	1.025	30	1	-180	180
11843	11015	0	0.03009	0	327	1.025	30	1	-180	180
11843	11016	0	0.03009	0	327	1.025	30	1	-180	180
11813	11017	0	0.04063	0	320	1.05	30	1	-180	180
11813	11018	0	0.04063	0	320	1.05	30	1	-180	180
11813	11019	0	0.03824	0	340	1.05	30	1	-180	180
11808	11031	0	0.0456	0	307	1.05	30	1	-180	180
11808	11032	0	0.0456	0	307	1.05	30	1	-180	180
11808	11033	0	0.04242	0	330	1.05	30	1	-180	180
11801	11601	0	0.06256	0	300	0.964	0	1	-180	180
11801	11601	0	0.06175	0	300	0.964	0	1	-180	180
11802	11602	0	0.04625	0	200	0.98	0	1	-180	180
11802	11602	0	0.04835	0	200	1.025	0	1	-180	180
11802	11602	0	0.065	0	200	0.98	0	1	-180	180
11802	11602	0	0.065	0	200	1.025	0	1	-180	180
11803	11603	0	0.07314	0	200	0.987	0	1	-180	180
11803	11603	0	0.07314	0	200	0.987	0	1	-180	180
11806	11606	0	0.06635	0	200	0.98	0	1	-180	180
11806	11606	0	0.066	0	200	0.98	0	1	-180	180
11808	11608	0	0.055	0	300	1	0	1	-180	180
11808	11608	0	0.055	0	300	1	0	1	-180	180
11810	11610	0	0.07176	0	200	1.023	0	1	-180	180
11810	11610	0	0.07176	0	200	1.023	0	1	-180	180
11810	11610	0	0.07176	0	200	1.023	0	1	-180	180
11810	11610	0	0.07231	0	200	1.023	0	1	-180	180
11811	11611	0	0.04784	0	300	0.952	0	1	-180	180

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล (ต่อ)

From bus	To bus	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Rate (MVA)	Ratio	Angle	Status	Ang. Min.	Ang. Max.
11811	11611	0	0.04784	0	300	0.952	0	1	-180	180
11843	11613	0	0.06252	0	300	0.976	0	1	-180	180
11843	11613	0	0.06241	0	300	0.976	0	1	-180	180
11814	11614	0	0.07176	0	200	0.987	0	1	-180	180
11814	11614	0	0.07176	0	200	0.987	0	1	-180	180
11815	11615	0	0.06679	0	200	1.011	0	1	-180	180
11815	11615	0	0.06679	0	200	1.011	0	1	-180	180
11801	11631	0	0.06378	0	300	0.999	0	1	-180	180
11801	11631	0	0.06389	0	300	0.999	0	1	-180	180
11803	11633	0	0.07314	0	200	0.976	0	1	-180	180
11803	11633	0	0.064	0	200	0.98	0	1	-180	180
11806	11636	0	0.04635	0	200	0.98	0	1	-180	180
11806	11636	0	0.04685	0	200	0.98	0	1	-180	180
11838	11638	0	0.055	0	300	0.988	0	1	-180	180
11838	11638	0	0.055	0	300	0.988	0	1	-180	180
11813	11643	0	0.06201	0	300	0.999	0	1	-180	180
11813	11643	0	0.0623	0	300	0.999	0	1	-180	180
11814	11644	0	0.07176	0	200	0.999	0	1	-180	180
11814	11644	0	0.07231	0	200	0.999	0	1	-180	180
11802	11702	0	0.055	0	300	1	0	1	-180	180
11802	11702	0	0.055	0	300	1	0	1	-180	180
11802	11702	0	0.055	0	300	1	0	1	-180	180
11803	11703	0	0.055	0	300	0.975	0	1	-180	180
11803	11703	0	0.055	0	300	0.975	0	1	-180	180
11804	11704	0	0.05277	0	300	0.974	0	1	-180	180
11804	11704	0	0.0535	0	300	0.974	0	1	-180	180
11804	11704	0	0.0535	0	300	0.962	0	1	-180	180
11707	15003	0	0.24556	0	52.94	1.05	30	1	-180	180
11807	11707	0	0.055	0	300	1.013	0	1	-180	180
11807	11707	0	0.055	0	300	1.013	0	1	-180	180
11839	11709	0	0.05942	0	300	0.998	0	1	-180	180
11839	11709	0	0.05942	0	300	0.998	0	1	-180	180
11810	11710	0	0.04373	0	300	0.998	0	1	-180	180
11811	11711	0	0.055	0	300	0.975	0	1	-180	180
11812	11712	0	0.05867	0	300	0.998	0	1	-180	180
11812	11712	0	0.05867	0	300	0.998	0	1	-180	180
11812	11712	0	0.05867	0	300	0.974	0	1	-180	180
11713	15002	0	0.07027	0	185	1.05	30	1	-180	180
11843	11713	0	0.05942	0	300	1.007	0	1	-180	180
11843	11713	0	0.05942	0	300	1.007	0	1	-180	180
11815	11715	0	0.05904	0	300	1.01	0	1	-180	180
11815	11715	0	0.06717	0	300	1.01	0	1	-180	180
11719	15006	0	0.09325	0	139.41	1.025	30	1	-180	180
11819	11719	0	0.055	0	300	0.988	0	1	-180	180
11819	11719	0	0.055	0	300	0.988	0	1	-180	180
11819	11719	0	0.055	0	300	0.988	0	1	-180	180
11820	11720	0	0.05942	0	300	0.95	0	1	-180	180
11820	11720	0	0.05942	0	300	0.95	0	1	-180	180
11820	11720	0	0.05942	0	300	0.95	0	1	-180	180
11807	11737	0	0.06692	0	200	0.996	0	1	-180	180
11807	11737	0	0.06692	0	200	0.962	0	1	-180	180
11740	15005	0	0.09866	0	131.76	1.025	30	1	-180	180
11740	15001	0	0.28889	0	45	1.025	30	1	-180	180
11740	15004	0	0.09286	0	140	1.025	30	1	-180	180
11810	11740	0	0.05942	0	300	0.986	0	1	-180	180
11810	11740	0	0.05942	0	300	0.986	0	1	-180	180
11907	11807	0	0.02599	0	600	1.01	0	1	-180	180
11907	11807	0	0.02607	0	600	1.01	0	1	-180	180
11907	11807	0	0.02599	0	600	1.048	0	1	-180	180
11909	11809	0	0.018	0	1000	0.95	0	1	-180	180
11909	11809	0	0.018	0	1000	0.95	0	1	-180	180
11909	11809	0	0.018	0	1000	0.95	0	1	-180	180

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล (ต่อ)

From bus	To bus	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Rate (MVA)	Ratio	Angle	Status	Ang. Min.	Ang. Max.
11912	11812	0	0.03174	0	750	0.961	0	1	-180	180
11912	11812	0	0.03174	0	750	0.961	0	1	-180	180
11912	11812	0	0.03174	0	750	0.961	0	1	-180	180
11909	11839	0	0.018	0	1000	0.95	0	1	-180	180
51826	51001	0	0.03846	0	312	1.05	30	1	-180	180
51826	51002	0	0.03846	0	312	1.05	30	1	-180	180
51826	51003	0	0.04959	0	242	1.05	30	1	-180	180
51856	51004	0	0.03846	0	312	1.025	30	1	-180	180
51856	51005	0	0.03846	0	312	1.025	30	1	-180	180
51856	51006	0	0.04959	0	242	1.025	30	1	-180	180
51856	51007	0	0.03846	0	312	1.05	30	1	-180	180
51856	51008	0	0.03846	0	312	1.05	30	1	-180	180
51856	51009	0	0.03846	0	312	1.05	30	1	-180	180
51926	51010	0	0.03846	0	312	1.05	30	1	-180	180
51926	51011	0	0.03846	0	312	1.05	30	1	-180	180
51926	51012	0	0.03846	0	312	1.05	30	1	-180	180
51704	51604	0	0.2996	0	25	1.038	0	1	-180	180
51801	51701	0	0.0615	0	200	0.957	0	1	-180	180
51801	51701	0	0.065	0	200	1	0	1	-180	180
51702	55001	0	0.26	0	50	1.05	30	1	-180	180
51802	51702	0	0.055	0	300	0.95	0	1	-180	180
51802	51702	0	0.055	0	300	0.95	0	1	-180	180
51705	55006	0	0.10424	0	124.71	1	30	1	-180	180
51706	55004	0	0.09286	0	140	1.025	30	1	-180	180
51706	55005	0	0.09286	0	140	1	30	1	-180	180
51806	51706	0	0.06698	0	200	0.986	0	1	-180	180
51806	51706	0	0.06698	0	200	0.986	0	1	-180	180
51806	51706	0	0.06919	0	200	0.986	0	1	-180	180
51806	51706	0	0.06919	0	200	0.986	0	1	-180	180
51728	55013	0	0.10137	0	128.24	1	30	1	-180	180
51728	55012	0	0.09779	0	132.94	1	30	1	-180	180
51728	55011	0	0.10424	0	124.71	1	30	1	-180	180
51828	51728	0	0.055	0	300	1	0	1	-180	180
51828	51728	0	0.055	0	300	1	0	1	-180	180
51828	51728	0	0.055	0	300	1	0	1	-180	180
51926	51826	0	0.03174	0	750	1.01	0	1	-180	180
51926	51856	0	0.03174	0	750	0.985	0	1	-180	180
51940	54013	0	0.03867	0	362	1	0	1	-180	180
51940	54016	0	0.03867	0	362	1	0	1	-180	180
51940	64063	0	0.03867	0	362	1	0	1	-180	180
51940	54011	0	0.03784	0	370	1	0	1	-180	180
51940	54012	0	0.03784	0	370	1	0	1	-180	180
51940	54014	0	0.03784	0	370	1	0	1	-180	180
51940	54015	0	0.03784	0	370	1	0	1	-180	180
51940	64061	0	0.03784	0	370	1	0	1	-180	180
51940	64062	0	0.03784	0	370	1	0	1	-180	180
61807	61001	0	0.0174	0	680	1.025	30	1	-180	180
61807	61002	0	0.0174	0	680	1.025	30	1	-180	180
61808	61003	0	0.0175	0	706	1.05	30	1	-180	180
61808	61004	0	0.0175	0	706	1.05	30	1	-180	180
61808	61021	0	0.1333	0	125	1.05	30	1	-180	180
61808	61022	0	0.1333	0	125	1.05	30	1	-180	180
61808	61023	0	0.125	0	125	1.05	30	1	-180	180
61808	61024	0	0.1333	0	125	1.05	30	1	-180	180
61808	61025	0	0.1333	0	125	1.05	30	1	-180	180
61808	61026	0	0.125	0	125	1.05	30	1	-180	180
61807	61027	0	0.05461	0	293	1.05	30	1	-180	180
61807	61028	0	0.05461	0	293	1.05	30	1	-180	180
61807	61029	0	0.05016	0	319	1.05	30	1	-180	180
61716	65039	0	0.06656	0	195.3	1	30	1	-180	180
61716	65038	0	0.10231	0	127.06	1	30	1	-180	180
61816	61716	0	0.06698	0	200	0.974	0	1	-180	180

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยสำหรับวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรในเขตกรุงเทพและปริมณฑล (ต่อ)

From bus	To bus	R (pu.)	X (pu.)	B (pu.)	Rate (MVA)	Ratio	Angle	Status	Ang. Min.	Ang. Max.
61816	61716	0	0.06698	0	200	0.974	0	1	-180	180
61816	61716	0	0.06698	0	200	0.974	0	1	-180	180
61816	61716	0	0.06698	0	200	0.974	0	1	-180	180
61727	65040	0	0.06656	0	195.3	1	30	1	-180	180
61727	65041	0	0.1014	0	128.2	1	30	1	-180	180
61727	65042	0	0.10943	0	118.8	1	30	1	-180	180
61827	61727	0	0.055	0	300	0.988	0	1	-180	180
61827	61727	0	0.055	0	300	0.988	0	1	-180	180
61827	61727	0	0.055	0	300	0.988	0	1	-180	180
61927	61827	0	0.01867	0	1000	0.948	0	1	-180	180
61927	61827	0	0.01874	0	1000	0.948	0	1	-180	180
61927	61827	0	0.01874	0	1000	0.948	0	1	-180	180
64805	64027	0	0.024	0	500	1.025	30	1	-180	180
64901	64031	0	0.01605	0	810	1.05	-30	1	-180	180
64901	64032	0	0.01605	0	810	1.05	-30	1	-180	180
71803	71001	0	0.04	0	300	1.05	30	1	-180	180
71708	71021	0	0.4108	0	21	1.05	30	1	-180	180
71923	71031	0	0.0151	0	860	1.025	30	1	-180	180
71923	71032	0	0.0151	0	860	1.025	30	1	-180	180
71823	71041	0	0.0444	0	270	1.025	30	1	-180	180
71823	71042	0	0.0444	0	270	1.025	30	1	-180	180
71823	71043	0	0.0387	0	310	1.025	30	1	-180	180
71823	71044	0	0.0444	0	270	1.025	30	1	-180	180
71823	71045	0	0.0444	0	270	1.025	30	1	-180	180
71823	71046	0	0.0387	0	310	1.025	30	1	-180	180
71923	71047	0	0.0444	0	270	1.025	30	1	-180	180
71923	71048	0	0.0444	0	270	1.025	30	1	-180	180
71923	71049	0	0.0387	0	310	1.025	30	1	-180	180
71802	71702	0	0.06958	0	200	0.927	0	1	-180	180
71803	71703	0	0.062	0	200	0.988	0	1	-180	180
71803	71703	0	0.062	0	200	0.988	0	1	-180	180
71807	71707	0	0.065	0	200	0.925	0	1	-180	180
71807	71707	0	0.065	0	200	0.925	0	1	-180	180
71817	71717	0	0.123	0	100	0.988	0	1	-180	180
71817	71717	0	0.123	0	100	0.988	0	1	-180	180
71821	71721	0	0.06191	0	200	0.975	0	1	-180	180
71821	71721	0	0.0652	0	200	0.975	0	1	-180	180
71821	71721	0	0.06191	0	200	0.975	0	1	-180	180
71721	75001	0	0.06667	0	150	1	30	1	-180	180
71721	75002	0	0.06667	0	150	1	30	1	-180	180
71721	75003	0	0.06667	0	150	1	30	1	-180	180
71824	71724	0	0.06587	0	200	0.927	0	1	-180	180
71824	71724	0	0.06421	0	200	0.927	0	1	-180	180
71824	71724	0	0.06587	0	200	0.927	0	1	-180	180
71824	71724	0	0.06476	0	200	0.927	0	1	-180	180
71904	71804	0	0.01666	0	1000	1	0	1	-180	180
71923	71853	0	0.02867	0	750	0.95	0	1	-180	180
71923	71853	0	0.02867	0	750	0.95	0	1	-180	180
71923	74013	0	0.04332	0	346	1.04	30	1	-180	180
71923	74016	0	0.04332	0	346	1.04	30	1	-180	180
71923	74011	0	0.04696	0	309	1.04	30	1	-180	180
71923	74012	0	0.04696	0	309	1.04	30	1	-180	180
71923	74014	0	0.04696	0	309	1.04	30	1	-180	180
71923	74015	0	0.04696	0	309	1.04	30	1	-180	180
74802	74001	0	0.03292	0	322	1.05	30	1	-180	180
74802	74002	0	0.03292	0	322	1.05	30	1	-180	180
74802	74003	0	0.03264	0	322	1.05	30	1	-180	180

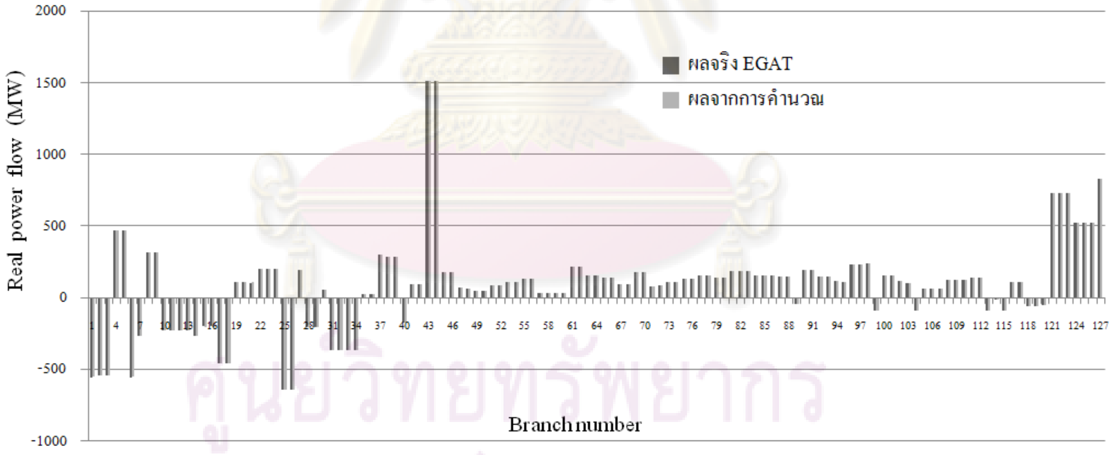
ภาคผนวก ข

ผลการสอบเทียบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และขนาดกระแสลัดวงจร แบบ 3 เฟสสมดุล

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการตรวจสอบผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และผลการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลกับ กฟผ. เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้ผลการทดสอบในกรณีที่ทดสอบกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริงของเขตกรุงเทพและปริมณฑล

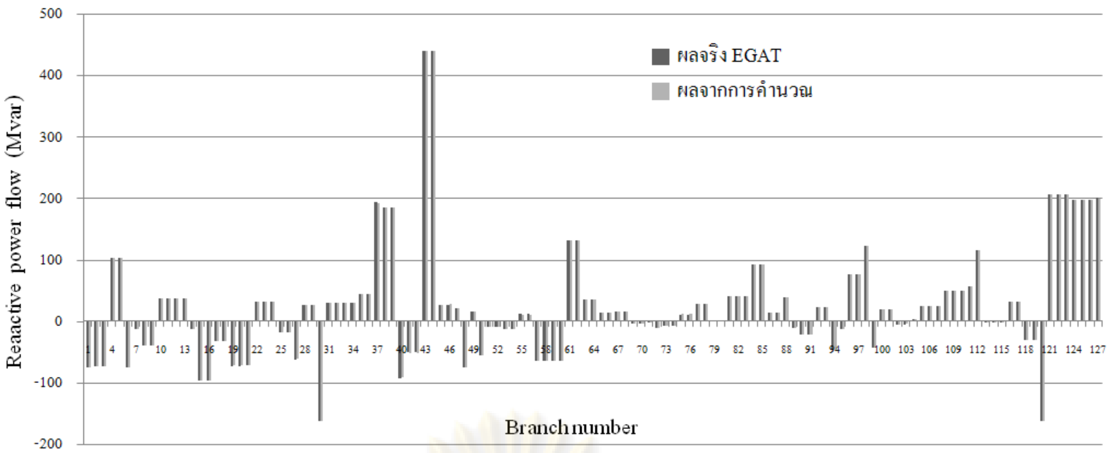
ในส่วนของการคำนวณกระแสลัดวง ในกรณีทดสอบนี้ได้เพิ่มการพิจารณาผลของโหลดเข้ามาในกระบวนการคำนวณกระแสลัดวงจร นอกเหนือจากการพิจารณา Sub transient impedance ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งได้พิจารณาในการทดสอบกับระบบทดสอบ RTS-79

สำหรับผลการคำนวณเปรียบเทียบในกรณีฐาน คือ ไม่มีการแบ่งแยกบัสในระบบ ผลการคำนวณเปรียบเทียบการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และค่ากระแสลัดวงแบบสามเฟสสมดุลในพื้นที่เขตกรุงเทพและปริมณฑล แสดงดังรูปที่ ข.1 ถึง ข.3 ตามลำดับ

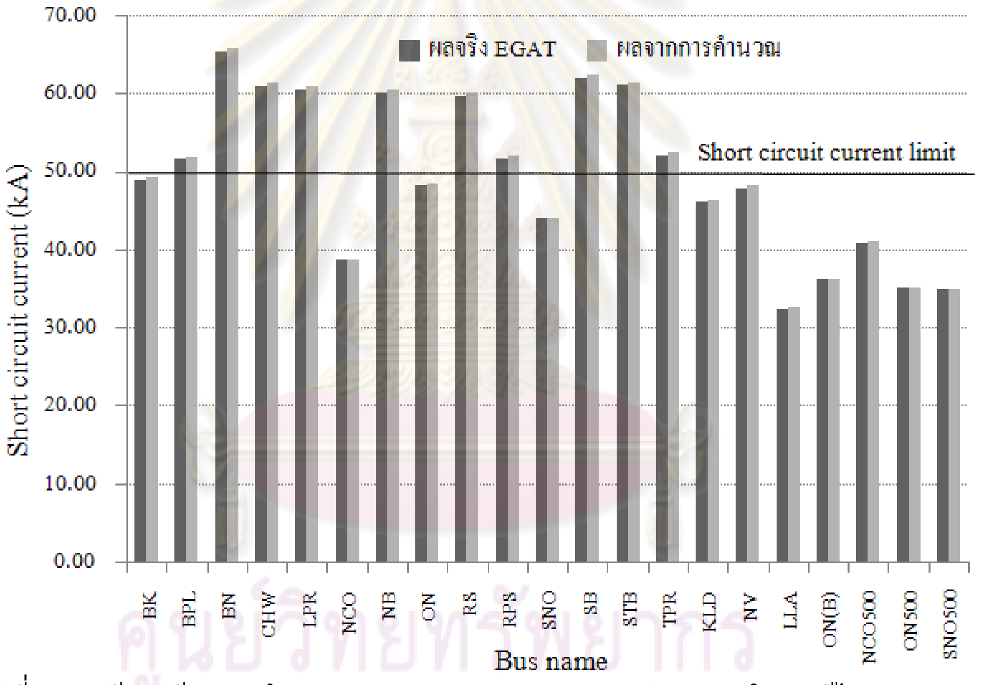


รูปที่ ข.1 เปรียบเทียบผลคำนวณกำลังไฟฟ้าจริง ในกรณีไม่แบ่งแยกบัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

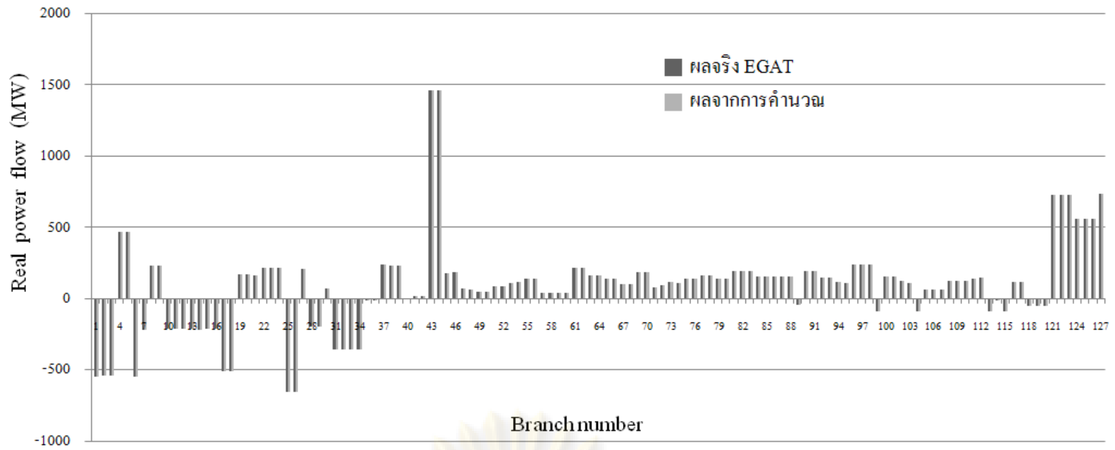


รูปที่ ข.2 เปรียบเทียบผลคำนวณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในกรณีไม่แบ่งแยกบัส

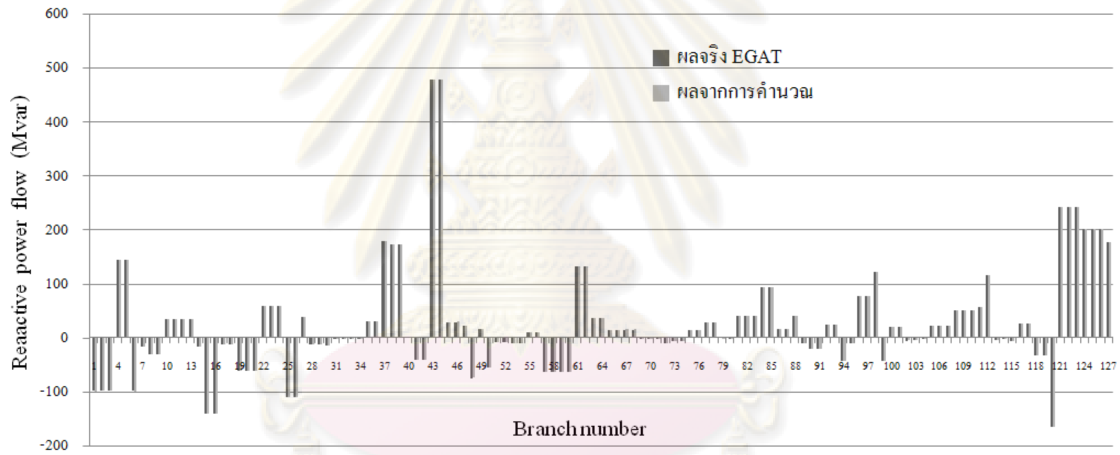


รูปที่ ข.3 เปรียบเทียบผลคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล ในกรณีไม่แบ่งแยกบัส

เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการคำนวณในกรณีที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบของระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณในกรณีแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และพระนครใต้ ซึ่งเป็นรูปแบบการแบ่งแยกบัสที่ กฟผ. ใช้ในการแบ่งแยกเพื่อแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูง โดยผลการคำนวณเปรียบเทียบการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และค่ากระแสลัดวงแบบสามเฟสสมดุลในพื้นที่เขตกรุงเทพและปริมณฑล แสดงดังรูปที่ ข.4 ถึง ข.6 ตามลำดับ

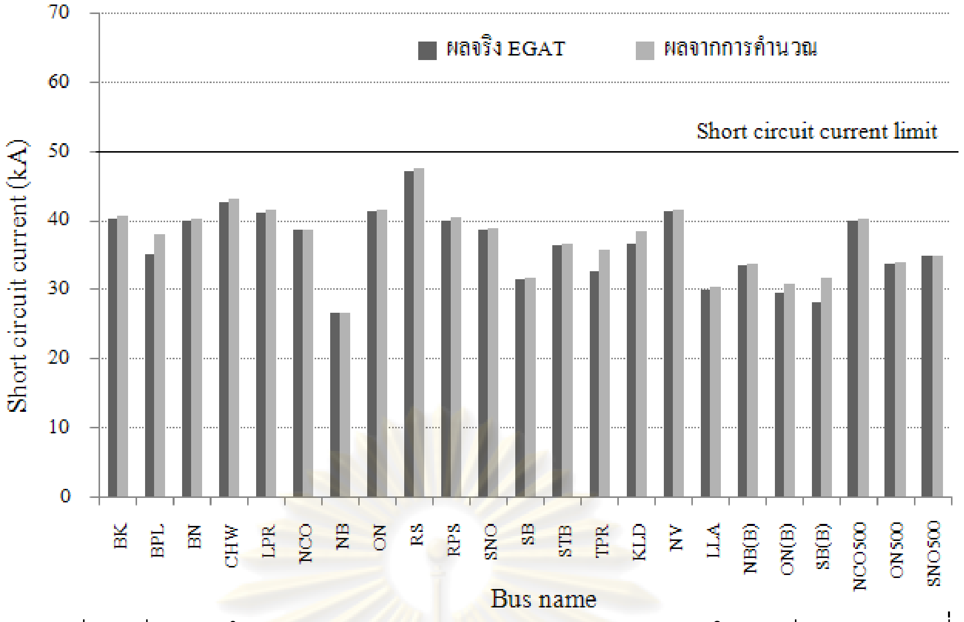


รูปที่ ข.4 เปรียบเทียบผลคำนวณกำลังไฟฟ้าจริง ในกรณีแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และพระนครใต้



รูปที่ ข.5 เปรียบเทียบผลคำนวณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในกรณีแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และพระนครใต้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.6 เปรียบเทียบผลคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล ในกรณีแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และพระนครใต้

จากการเปรียบเทียบผลทั้ง 2 กรณี สามารถสรุปค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณได้ดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 สรุปผลความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบผลการคำนวณกับ กฟผ.

กรณีทดสอบ	Error of calculation					
	P (MW)	Q (Mvar)	Vmag (%)	Vang (%)	Isc_{max} (kA)	Isc_{mean} (kA)
ไม่แบ่งแยกบัส	0.95	0.51	0.016	0.08	0.53	0.28
แบ่งแยกบัสที่ NB, SB	0.14	0.25	0.028	0.73	3.08	0.76

จากตารางที่ ข.1 จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของทั้ง 2 กรณีมีค่าไม่เกิน 1 MW ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ส่วนผลการสอบเทียบผลของแรงดันอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมาก และผลการสอบเทียบค่ากระแสลัดวงจรมีค่ามากกว่าค่าจริงของ กฟผ. เล็กน้อย ซึ่งการนำไปประยุกต์ใช้ทางปฏิบัติ ค่ากระแสลัดวงจรที่มีค่ามากกว่าค่าจริงถือเป็นระยะปลอดภัยจากค่าพิกัดสำหรับการพิจารณาวางแผนด้วย

ภาคผนวก ค

ผลการคำนวณทุกรอบโปรแกรมหาค่าเหมาะสม

เนื้อหาในภาคผนวก ค จะนำเสนอผลการคำนวณทุกรอบในการหาคำตอบที่เหมาะสมในแต่ละกรณีการทดสอบ เพื่อแสดงให้เห็นทิศทางในการค้นหาคำตอบของวิธีค้นหาตาบูแบบปรับตัวได้ โดยเนื้อหาในส่วนนี้จะขอยกตัวอย่างการคำนวณของทุกรอบการค้นหาในกรณีต่อไปนี้

ค.1 ผลการคำนวณทุกรอบของการทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE RTS-79 ในกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง CLR

จากที่ได้นำเสนอรายละเอียดของการทดสอบในหัวข้อ 5.1.3 ดังนั้นในเนื้อหาส่วนนี้จะนำเสนอผลการคำนวณทุกรอบในการหาคำตอบที่เหมาะสม โดยการทดสอบนี้เลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 500 คำตอบและค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดเท่ากับ 200 รอบ ซึ่งผลของการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ของแต่ละรอบของการคำนวณ แสดงดังตาราง ค.1

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส ร่วมกับการติดตั้ง CLR

Ite.	X1	X2	X3	C1	C2	C3	Point	Local
1	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
2	13	15	23	0.006	0.067	0.011	530011.9	
3	13	15	19	0.007	0.064	0.01	530012.35	
4	13	15	23	0.006	0.061	0.01	530012.99	
5	13	15	23	0.006	0.058	0.006	530014.29	
6	13	15	20	0.009	0.056	0.002	530014.93	
7	0	13	15	0	0.055	0.099	540006.49	
8	0	13	15	0	0.051	Inf.	540019.61	
9	0	13	15	0	0.048	Inf.	540020.83	
10	0	13	15	0	0.047	Inf.	540021.28	
11	0	13	15	0	0.047	Inf.	540021.28	*Local1*
12	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
13	13	15	17	0.012	0.065	0.009	530011.63	
14	13	15	19	0.008	0.062	0.005	530013.33	
15	13	15	19	0.007	0.061	0.002	530014.29	
16	0	13	15	0	0.059	Inf.	540016.95	
17	0	13	15	0	0.059	Inf.	540016.95	*Local2*
18	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
19	13	15	23	0.009	0.067	0.01	530011.63	
20	13	15	19	0.009	0.063	0.008	530012.5	
21	13	15	20	0.011	0.059	0.005	530013.33	
22	13	15	23	0.007	0.057	0.002	530015.15	
23	0	13	15	0	0.055	Inf.	540018.18	
24	0	13	15	0	0.055	Inf.	540018.18	*Local3*
25	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
26	13	15	23	0.01	0.065	0.01	530011.76	
27	13	15	23	0.007	0.062	0.007	530013.16	
28	13	15	20	0.011	0.058	0.003	530013.89	
29	0	13	15	0	0.056	0.1	540006.41	
30	0	13	15	0	0.057	Inf.	540017.54	
31	0	13	15	0	0.057	Inf.	540017.54	
32	0	13	15	0	0.056	Inf.	540017.86	
33	0	13	15	0	0.056	Inf.	540017.86	*Local4*
34	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
35	13	15	17	0.007	0.065	0.014	530011.63	
36	13	15	23	0.007	0.061	0.012	530012.5	
37	13	15	23	0.006	0.06	0.01	530013.16	
38	13	15	23	0.008	0.056	0.009	530013.7	
39	13	15	20	0.009	0.052	0.008	530014.49	
40	13	15	20	0.008	0.048	0.005	530016.39	

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส ร่วมกับการติดตั้ง CLR (ต่อ)

Ite.	X1	X2	X3	C1	C2	C3	Point	Local
41	13	15	20	0.007	0.047	0.002	530017.86	
42	3	12	19	0.006	0.046	0.099	430000	
43	0	13	15	0	0.044	Inf.	540022.73	
44	0	13	15	0	0.044	Inf.	540022.73	*Local5*
45	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
46	13	15	20	0.007	0.069	0.011	530011.49	
47	13	15	23	0.006	0.066	0.008	530012.5	
48	13	15	23	0.006	0.063	0.006	530013.33	
49	13	15	20	0.008	0.062	0.002	530013.89	
50	0	13	15	0	0.06	Inf.	540016.67	
51	0	13	15	0	0.06	Inf.	540016.67	*Local6*
52	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
53	13	15	17	0.009	0.067	0.01	530011.63	
54	13	15	20	0.011	0.063	0.008	530012.2	
55	13	15	17	0.015	0.059	0.007	530012.35	
56	13	15	23	0.013	0.055	0.007	530013.33	
57	13	15	19	0.009	0.054	0.003	530015.15	
58	0	13	15	0	0.05	Inf.	540020	
59	0	13	15	0	0.05	Inf.	540020	*Local7*
60	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
61	13	15	20	0.007	0.067	0.009	530012.05	
62	13	15	20	0.007	0.065	0.006	530012.82	
63	13	15	20	0.007	0.061	0.002	530014.29	
64	0	0	22	0	0	0.006	450000	
65	13	15	20	0.098	Inf.	0.004	530009.8	
66	13	15	19	0.096	Inf.	0.002	530010.2	
67	0	13	15	0	0.098	Inf.	540010.2	
68	0	13	15	0	0.098	Inf.	540010.2	
69	0	13	15	0	0.094	Inf.	540010.64	
70	0	13	15	0	0.094	Inf.	540010.64	
71	0	13	15	0	0.09	Inf.	540011.11	
72	0	13	15	0	0.09	Inf.	540011.11	
73	0	13	15	0	0.086	Inf.	540011.63	
74	0	13	15	0	0.083	Inf.	540012.05	
75	0	13	15	0	0.083	Inf.	540012.05	*Local8*
76	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
77	13	15	23	0.007	0.069	0.009	530011.76	
78	13	15	23	0.007	0.069	0.009	530011.76	
79	13	15	20	0.009	0.065	0.005	530012.66	
80	13	15	23	0.007	0.062	0.001	530014.29	
81	0	13	15	0	0.061	Inf.	540016.39	
82	0	13	15	0	0.061	Inf.	540016.39	
83	10	11	17	0.099	0.058	0.097	130000	
84	0	0	0	0	0	0	460000	
85	4	13	15	Inf.	0.098	Inf.	530010.2	
86	2	3	20	0.002	0.097	Inf.	130000	
87	12	13	19	0	0	0	430000	
88	0	13	15	0	0.096	Inf.	540010.42	
89	0	13	15	0	0.095	Inf.	540010.53	
90	0	13	15	0	0.095	Inf.	540010.53	
91	0	13	15	0	0.093	Inf.	540010.75	
92	0	13	15	0	0.093	Inf.	540010.75	
93	0	13	15	0	0.091	Inf.	540010.99	
94	0	13	15	0	0.088	Inf.	540011.36	
95	0	13	15	0	0.088	Inf.	540011.36	*Local9*
96	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
97	13	15	20	0.009	0.065	0.012	530011.63	
98	13	15	19	0.008	0.063	0.008	530012.66	
99	13	15	20	0.008	0.06	0.008	530013.16	
100	13	15	23	0.006	0.056	0.006	530014.71	
101	13	15	19	0.007	0.052	0.006	530015.38	
102	13	15	19	0.008	0.049	0.004	530016.39	
103	9	13	15	0.006	0.047	Inf.	530018.87	
104	0	13	15	0	0.046	Inf.	540021.74	
105	0	13	15	0	0.046	Inf.	540021.74	*Local10*
106	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
107	13	15	20	0.008	0.065	0.009	530012.2	
108	13	15	20	0.008	0.062	0.005	530013.33	
109	13	15	23	0.007	0.06	0.002	530014.49	
110	0	13	15	0	0.063	0.099	540006.17	
111	0	13	15	0	0.062	0.095	540006.37	
112	0	13	15	0	0.062	0.091	540006.54	
113	0	13	15	0	0.058	0.087	540006.9	
114	0	13	15	0	0.054	0.084	540007.25	
115	0	13	15	0	0.053	0.084	540007.3	
116	0	13	15	0	0.05	0.08	540007.69	
117	0	13	15	0	0.047	0.079	540007.94	
118	0	13	15	0	0.046	0.078	540008.06	
119	0	13	15	0	0.043	0.077	540008.33	
120	0	13	15	0	0.041	0.074	540008.7	

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส ร่วมกับการติดตั้ง CLR (ต่อ)

Ite.	X1	X2	X3	C1	C2	C3	Point	Local
121	0	13	15	0	0.039	0.072	540009.01	
122	0	13	15	0	0.036	0.069	540009.52	
123	0	13	15	0	0.032	0.07	540009.8	
124	0	13	15	0	0.03	0.068	540010.2	
125	0	13	15	0	0.027	0.067	540010.64	
126	0	13	15	0	0.023	0.065	540011.36	
127	0	13	15	0	0.022	0.062	540011.9	
128	0	13	15	0	0.023	0.061	540011.9	
129	0	13	15	0	0.022	0.061	540012.05	
130	0	13	15	0	0.024	0.057	540012.35	
131	0	13	15	0	0.025	0.054	540012.66	
132	0	13	15	0	0.026	0.052	540012.82	
133	0	13	15	0	0.024	0.053	540012.99	
134	0	13	15	0	0.025	0.052	540012.99	
135	0	13	15	0	0.025	0.052	540012.99	*Local11*
136	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
137	13	15	23	0.006	0.067	0.014	530011.49	
138	13	15	19	0.008	0.064	0.011	530012.05	
139	13	15	20	0.008	0.061	0.01	530012.66	
140	13	15	20	0.007	0.058	0.008	530013.7	
141	13	15	23	0.007	0.058	0.006	530014.08	
142	13	15	20	0.008	0.055	0.002	530015.38	
143	4	13	15	0.005	0.051	Inf.	530017.86	
144	4	5	20	0.004	0.052	0.003	430000	
145	0	13	15	0	0.057	0.1	540006.37	
146	0	13	15	0	0.059	0.097	540006.41	
147	8	13	22	0.003	0.058	0.094	430000	
148	0	13	15	0	0.053	0.091	540006.94	
149	0	13	15	0	0.055	0.089	540006.94	
150	0	13	15	0	0.053	0.09	540006.99	
151	0	13	15	0	0.052	0.087	540007.19	
152	0	13	15	0	0.053	0.083	540007.35	
153	3	10	12	0.002	0.05	0.087	430000	
154	0	13	15	0	0.047	0.084	540007.63	
155	0	13	15	0	0.045	0.082	540007.87	
156	0	13	15	0	0.042	0.085	540007.87	
157	0	13	15	0	0.04	0.081	540008.26	
158	0	13	15	0	0.038	0.078	540008.62	
159	0	13	15	0	0.036	0.076	540008.93	
160	0	13	15	0	0.032	0.074	540009.43	

Ite.	X1	X2	X3	C1	C2	C3	Point	Local
161	0	13	15	0	0.028	0.073	540009.9	
162	0	13	15	0	0.025	0.071	540010.42	
163	0	13	15	0	0.025	0.067	540010.87	
164	0	13	15	0	0.023	0.063	540011.63	
165	0	13	15	0	0.024	0.059	540012.05	
166	0	13	15	0	0.023	0.055	540012.82	
167	0	13	15	0	0.024	0.054	540012.82	
168	0	13	15	0	0.026	0.05	540013.16	
169	0	13	15	0	0.026	0.047	540013.7	
170	0	13	15	0	0.028	0.044	540013.89	
171	0	13	15	0	0.027	0.044	540014.08	
172	0	13	15	0	0.027	0.044	540014.08	
173	0	13	15	0	0.029	0.04	540014.49	
174	0	13	15	0	0.029	0.04	540014.49	
175	0	13	15	0	0.032	0.037	540014.49	
176	0	13	15	0	0.032	0.037	540014.49	*Local12*
177	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
178	13	15	19	0.011	0.066	0.009	530011.63	
179	13	15	20	0.007	0.066	0.005	530012.82	
180	13	15	19	0.008	0.062	0.003	530013.7	
181	0	13	15	0	0.065	Inf.	540015.38	
182	0	13	15	0	0.062	Inf.	540016.13	
183	0	13	15	0	0.058	Inf.	540017.24	
184	0	13	15	0	0.054	Inf.	540018.52	
185	0	13	15	0	0.054	Inf.	540018.52	
186	0	13	15	0	0.053	Inf.	540018.87	
187	0	13	15	0	0.053	Inf.	540018.87	
188	2	13	15	0.004	0.056	0.098	530006.33	
189	2	3	20	0.008	0.058	0.098	130000	
190	13	15	20	0	0	0	430000	
191	0	13	15	0	0.1	0.097	540005.08	
192	0	13	15	0	Inf.	0.097	540010.31	
193	0	13	15	0	Inf.	Inf.	542000	
194	0	13	15	0	Inf.	Inf.	542000	*Local13*
195	12	13	22	0.01	0.07	0.014	430000	
196	13	15	20	0.007	0.068	0.011	530011.63	
197	13	15	23	0.006	0.069	0.008	530012.05	
198	13	15	23	0.006	0.068	0.006	530012.5	
199	13	15	19	0.009	0.064	0.002	530013.33	
200	0	13	15	0	0.065	0.099	540006.1	

ค.2 ผลการคำนวณทุกรอบของการทดสอบกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริงของ กฟผ. ในกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

จากที่ได้นำเสนอรายละเอียดของการทดสอบในหัวข้อ 5.2.1.1.3 ดังนั้นในเนื้อหาส่วนนี้จะนำเสนอผลการคำนวณทุกรอบในการหาคำตอบที่เหมาะสม โดยการทดสอบนี้เลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 200 คำตอบและค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดเท่ากับ 200 รอบ ซึ่งผลของการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ของแต่ละรอบของการคำนวณ แสดงดังตาราง ค.2

ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

Ite.	X1	X2	X3	Point	Local
1	11839	11909	11803	330000	
2	11815	11819	11808	530000	
3	11815	11819	11808	530000	
4	11815	11816	11808	530000	
5	11820	11813	11808	530000	
6	11820	11815	11808	530000	
7	11819	11812	11809	130000	
8	11819	11813	11808	530000	
9	11814	11815	11808	530000	
10	11819	11815	11808	530000	
11	11815	11814	11806	430000	
12	11815	11810	11808	530000	
13	11815	11807	11808	530000	
14	11813	11804	11808	530000	
15	11813	11808	11804	530000	
16	11813	11808	11802	530000	
17	11813	11808	0	540000	
18	11813	11808	0	540000	*Local1*
19	11839	11909	11803	330000	
20	11815	0	11808	540000	
21	11815	0	11808	540000	*Local2*
22	11839	11909	11803	330000	
23	11816	0	0	450000	
24	11816	0	0	450000	*Local3*
25	11839	11909	11803	330000	
26	0	0	0	460000	
27	0	0	0	460000	*Local4*
28	11839	11909	11803	330000	
29	11815	0	0	450000	
30	11812	11909	0	140000	
31	11808	0	0	450000	
32	11809	0	0	450000	
33	11804	0	0	450000	
34	11801	11912	11839	130000	
35	11801	11802	11820	430000	
36	0	11807	11815	440000	
37	0	11808	11815	540000	
38	0	11808	11815	540000	*Local5*
39	11839	11909	11803	330000	
40	11815	11839	11808	530000	

ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (ต่อ)

Ite.	X1	X2	X3	Point	Local
41	11813	11819	11808	530000	
42	11811	11820	11809	230000	
43	11814	11813	11804	430000	
44	11812	11811	11807	130000	
45	11808	11815	11809	530000	
46	11809	11815	11808	530000	
47	11808	11813	11807	530000	
48	11808	11813	11809	530000	
49	11804	11815	11808	530000	
50	11808	11813	11806	530000	
51	11804	11813	11808	530000	
52	11804	11813	11808	530000	
53	11806	11815	11808	530000	
54	11806	11813	11808	530000	
55	11802	11814	11807	430000	
56	11801	11813	11808	530000	
57	11802	11815	11808	530000	
58	0	11815	11808	540000	
59	0	11815	11808	540000	
60	0	11813	11808	540000	
61	11802	11816	11810	430000	
62	11909	11813	11812	130000	
63	11839	11814	11812	130000	
64	11816	11814	11812	130000	
65	11816	11813	11808	530000	
66	11813	11814	11808	530000	
67	11810	11815	11808	530000	
68	11808	11813	11804	530000	
69	11811	11812	11806	130000	
70	11808	11815	0	540000	
71	11808	11815	0	540000	
72	11808	11813	0	540000	
73	11808	11813	0	540000	*Local6*
74	11839	11909	11803	330000	
75	11815	11801	11808	530000	
76	11813	0	11808	540000	
77	11813	0	11808	540000	*Local7*
78	11839	11909	11803	330000	
79	0	11909	11807	440000	
80	0	0	11802	450000	
81	11804	11839	11909	330000	
82	11808	11815	11819	530000	
83	11808	11815	11816	530000	
84	11808	11813	11816	530000	
85	11808	11816	11813	530000	
86	11808	11816	11813	530000	
87	11808	11820	11813	530000	
88	11808	11839	11815	530000	
89	11808	11819	11813	530000	
90	11808	11819	11813	530000	
91	11808	11814	11813	530000	
92	11808	11815	11814	530000	
93	11808	11814	11815	530000	
94	11808	11813	11814	530000	
95	11808	11810	11812	230000	
96	11808	11806	11813	530000	
97	11807	11808	11815	530000	
98	11808	11809	11815	530000	
99	11804	11808	11813	530000	
100	11808	11809	11813	530000	
101	11807	11808	11813	530000	
102	11809	11808	11813	530000	
103	11808	11810	11813	530000	
104	11807	11812	11816	130000	
105	11812	11815	11813	130000	
106	11810	11813	11815	130000	
107	11810	11808	11815	530000	
108	11809	11808	11812	230000	
109	11813	11808	11810	530000	
110	11813	11810	11808	530000	
111	11815	11808	11809	530000	
112	11815	11804	11808	530000	
113	11815	11808	11804	530000	
114	11815	11806	11808	530000	
115	11813	11802	11808	530000	
116	11814	11912	11804	130000	
117	11819	0	0	450000	
118	11814	11802	11801	430000	
119	11813	11803	11804	330000	
120	11808	0	11801	440000	

ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัส โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (ต่อ)

Ite.	X1	X2	X3	Point	Local
121	11810	0	0	450000	
122	11808	11801	11803	330000	
123	11812	11804	11801	130000	
124	11815	11808	11909	530000	
125	11814	11811	11839	130000	
126	11814	11816	11839	330000	
127	11809	11909	0	440000	
128	11806	0	0	450000	
129	11806	11839	11803	330000	
130	11806	11912	0	140000	
131	11808	11819	0	440000	
132	11808	11819	11907	130000	
133	11808	11813	11801	530000	
134	11809	11816	0	440000	
135	11809	11813	11802	430000	
136	11808	11815	11802	530000	
137	11808	11815	11801	530000	
138	11806	11815	11803	330000	
139	11811	11820	11802	230000	
140	11815	11814	11808	530000	
141	11813	11812	11806	130000	
142	11815	11808	0	540000	
143	11815	11808	0	540000	*Local8*
144	11839	11909	11803	330000	
145	0	0	11801	450000	
146	11909	0	11801	440000	
147	0	0	11909	450000	
148	11912	11909	11839	130000	
149	0	11819	11816	440000	
150	0	11813	11815	440000	
151	0	11815	11839	440000	
152	0	11814	0	450000	
153	0	11814	0	450000	
154	0	11815	0	450000	
155	0	11819	0	450000	
156	11801	11813	11907	130000	
157	11802	11808	11815	530000	
158	11802	11808	11820	430000	
159	11806	11808	11815	530000	
160	11806	11804	11816	430000	
161	11804	11809	11815	430000	
162	11801	11804	11819	430000	
163	11804	11808	11815	530000	
164	11801	11807	11820	430000	
165	11907	11810	11819	130000	
166	11909	11809	11907	130000	
167	11816	11808	11815	530000	
168	11839	11808	11815	530000	
169	11819	11808	11815	530000	
170	11820	11808	11815	530000	
171	11909	11808	11815	530000	
172	0	11808	11813	540000	
173	11802	11807	11811	230000	
174	11808	11802	11813	530000	
175	11808	0	11815	540000	
176	11808	0	11815	540000	*Local9*
177	11839	11909	11803	330000	
178	11801	11907	0	140000	
179	0	0	11806	450000	
180	0	0	11806	450000	
181	0	0	11804	450000	
182	11802	11801	11809	430000	
183	0	0	11809	450000	
184	0	0	11813	450000	
185	0	0	11813	450000	
186	11804	0	11809	440000	
187	0	0	11807	450000	
188	0	0	11807	450000	*Local10*
189	11839	11909	11803	330000	
190	0	11909	0	450000	
191	0	11820	0	450000	
192	11804	11814	11802	430000	
193	11808	11812	11802	230000	
194	11808	11811	11806	230000	
195	11813	11809	11808	530000	
196	11815	11812	11811	130000	
197	11814	11816	11810	430000	
198	11814	11816	11807	430000	
199	11810	11820	11807	430000	
200	11810	11820	11804	430000	

ค.3 ผลการคำนวณทุกรอบของการทดสอบกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริงของ กฟผ. ในกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

จากที่ได้นำเสนอรายละเอียดของการทดสอบในหัวข้อ 5.2.2.2 ดังนั้นในเนื้อหาส่วนนี้จะนำเสนอผลการคำนวณทุกรอบในการหาคำตอบที่เหมาะสม โดยการทดสอบนี้เลือกใช้ค่าจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง เท่ากับ 950 คำตอบและค่าจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด เท่ากับ 400 รอบ ซึ่งผลของการค้นหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งแยก หรือติดตั้ง CLR ของแต่ละรอบของการคำนวณ แสดงดังตาราง ค.3

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ

Ite.	X1	X2	X3	C1	C2	C3	Point	Local
1	11808	11815	11820	0.096	0.055	0.014	500006.061	
2	11808	11815	11816	0.093	0.052	0.011	600006.41	
3	11808	11815	11816	0.09	0.049	0.008	600006.803	
4	11808	11815	11820	0.087	0.046	0.006	600007.194	
5	11808	11815	11820	0.084	0.043	0.003	600007.692	
6	11808	11815	11909	0.081	0.042	0.001	600008.065	
7	11808	11815	11909	0.078	0.045	0.001	600008.065	
8	11808	11815	11820	0.075	0.045	0.002	600008.197	
9	11808	11815	11820	0.072	0.047	0.001	600008.333	
10	11808	11815	11820	0.069	0.049	0.001	600008.403	
11	11808	11815	11819	0.069	0.049	0.001	600008.403	
12	11808	11815	11909	0.066	0.052	0.001	600008.403	
13	11808	11815	11819	0.065	0.053	0.001	600008.403	
14	11808	11815	11820	0.063	0.055	0.001	600008.403	
15	11808	11815	11819	0.062	0.056	0.001	600008.403	
16	11808	11815	11819	0.064	0.054	0.001	600008.403	
17	11808	11815	11819	0.063	0.055	0.001	600008.403	
18	11808	11815	11816	0.066	0.052	0.001	600008.403	
19	11808	11815	11816	0.066	0.052	0.001	600008.403	
20	11808	11815	11820	0.065	0.055	0.1	500004.545	
21	11808	11815	11816	0.062	0.056	0.001	600008.403	
22	11808	11815	11816	0.064	0.054	0.001	600008.403	
23	11808	11815	11820	0.065	0.053	0.001	600008.403	
24	11808	11815	11816	0.068	0.05	0.098	600004.63	
25	11808	11815	11816	0.068	0.05	0.001	600008.403	
26	11808	11815	11820	0.067	0.051	0.001	600008.403	
27	11808	11815	11820	0.065	0.053	0.098	500004.63	
28	11808	11815	11820	0.068	0.05	0.001	600008.403	
29	11808	11815	11816	0.065	0.053	0.001	600008.403	
30	11808	11813	11907	0.068	0.051	0.1	100000	
31	11808	11813	11814	0.063	0.046	0.001	600009.091	
32	11808	11813	11814	0.061	0.043	0.001	600009.524	
33	11808	11813	11814	0.058	0.041	0.001	600010	
34	11808	11813	11815	0.055	0.038	0.001	600010.638	
35	11808	11813	11820	0.052	0.035	0.001	600011.364	
36	11808	11813	11820	0.049	0.032	0.001	600012.195	
37	11808	11813	11820	0.047	0.029	0.001	600012.987	
38	11808	11813	11820	0.045	0.026	0.001	600013.889	
39	11808	11813	11820	0.042	0.023	0.003	600014.706	
40	11808	11813	11820	0.039	0.02	0.002	600016.393	
41	11808	11813	11820	0.038	0.017	0.003	600017.241	
42	11808	11813	11820	0.037	0.015	0.003	600018.182	
43	11808	11813	11820	0.035	0.016	0.003	600018.519	
44	11808	11813	11820	0.033	0.017	0.004	600018.519	
45	11808	11813	11820	0.031	0.017	0.005	600018.868	
46	11808	11813	11820	0.028	0.019	0.006	600018.868	
47	11808	11813	11820	0.027	0.022	0.004	400000	
48	11808	11813	11907	0.026	0.019	0.007	400000	
49	11808	11813	11820	0.027	0.019	0.007	600018.868	
50	11808	11813	11814	0.026	0.017	0.005	400000	
51	11808	11813	11820	0.026	0.02	0.007	600018.868	
52	11808	11813	11820	0.025	0.02	0.008	600018.868	
53	11808	11813	11820	0.024	0.021	0.008	600018.868	
54	11808	11813	11820	0.024	0.021	0.008	600018.868	
55	11808	11813	11907	0.026	0.024	0.01	500016.667	
56	11808	11815	11816	0.026	0.023	0.007	400000	
57	11808	11813	11820	0.023	0.022	0.009	600018.519	
58	11808	11813	11820	0.024	0.025	0.006	400000	
59	11808	11813	11820	0.026	0.021	0.007	600018.519	
60	11808	11813	11907	0.025	0.024	0.004	400000	

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (ต่อ)

Ite.	X1	X2	X3	C1	C2	C3	Point	Local
61	11808	11813	11820	0.026	0.02	0.008	600018.519	
62	11808	11814	11815	0.028	0.02	0.009	400000	
63	11808	11815	11907	0.03	0.018	0.006	400000	
64	11808	11815	11909	0.032	0.018	0.009	400000	
65	11808	11815	11820	0.032	0.017	0.011	400000	
66	11808	11815	11819	0.036	0.014	0.007	400000	
67	11808	11813	11907	0.033	0.017	0.004	500018.519	
68	11808	11813	11815	0.035	0.017	0.002	400000	
69	11808	11813	11820	0.034	0.018	0.004	600017.857	
70	11808	11813	11820	0.032	0.017	0.004	600018.868	
71	11808	11813	11820	0.029	0.018	0.001	400000	
72	11808	11813	11820	0.031	0.019	0.005	600018.182	
73	11808	11813	11907	0.031	0.018	0.007	500017.857	
74	11808	11813	11815	0.033	0.021	0.006	400000	
75	11808	11813	11820	0.032	0.018	0.004	600018.519	
76	11808	11813	11820	0.032	0.018	0.004	600018.519	
77	11808	11813	11819	0.035	0.015	0.003	400000	
78	11808	11812	11813	0.037	0.019	0.003	400000	
79	11808	11813	11815	0.041	0.015	0.099	600006.452	
80	11808	11813	11820	0.039	0.015	0.002	600017.857	
81	11808	11813	11820	0.036	0.017	0.003	600017.857	
82	11808	11813	11820	0.035	0.017	0.003	600018.182	
83	11808	11813	11820	0.034	0.016	0.005	600018.182	
84	11808	11813	11820	0.031	0.018	0.005	600018.519	
85	11808	11813	11820	0.031	0.017	0.004	400000	
86	11808	11814	11815	0.029	0.014	0.006	400000	
87	11808	11813	11819	0.03	0.013	0.005	400000	
88	11808	11813	11907	0.03	0.015	0.001	400000	
89	11808	11814	11815	0.029	0.017	0.099	400000	
90	11808	11813	11907	0.028	0.018	0.095	500007.092	
91	11808	11813	11820	0.025	0.021	0.092	500007.246	
92	11808	11813	11820	0.023	0.022	0.089	500007.463	
93	11808	11813	11907	0.022	0.022	0.086	500007.692	
94	11808	11813	11907	0.022	0.022	0.083	500007.874	
95	11808	11813	11820	0.022	0.022	0.08	500008.065	
96	11808	11813	11907	0.021	0.023	0.077	500008.264	
97	11808	11813	11907	0.023	0.022	0.074	500008.403	
98	11808	11813	11820	0.022	0.022	0.071	500008.696	
99	11808	11813	11907	0.022	0.022	0.068	500008.929	
100	11808	11813	11820	0.02	0.024	0.065	500009.174	
101	11808	11813	11820	0.02	0.024	0.062	500009.434	
102	11808	11813	11907	0.022	0.022	0.059	500009.709	
103	11808	11813	11907	0.02	0.024	0.056	500010	

Ite.	X1	X2	X3	C1	C2	C3	Point	Local
104	11808	11813	11907	0.021	0.023	0.053	500010.309	
105	11808	11813	11907	0.02	0.024	0.05	500010.638	
106	11808	11813	11907	0.021	0.023	0.047	500010.989	
107	11808	11813	11820	0.021	0.023	0.044	600011.364	
108	11808	11813	11820	0.024	0.021	0.041	600011.628	
109	11808	11813	11820	0.022	0.023	0.038	600012.048	
110	11808	11813	11820	0.022	0.023	0.035	600012.5	
111	11808	11813	11820	0.019	0.026	0.032	600012.987	
112	11808	11813	11820	0.021	0.024	0.029	600013.514	
113	11808	11813	11820	0.021	0.024	0.026	600014.085	
114	11808	11813	11820	0.019	0.026	0.023	600014.706	
115	11808	11813	11820	0.022	0.023	0.02	600015.385	
116	11808	11813	11820	0.02	0.025	0.017	600016.129	
117	11808	11813	11820	0.019	0.027	0.014	600016.667	
118	11808	11813	11820	0.021	0.024	0.011	600017.857	
119	11808	11814	11815	0.019	0.021	0.009	400000	
120	11808	11813	11820	0.023	0.023	0.009	600018.182	
121	11808	11813	11820	0.025	0.02	0.009	600018.519	
122	11808	11813	11815	0.022	0.022	0.01	400000	
123	11808	11813	11820	0.024	0.021	0.009	600018.519	
124	11808	11813	11815	0.022	0.02	0.009	400000	
125	11808	11813	11820	0.021	0.018	0.006	400000	
126	11808	11815	11816	0.018	0.015	0.007	400000	
127	11808	11813	11912	0.017	0.019	0.007	400000	
128	11808	11814	11815	0.013	0.018	0.011	400000	
129	11808	11815	11816	0.014	0.015	0.008	400000	
130	11808	11813	11907	0.013	0.012	0.011	400000	
131	11808	11813	11814	0.01	0.013	0.015	400000	
132	11808	11813	11820	0.007	0.017	0.012	400000	
133	11808	11815	11816	0.009	0.015	0.016	400000	
134	11808	11815	11907	0.009	0.015	0.018	400000	
135	11808	11815	11819	0.013	0.012	0.017	400000	
136	11808	11815	11820	0.011	0.008	0.015	400000	
137	11808	11815	11820	0.013	0.01	0.016	400000	
138	11808	11815	11820	0.016	0.006	0.019	400000	
139	11808	11815	11907	0.017	0.008	0.019	400000	
140	11808	11815	11816	0.02	0.007	0.023	400000	
141	11808	11815	11816	0.02	0.003	0.023	400000	
142	11808	11813	11820	0.016	0.099	0.019	500007.463	
143	11808	11813	11820	0.017	0.097	0.017	600007.634	
144	11808	11813	11820	0.018	0.094	0.015	600007.874	
145	11808	11813	11820	0.02	0.092	0.012	600008.065	
146	11808	11813	11820	0.023	0.089	0.009	600008.264	

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (ต่อ)

Ite.	X1	X2	X3	C1	C2	C3	Point	Local
147	11808	11813	11820	0.024	0.086	0.008	600008.475	
148	11808	11813	11820	0.021	0.083	0.011	600008.696	
149	11808	11813	11820	0.02	0.08	0.012	600008.929	
150	11808	11813	11820	0.02	0.077	0.012	600009.174	
151	11808	11813	11820	0.022	0.075	0.01	600009.346	
152	11808	11813	11820	0.023	0.072	0.009	600009.615	
153	11808	11813	11820	0.023	0.069	0.009	600009.901	
154	11808	11813	11820	0.022	0.066	0.01	600010.204	
155	11808	11813	11820	0.024	0.063	0.008	600010.526	
156	11808	11813	11820	0.021	0.06	0.011	600010.87	
157	11808	11813	11820	0.022	0.057	0.01	600011.236	
158	11808	11813	11820	0.023	0.054	0.009	600011.628	
159	11808	11813	11820	0.021	0.051	0.011	600012.048	
160	11808	11813	11820	0.019	0.048	0.013	600012.5	
161	11808	11813	11820	0.022	0.045	0.01	600012.987	
162	11808	11813	11820	0.024	0.042	0.008	600013.514	
163	11808	11813	11820	0.024	0.039	0.008	600014.085	
164	11808	11813	11820	0.026	0.036	0.007	600014.493	
165	11808	11813	11820	0.024	0.033	0.008	600015.385	
166	11808	11813	11820	0.021	0.03	0.011	600016.129	
167	11808	11813	11820	0.019	0.027	0.013	600016.949	
168	11808	11813	11907	0.019	0.029	0.01	400000	
169	11808	11813	11820	0.02	0.025	0.012	600017.544	
170	11808	11813	11820	0.023	0.022	0.01	600018.182	
171	11808	11814	11815	0.026	0.023	0.013	400000	
172	11808	11813	11912	0.025	0.025	0.014	100000	
173	11808	11813	11820	0.026	0.021	0.01	600017.544	
174	11808	11813	11820	0.023	0.024	0.008	400000	
175	11808	11813	11815	0.026	0.025	0.009	400000	
176	11808	11813	11907	0.022	0.021	0.013	400000	
177	11808	11815	11819	0.025	0.017	0.017	400000	
178	11808	11813	11907	0.026	0.02	0.014	500016.667	
179	11808	11813	11820	0.023	0.022	0.011	600017.857	
180	11808	11813	11814	0.023	0.02	0.011	400000	
181	11808	11813	11815	0.024	0.024	0.014	400000	
182	11808	11813	11820	0.025	0.02	0.01	600018.182	
183	11808	11813	11820	0.023	0.019	0.009	400000	
184	11808	11813	11820	0.024	0.022	0.008	600018.519	
185	11808	11813	11815	0.025	0.024	0.008	400000	
186	11808	11811	11815	0.024	0.022	0.01	400000	
187	11808	11813	11814	0.025	0.021	0.01	400000	
188	11808	11813	11907	0.029	0.022	0.01	500016.393	
189	11808	11813	11820	0.028	0.019	0.008	600018.182	

Ite.	X1	X2	X3	C1	C2	C3	Point	Local
190	11808	11813	11820	0.029	0.018	0.006	600018.868	
191	11808	11814	11815	0.03	0.021	0.009	400000	
192	11808	11813	11820	0.028	0.02	0.006	600018.519	
193	11808	11813	11819	0.027	0.02	0.007	400000	
194	11808	11813	11907	0.029	0.023	0.007	500016.949	
195	11808	11813	11815	0.028	0.024	0.006	400000	
196	11808	11813	11820	0.026	0.021	0.008	600018.182	
197	11808	11813	11912	0.027	0.024	0.01	100000	
198	11808	11813	11820	0.027	0.02	0.007	600018.519	
199	11808	11813	11820	0.03	0.018	0.005	600018.868	
200	11808	11813	11912	0.03	0.02	0.002	400000	
201	11808	11813	11815	0.029	0.018	0.003	400000	
202	11808	11812	11815	0.029	0.019	0.003	400000	
203	11808	11813	11820	0.029	0.019	0.006	600018.519	
204	11808	11813	11815	0.03	0.019	0.008	400000	
205	11808	11812	11815	0.029	0.015	0.011	400000	
206	11808	11810	11815	0.028	0.019	0.014	400000	
207	11808	11810	11813	0.031	0.017	0.018	500015.152	
208	11808	11810	11813	0.029	0.014	0.018	500016.393	
209	11808	11810	11813	0.027	0.011	0.019	500017.544	
210	11808	11810	11813	0.024	0.009	0.021	500018.519	
211	11808	11810	11813	0.025	0.006	0.02	500019.608	
212	11808	11810	11813	0.023	0.003	0.022	500020.833	
213	11808	11810	11813	0.025	0.003	0.02	500020.833	
214	11808	11810	11813	0.028	0.001	0.019	600020.833	
215	11808	11810	11813	0.029	0.001	0.018	600020.833	
216	11808	11809	11813	0.031	0.004	0.019	400000	
217	11808	11810	11813	0.027	0.001	0.02	600020.833	
218	11808	11810	11813	0.027	0.001	0.02	600020.833	
219	11808	11810	11813	0.027	0.001	0.019	600021.277	
220	11808	11810	11813	0.027	0.001	0.019	600021.277	*Local1*
221	11808	11815	11820	0.096	0.055	0.014	500006.061	
222	11808	11815	11820	0.093	0.052	0.011	600006.41	
223	11808	11814	11815	0.092	0.051	0.01	400000	
224	11808	11813	11820	0.088	0.047	0.007	600007.042	
225	11808	11813	11814	0.085	0.044	0.004	600007.519	
226	11808	11813	11814	0.082	0.041	0.001	600008.065	
227	11808	11813	11815	0.079	0.038	0.001	600008.475	
228	11808	11813	11819	0.076	0.035	0.002	600008.85	
229	11808	11813	11815	0.073	0.032	0.001	600009.434	
230	11808	11813	11815	0.07	0.029	0.001	600010	
231	11808	11813	11820	0.067	0.026	0.001	600010.638	
232	11808	11813	11820	0.064	0.023	0.001	600011.364	

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (ต่อ)

Ite.	X1	X2	X3	C1	C2	C3	Point	Local
233	11808	11813	11819	0.061	0.02	0.001	600012.195	
234	11808	11813	11815	0.058	0.017	0.001	600013.158	
235	11808	11813	11820	0.055	0.014	0.001	600014.286	
236	11808	11813	11815	0.052	0.012	0.001	600015.385	
237	11808	11813	11820	0.049	0.013	0.001	600015.873	
238	11808	11813	11820	0.046	0.015	0.001	600016.129	
239	11808	11813	11820	0.043	0.015	0.002	600016.667	
240	11808	11813	11820	0.04	0.015	0.003	600017.241	
241	11808	11813	11820	0.037	0.015	0.004	600017.857	
242	11808	11813	11820	0.034	0.016	0.004	600018.519	
243	11808	11814	11815	0.035	0.016	0.003	400000	
244	11808	11814	11815	0.031	0.017	0.002	400000	
245	11808	11813	11907	0.034	0.019	0.001	400000	
246	11808	11813	11820	0.03	0.019	0.005	600018.519	
247	11808	11813	11815	0.028	0.017	0.005	400000	
248	11808	11813	11912	0.025	0.02	0.007	400000	
249	11808	11813	11820	0.025	0.019	0.007	400000	
250	11808	11815	11816	0.024	0.023	0.011	400000	
251	11808	11815	11816	0.028	0.022	0.015	400000	
252	11808	11813	11820	0.027	0.019	0.011	600017.544	
253	11808	11813	11820	0.029	0.019	0.014	600016.129	
254	11808	11813	11820	0.027	0.019	0.012	600017.241	
255	11808	11813	11820	0.029	0.021	0.009	600016.949	
256	11808	11813	11814	0.029	0.02	0.011	400000	
257	11808	11813	11814	0.027	0.02	0.01	400000	
258	11808	11813	11820	0.023	0.023	0.013	600016.949	
259	11808	11813	11907	0.025	0.022	0.01	500017.544	
260	11808	11813	11907	0.027	0.025	0.013	500015.385	
261	11808	11813	11820	0.024	0.024	0.01	600017.241	
262	11808	11813	11820	0.024	0.023	0.008	600018.182	
263	11808	11813	11907	0.022	0.024	0.006	400000	
264	11808	11813	11820	0.026	0.022	0.007	600018.182	
265	11808	11813	11814	0.026	0.024	0.007	400000	
266	11808	11811	11815	0.024	0.028	0.004	400000	
267	11808	11810	11813	0.021	0.025	0.1	500006.849	
268	11808	11810	11813	0.018	0.023	0.097	500007.246	
269	11808	11810	11813	0.015	0.02	0.094	500007.752	
270	11808	11810	11813	0.014	0.017	0.091	500008.197	
271	11808	11810	11813	0.011	0.014	0.088	500008.85	
272	11808	11810	11813	0.008	0.011	0.085	500009.615	
273	11808	11810	11813	0.009	0.009	0.083	500009.901	
274	11808	11810	11813	0.009	0.006	0.08	500010.526	
275	11808	11810	11813	0.009	0.006	0.077	500010.87	
276	11808	11810	11813	0.009	0.006	0.074	500011.236	
277	11808	11810	11813	0.009	0.006	0.071	500011.628	
278	11808	11810	11813	0.009	0.006	0.068	500012.048	
279	11808	11810	11813	0.01	0.007	0.065	500012.195	
280	11808	11810	11813	0.01	0.006	0.062	500012.821	
281	11808	11810	11813	0.012	0.004	0.059	500013.333	
282	11808	11810	11813	0.011	0.005	0.056	500013.889	
283	11808	11810	11813	0.012	0.004	0.053	500014.493	
284	11808	11810	11813	0.012	0.004	0.05	500015.152	
285	11808	11810	11813	0.013	0.004	0.047	500015.625	
286	11808	11810	11813	0.012	0.005	0.044	500016.393	
287	11808	11810	11813	0.013	0.004	0.042	500016.949	
288	11808	11810	11813	0.013	0.004	0.04	500017.544	
289	11808	11810	11813	0.014	0.005	0.037	500017.857	
290	11808	11810	11813	0.015	0.003	0.035	500018.868	
291	11808	11810	11813	0.017	0.003	0.032	500019.231	
292	11808	11810	11813	0.018	0.003	0.029	500020	
293	11808	11810	11813	0.019	0.002	0.027	600020.833	
294	11808	11810	11813	0.02	0.002	0.025	600021.277	
295	11808	11810	11813	0.02	0.002	0.025	600021.277	*Local2*
296	11808	11815	11820	0.096	0.055	0.014	500006.061	
297	11808	11814	11815	0.098	0.056	0.012	400000	
298	11808	11815	11816	0.095	0.052	0.008	600006.452	
299	11808	11815	11820	0.092	0.049	0.006	600006.803	
300	11808	11815	11909	0.089	0.047	0.003	600007.194	
301	11808	11815	11909	0.086	0.044	0.002	600007.576	
302	11808	11815	11819	0.083	0.041	0.001	600008	
303	11808	11815	11909	0.08	0.043	0.001	600008.065	
304	11808	11815	11909	0.078	0.044	0.001	600008.13	
305	11808	11815	11819	0.075	0.045	0.001	600008.264	
306	11808	11815	11816	0.073	0.047	0.001	600008.264	
307	11808	11815	11819	0.07	0.049	0.001	600008.333	
308	11808	11815	11819	0.068	0.05	0.001	600008.403	
309	11808	11815	11819	0.068	0.05	0.001	600008.403	
310	11808	11814	11815	0.07	0.052	0.001	400000	
311	11808	11813	11820	0.067	0.048	0.002	600008.547	
312	11808	11813	11819	0.064	0.045	0.001	600009.091	
313	11808	11813	11814	0.061	0.042	0.001	600009.615	
314	11808	11813	11820	0.058	0.039	0.001	600010.204	
315	11808	11813	11815	0.055	0.036	0.001	600010.87	
316	11808	11813	11814	0.052	0.033	0.001	600011.628	
317	11808	11813	11819	0.05	0.03	0.001	600012.346	
318	11808	11813	11820	0.047	0.027	0.001	600013.333	

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณทุกรอบของการค้นหา ของกรณีประยุกต์ใช้วิธีการติดตั้ง CLR โดยพิจารณาเงื่อนไขความมั่นคงของระบบ (ต่อ)

Ite.	X1	X2	X3	C1	C2	C3	Point	Local
319	11808	11813	11820	0.045	0.024	0.001	600014.286	
320	11808	11813	11820	0.042	0.021	0.003	600015.152	
321	11808	11813	11820	0.039	0.019	0.002	600016.667	
322	11808	11813	11820	0.037	0.016	0.004	600017.544	
323	11808	11813	11820	0.039	0.018	0.007	600015.625	
324	11808	11813	11814	0.041	0.016	0.005	400000	
325	11808	11813	11820	0.038	0.016	0.003	600017.544	
326	11808	11813	11814	0.039	0.019	0.005	400000	
327	11808	11813	11820	0.039	0.017	0.007	600015.873	
328	11808	11813	11815	0.042	0.017	0.004	400000	
329	11808	11813	11820	0.041	0.014	0.003	600017.241	
330	11808	11813	11815	0.044	0.013	0.001	400000	
331	11808	11813	11820	0.04	0.015	0.002	600017.544	
332	11808	11813	11907	0.04	0.015	0.1	500006.452	
333	11808	11813	11815	0.038	0.018	0.097	400000	
334	11808	11813	11815	0.04	0.016	0.093	600006.711	
335	11808	11813	11815	0.041	0.013	0.09	600006.944	
336	11808	11813	11815	0.04	0.011	0.087	600007.246	
337	11808	11813	11815	0.041	0.008	0.084	600007.519	
338	11808	11813	11815	0.041	0.007	0.081	600007.752	
339	11808	11813	11815	0.042	0.007	0.078	600007.874	
340	11808	11813	11815	0.041	0.007	0.076	600008.065	
341	11808	11813	11815	0.04	0.008	0.074	600008.197	
342	11808	11813	11815	0.04	0.008	0.071	600008.403	
343	11808	11813	11815	0.04	0.008	0.069	600008.547	
344	11808	11813	11815	0.041	0.008	0.066	600008.696	
345	11808	11813	11815	0.041	0.008	0.063	600008.929	
346	11808	11813	11815	0.042	0.008	0.06	600009.091	
347	11808	11813	11815	0.042	0.008	0.057	600009.346	
348	11808	11813	11815	0.041	0.008	0.054	600009.709	
349	11808	11813	11815	0.042	0.008	0.051	600009.901	
350	11808	11813	11815	0.041	0.009	0.05	600010	
351	11808	11813	11815	0.042	0.008	0.048	600010.204	
352	11808	11813	11815	0.041	0.009	0.046	600010.417	
353	11808	11813	11815	0.042	0.009	0.043	600010.638	
354	11808	11813	11815	0.042	0.01	0.04	600010.87	
355	11808	11813	11815	0.042	0.009	0.038	600011.236	
356	11808	11813	11815	0.042	0.01	0.035	600011.494	
357	11808	11813	11815	0.043	0.009	0.033	600011.765	
358	11808	11813	11815	0.043	0.009	0.031	600012.048	
359	11808	11813	11815	0.043	0.009	0.028	600012.5	
360	11808	11813	11815	0.043	0.01	0.025	600012.821	
361	11808	11813	11815	0.045	0.01	0.022	600012.987	
362	11808	11813	11815	0.044	0.01	0.02	600013.514	
363	11808	11813	11815	0.044	0.011	0.018	600013.699	
364	11808	11813	11815	0.046	0.01	0.015	600014.085	
365	11808	11813	11815	0.047	0.011	0.013	600014.085	
366	11808	11813	11820	0.044	0.014	0.011	600014.493	
367	11808	11813	11820	0.041	0.014	0.008	600015.873	
368	11808	11813	11820	0.04	0.015	0.005	600016.667	
369	11808	11813	11820	0.043	0.012	0.004	400000	
370	11808	11813	11820	0.041	0.015	0.002	600017.241	
371	11808	11813	11820	0.038	0.015	0.004	600017.544	
372	11808	11813	11814	0.036	0.014	0.005	400000	
373	11808	11813	11820	0.036	0.016	0.003	600018.182	
374	11808	11813	11819	0.039	0.016	0.003	400000	
375	11808	11813	11820	0.037	0.015	0.005	600017.544	
376	11808	11813	11820	0.034	0.017	0.004	600018.182	
377	11808	11814	11815	0.036	0.016	0.003	400000	
378	11808	11813	11820	0.033	0.018	0.004	600018.182	
379	11808	11813	11912	0.036	0.018	0.002	400000	
380	11808	11813	11820	0.035	0.016	0.004	600018.182	
381	11808	11814	11815	0.037	0.016	0.003	400000	
382	11808	11814	11815	0.033	0.012	0.006	400000	
383	11808	11813	11907	0.034	0.015	0.008	400000	
384	11808	11813	11820	0.033	0.017	0.005	600018.182	
385	11808	11813	11814	0.034	0.016	0.005	400000	
386	11808	11813	11814	0.031	0.012	0.005	400000	
387	11808	11813	11820	0.034	0.016	0.007	600017.544	
388	11808	11813	11907	0.036	0.013	0.008	400000	
389	11808	11813	11820	0.032	0.009	0.005	400000	
390	11808	11815	11816	0.03	0.005	0.009	400000	
391	11808	11813	11820	0.026	0.006	0.007	400000	
392	11808	11813	11820	0.027	0.003	0.011	400000	
393	11808	11813	11820	0.023	0.099	0.009	600007.634	
394	11808	11813	11820	0.02	0.096	0.012	600007.813	
395	11808	11813	11820	0.019	0.095	0.013	600007.874	
396	11808	11813	11820	0.022	0.093	0.01	600008	
397	11808	11813	11820	0.02	0.09	0.012	600008.197	
398	11808	11813	11820	0.02	0.087	0.012	600008.403	
399	11808	11813	11820	0.023	0.084	0.009	600008.621	
400	11808	11813	11820	0.02	0.081	0.012	600008.85	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศรัณยู ตรียะโชติ เกิดวันที่ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย