

การวางแผนระบบส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร
โดยใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม



นายสัญญาพงศ์ จิรถาวรีย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TRANSMISSION EXPANSION PLANNING CONSIDERING SHORT-CIRCUIT CURRENT
LIMITATION BY GENETIC ALGORITHM



Mr. Sanyapong Jiratawaree

ศูนย์วิทยทรัพยากร

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

การวางแผนระบบส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาการจำกัดกระแส
ลัดวงจรโดยใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม

โดย

นายสัญญาพงศ์ จิรดาวรีย์


สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.สุรัชย์ ชัยทัศน์ีย์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरองศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เชื้ออาภรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.สุรัชย์ ชัยทัศน์ีย์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ฐิติพร สังข์เพชร)

สัญญาพงศ์ จิรดาวรีย์ : การวางแผนระบบส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาการจำกัดกระแส
 ลัดวงจรโดยใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม. (TRANSMISSION EXPANSION
 PLANNING CONSIDERING SHORT - CIRCUIT CURRENT LIMITATION BY
 GENETIC ALGORITHM) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.สุรัชย์ ชัยทัศนีย์, 155
 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการพิจารณาการ
 จำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรโดยนำเสนอทางเลือกในการจำกัดกระแสลัดวงจร คือ การ
 พิจารณาเลือกติดตั้ง CLR ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกพิจารณาว่าเหมาะสมกับการเลือกนำมาประยุกต์ใช้
 กับระบบของประเทศไทย ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมมาใช้เป็นเครื่องมือ
 ในการแก้ไขปัญหาการส่งกำลังไฟฟ้า และปัญหากระแสลัดวงจรไปพร้อมกันโดยคำตอบที่ได้
 จะเป็นคำตอบที่แสดงถึงตำแหน่งในการก่อสร้างสายส่งเพิ่ม และติดตั้ง CLR ในกรณีที่กระแส
 ลัดวงจรมีค่าเกินพิกัดที่ตั้งไว้ในที่นี้ คือ พิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยคำตอบที่ได้แสดง
 ค่าใช้จ่ายในการแก้ไขปัญหาที่น้อยที่สุด อีกทั้งยังไม่ละเมิดเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในทางปฏิบัติอีก
 ด้วย โดยเริ่มการทดลองกับระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัสจนได้ผลเป็นที่น่าพอใจแล้ว
 จากนั้นได้มีการนำเสนอกรณีศึกษากับระบบจริงซึ่งได้แก่ ระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร
 และบริเวณใกล้เคียง

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....สัญญาพงศ์
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2553.....

5270704221: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : SHORT-CIRCUIT CURRENT LIMITATION / TRANSMISSION
EXPANSION PLANNING

SANYAPONG JIRATAWAREE: TRANSMISSION EXPANSION PLANNING
CONSIDERING SHORT - CIRCUIT CURRENT LIMITATION BY GENETIC
ALGORITHM. THESIS ADVISOR: SURACHAI CHAITUSANEY, 155 pp.

This thesis presents the transmission expansion planning considering short-circuit current limitation by genetic algorithm, which provides an alternative to limit a short circuit current by installing Current Limiting Reactor (CLR). This method is considered to be applied appropriately with the transmission system of Thailand. This thesis uses the process of genetic algorithm as a tool in solving transmission expansion planning and excessive short-circuit current problems. The result of this process provides the answer that represents the positions of new transmission lines. In order to guarantee that the short-circuit currents will not exceed their limits, i.e. interrupting capacity (IC) of circuit breakers, CLRs are installed during the planning process, and the overall cost is minimized for solving the problem. In addition, the obtained solutions do not violate any practical operating constraints. The proposed method has been tested with IEEE-RTS 24 bus test system and a real power system in Bangkok and vicinity areas with satisfactory results.

Department : Electrical Engineering.....
Field of Study : Electrical Engineering.....
Academic Year : 2010.....

Student's Signature สายนนท์
Advisor's Signature S.Chaitusaney

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศน์ย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ ดร.เนบบุญ หุนเจริญ และดร. จิรติพร สังข์เพชร ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำ วิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งขอขอบคุณ สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยสนับสนุนทุนในการทำวิจัย และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่อนุเคราะห์ทุนสนับสนุน และเอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และ คุณปู่ ที่ให้กำลังใจตลอดมา รวมถึง พี่ น้อง และเพื่อนๆ ทุกคน ที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า.....	4
2.1 ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า.....	4
2.2 ประเภทของการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า.....	5
2.3 วิธีการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลัง.....	6
บทที่ 3 การจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร.....	9
3.1 การวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง.....	9
3.2 วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในปัจจุบัน.....	13
3.3 การประยุกต์ใช้วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในต่างประเทศ.....	24
3.4 การการจำกัดกระแสลัดวงจรที่เหมาะสมสำหรับการนำไป ประยุกต์ใช้ในประเทศไทย.....	26
บทที่ 4 การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร.....	31
4.1 ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการจำกัด กระแสลัดวงจรโดยวิธีที่นำเสนอ.....	31

4.2 การจำกัดกระแสลัดวงจรโดยวิธีที่นำเสนอ	33
4.3 การแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยประยุกต์ใช้วิธีทางพันธุกรรม	37
4.3.1 การสร้างประชากรเริ่มต้น (Initialization)	37
4.3.2 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function)	38
4.3.3 เงื่อนไขบังคับ (Constraint)	39
4.3.4 การประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness Value)	41
4.3.5 การคัดเลือก (Reproduction)	42
4.3.6 การข้ามสายพันธุ์ (Crossover)	42
4.3.7 การผ่าเหล่า (Mutation)	45
4.3.8 การเลือกโครโมโซมเพื่อรักษาไว้ในรุ่นถัดไป	45
4.3.9 เงื่อนไขการหยุด	46
4.3.10 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของระบบ (Contingency analysis)	46
4.3.11 หลักการวิเคราะห์	48
บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผล	50
5.1 การสอบการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการติดตั้ง CLR กับระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส โดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบ	50
5.2 กรณีการสอบการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแส ลัดวงจรโดยการติดตั้ง CLR กับระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส โดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบ	60
5.3 กรณีกรณีศึกษาการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแส ลัดวงจรโดยการติดตั้ง CLR กับระบบส่งบริเวณเขตกรุงเทพมหานคร โดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบ	69
บทที่ 6 การจำกัดกระแสลัดวงจรในระยะสั้น	79
6.1 ปัญหาการจำกัดกระแสลัดวงจรในระยะสั้นโดยวิธีที่นำเสนอ	79
6.2 การแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการจำกัดกระแสลัดวงจรโดย ประยุกต์ใช้วิธีทางพันธุกรรม	80
6.3 การทดสอบวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในระยะสั้นโดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทาง พันธุกรรม	85

บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	97
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	97
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก ระบบทดสอบ.....	105
ก.1 ระบบทดสอบปรับปรุง IEEE-RTS 24 บัส.....	105
ก.2 ระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร.....	112
ก.3 ระบบทดสอบปรับปรุง IEEE 30 บัส.....	145
ภาคผนวก ข แผนการขยายระบบส่ง.....	150
ข.1 แผนการขยายระบบส่งที่พิจารณาการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งเพียง อย่างเดียว (การทดลองกรณีที่ 2 ในกรณีศึกษา 5.3).....	150
ข.2 แผนการขยายระบบส่งที่มีการพิจารณาระบบที่ได้มีการขยายตัว และมีการแก้ไข ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยวิธีที่นำเสนอ (การติดตั้ง CLR).....	153
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	155

สารบัญญัตินี้

ตารางที่	หน้า
5.1 กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.1.....	53
5.2 กำลังที่ไหลในสายส่งในแต่ละวงจร ในการทดสอบ 5.1.....	55
5.3 แรงดันในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.1.....	57
5.4 ข้อมูลสายส่งในแผนก่อสร้างเพิ่มในการทดสอบกรณีที่ 2 และ 3 การทดสอบ 5.2.....	62
5.5 กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ในการทดสอบ 5.2.....	62
5.6 กระแสลัดวงจร 3 เฟส ในการทดสอบ 5.2.....	65
5.7 แรงดันในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.2.....	67
5.8 ข้อมูลสายส่งในแผนก่อสร้างเพิ่มในการทดสอบกรณีที่ 2 และ 3 การทดสอบ 5.3.....	73
5.9 กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ในการทดสอบ 5.3.....	73
5.10 กระแสลัดวงจร 3 เฟส ในการทดสอบ 5.3.....	75
6.1 กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสในแต่ละบัส ในการทดสอบ 6.1.....	88
6.2 กำลังที่ไหลในสายส่งในแต่ละวงจร ในการทดสอบ 6.1.....	89
6.3 สถานะสายส่งก่อนและหลังการพิจารณาเปิดวงจร การทดสอบ 6.2.....	93
6.4 กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสในแต่ละบัส ในกรณีที่ 1 การทดสอบ 6.2.....	94
6.5 กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสในแต่ละบัส ในกรณีที่ 2 การทดสอบ 6.2.....	96
ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส.....	105
ก.2 ข้อมูลกำลังการผลิตของระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส.....	107
ก.3 ข้อมูลสายส่งในระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส.....	108
ก.4 ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร.....	112
ก.5 ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า บริเวณกรุงเทพมหานคร.....	122
ก.6 ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร.....	126
ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส.....	145
ก.8 ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส.....	146
ก.9 ข้อมูลสายส่งในระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส.....	147

ข.1 ข้อมูลสายส่งในแผนก่อสร้างเพิ่ม 5 วงจร.....150

ข.2 ข้อมูลสายส่งในแผนก่อสร้างเพิ่มในการทดสอบกรณีที่ 3 การทดสอบ 5.3.....153



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 ความผิดพ้องในระบบไฟฟ้า.....	10
3.2 กระแสผิดพ้องที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	11
3.3 การหาวงจรมูลเหตุวินิน.....	12
3.4 ระบบไฟฟ้า k บัส.....	13
3.5 วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า.....	14
3.6 หลักการทำงานของ Is-Limiter.....	16
3.7 การแบ่งแยกบัส.....	17
3.8 การเปิดวงจรสายส่ง.....	18
3.9 ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของระบบ ก่อน/หลัง การเปิดวงจร.....	19
3.10 การ By-passสายส่ง.....	21
3.11 CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสบาร์.....	22
3.12 CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาเข้า.....	22
3.13 CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาออก.....	22
3.14 การต่ออิมพีแดนซ์ลงกราวด์ผ่านสายนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	23
3.15 วงจรมูลเหตุของเพาเวอร์กริดระดับแรงดัน 345 kV.....	24
3.16 ระบบก่อนการพิจารณาเปิดวงจร.....	28
3.17 ระบบหลังการพิจารณาเปิดวงจร.....	29
3.18 ระบบที่ทำการ By-pass สายส่ง.....	30
4.1 การแก้ไขปัญหาโดยวิธีที่นำเสนอ.....	32
4.2 การติดตั้ง CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสที่แรงดันต่างกัน.....	34
4.3 การติดตั้ง CLR เชื่อมโยงระหว่างสายส่ง.....	34
4.4 ผลกระทบเมื่อติดตั้ง CLR.....	36
4.5 การข้ามสายพันธุ์พื้นฐาน.....	43
4.6 การปรับปรุงการข้ามสายพันธุ์ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์.....	44
4.7 การผ่าเหล่า.....	45
4.8 การวิเคราะห์เงื่อนไขบังคับเรื่อง Contingency.....	47

4.9 แผนภาพแนวคิดโดยรวม.....	48
4.10 โครโมโซมแทนสถานะของสายส่ง.....	49
5.1 ระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส.....	52
5.2 กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟส ในการทดสอบ 5.1.....	54
5.3 กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ในการทดสอบ 5.1.....	57
5.4 แรงดันในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.1.....	59
5.5 กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ในการทดสอบ 5.2.....	64
5.6 กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟส ในการทดสอบ 5.2.....	66
5.7 แรงดันในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.2.....	68
5.8 แผนที่ระบบไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานคร.....	70
5.9 แผนภาพเส้นเดียวของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในเขตกรุงเทพ และปริมณฑล.....	70
5.10 แรงดันในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.3.....	77
6.1 แผนภาพแนวคิดโดยรวม.....	84
6.2 โครโมโซมแทนสถานะของสายส่ง.....	85
6.3 ระบบทดสอบแบบปรับปรุงระบบ IEEE 30 บัส.....	87
6.4 แผนที่ระบบส่งไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานคร.....	93
6.5 การ by-pass สายส่งบริเวณบางพลี (BPL).....	95
6.6 การ by-pass สายส่งบริเวณรังสิต (RS).....	95
ก.1 ระบบทดสอบแบบปรับปรุงระบบ IEEE-RTS 24 บัส.....	111
ก.2 แผนที่ระบบส่งไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานคร.....	144
ก.3 ระบบทดสอบแบบปรับปรุงระบบ IEEE 30 บัส.....	149
ข.1 ตำแหน่งการก่อสร้างสายส่งเพิ่มในกรณีที่ 2.....	151
ข.2 สายส่งที่ก่อสร้างเพิ่มวงจรที่ 1.....	152
ข.3 สายส่งที่ก่อสร้างเพิ่มวงจรที่ 5.....	152
ข.4 ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของระบบสำหรับแผนในกรณีที่ 3.....	154

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้านับว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ หากขาดพลังงานไฟฟ้าแล้ว กิจกรรมต่างๆในชีวิตประจำวันของมนุษย์ก็ไม่อาจดำเนินไปอย่างราบรื่นได้จากการเติบโตทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของประชากรทำให้การขยายตัวของชุมชนเป็นไปอย่างรวดเร็ว การผลิตและการส่งกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการ จำเป็นจะต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบ จึงจะสามารถตอบรับกับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

ถึงแม้ว่าการขยายตัวของระบบไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นรวมไปถึง การเพิ่มขึ้นของจำนวนสายส่งจะนำมาซึ่งการได้ประโยชน์จากพลังงานไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอและทั่วถึงก็ตามแต่ กำลังไฟฟ้าที่ไหลมากขึ้นอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆที่มีอยู่ในระบบ ซึ่งอาจจะนำมาซึ่งความเสียหาย รวมไปถึงค่าใช้จ่ายต่างในการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ที่ตามมาอีกด้วยเมื่อระบบเกิดภาวะผิดปกติเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์ป้องกันต่างๆในระบบซึ่งอาจมีผลกระทบตามไปด้วยซึ่งอาจนำมาซึ่งผลกระทบทางด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้าที่ตามมาจะมีค่าที่ลดลง

โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาถึงเมื่อพิจารณาถึงสภาวะของประเทศไทยในปัจจุบัน เนื่องจากพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล จัดเป็นพื้นที่ที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงและเป็นเขตเศรษฐกิจที่สำคัญที่สุดของประเทศ ดังนั้นการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จึงได้ดำเนินการขยายและปรับปรุงระบบส่งไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับความมั่นคงระบบส่งไฟฟ้าให้จ่ายไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตามมาตรฐาน จากการดำเนินการดังกล่าวทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ รวมของระบบส่งไฟฟ้า กฟผ. มีค่าลดลงตามลำดับ ส่งผลทำให้ค่าระดับกระแสลัดวงจรในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑลของกฟผ. ที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงบางแห่งมีค่ามากกว่าค่า Interrupting Capacity ของอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า ทั้งนี้ กฟผ. ได้ดำเนินการปลดสายส่ง tie line ที่ระดับแรงดัน 230 kV ระหว่าง สถานีไฟฟ้าบางกะปิ และสถานีไฟฟ้าวัดราชเทวี และระหว่างสถานีไฟฟ้าพระนครใต้ และสถานีไฟฟ้าเทพารักษ์ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวแต่เมื่อระบบไฟฟ้ามีการขยายตัวขึ้นตามความต้องการไฟฟ้า

แม้ว่าการจำกัดกระแสลัดวงจรในทางปฏิบัติจะสามารถลดลงได้โดยการเลือกเปิดสายส่งบางวงจรออกก็ตาม แต่การพิจารณาเลือกสายส่งที่ต้องการจะ เปิดวงจรในปัจจุบันยังขาดกระบวนการพิจารณาที่มีหลักการเป็นเพียงการสุ่มเลือกเบื้องต้นกับสายส่งที่อยู่ใกล้กับแหล่งผลิต

ขนาดใหญ่ ซึ่งนำมาซึ่งความยุ่งยากซับซ้อนเมื่อต้องมาพิจารณาถึงผลกระทบอื่นๆที่ตามมา และ ที่สำคัญการเปิดวงจรสายส่งเป็นเพียงการแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าเท่านั้น อีกทั้งยังทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือที่ลดลงอีกด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีการวางแผนระบบส่งโดยการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบโดยใช้การติดตั้ง Current Limiting Reactor (CLR) แทนการเปิดวงจรเพื่อให้ระบบมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ในการหาคำตอบของปัญหานี้ได้ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม เพื่อให้การเลือกมีประสิทธิภาพและมีแบบแผนมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ได้ปฏิบัติมาก่อนหน้านี้ กล่าวคือ สามารถลดความยุ่งยาก กรณีที่ระบบมีขนาดใหญ่ และ พิจารณาเงื่อนไขความปลอดภัยของระบบประกอบไปด้วยพร้อมกันนอกจากนี้ยังพิจารณาถึงผลกระทบต่อระบบที่ตามมาเพิ่มเติม เข้าไปด้วยโดยวัตถุประสงค์ คือเป็นการหาตำแหน่งในการก่อสร้างสายส่งเพิ่ม รวมไปถึงตำแหน่งและขนาดในการติดตั้ง CLR วิธีการที่ได้นำเสนอได้ถูกมาใช้ทดสอบกับ ระบบทดสอบ IEEE 30 บัสที่ได้มีการปรับปรุงให้เหมาะสม ระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส รวมไปถึงกรณีศึกษากับระบบส่งในบริเวณกรุงเทพมหานครร่วมด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาแนวทางในการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เมื่อเกิดการผิดปกติในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง
2. ศึกษา และพัฒนาโปรแกรมในการวางแผนระบบส่งไฟฟ้ากำลังประกอบกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยพิจารณาถึงผลกระทบต่อระบบที่ตามมา
3. นำวิธีการที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการวางแผนระบบส่งไฟฟ้ากำลังได้อย่างเหมาะสม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. พิจารณาจำกัดกระแสลัดวงจรเฉพาะประเภทกระแสลัดวงจรสามเฟส เนื่องจากกระแสลัดวงจรประเภทนี้มีความรุนแรงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับประเภทอื่น
2. พิจารณาพักอุปกรณป้องกันเฉพาะพักของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อเป็นตัวชี้วัดขีดจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร
3. พิจารณาเฉพาะขีดจำกัด เงื่อนไขค่าพิกัดสายส่ง เงื่อนไขพิกัดขนาดแรงดัน เงื่อนไขพิกัดกำลังการผลิตสูงสุด เงื่อนไข Contingency (n-1) และ เงื่อนไขความสมดุลทางไฟฟ้า โดยละเลยปัญหาทางด้านเสถียรภาพจากการรบกวนชั่วคราว (Transient Stability)
4. กำหนดให้แบบจำลองโหลดเป็นแบบค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ และ พิจารณาระบบในสถานะอยู่ตัว เนื่องการศึกษาการวางแผนระบบส่งไฟฟ้ากำลังในทางปฏิบัติมักจำลอง

เหตุการณ์ของระบบไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด และโรงไฟฟ้าเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเต็มกำลังการผลิต ดังนั้นจึงไม่มีการพิจารณาการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ (Redispatch)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษานโยบาย และแนวทางในการพิจารณากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้า
2. ศึกษานโยบาย และแนวทางในการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้า
3. ศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมในการแก้ปัญหาค่าขีดสุด
4. ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยค้นคว้าจากวารสารทางวิชาการต่างๆที่เกี่ยวข้อง
5. กำหนดขอบเขตรวมถึงรายละเอียดของข้อมูลต่างๆที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัย
6. ทดสอบวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรที่อาจเกิดขึ้นในระบบโดยวิธีโดยอาศัยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม
7. ทดสอบวิธีการแก้ปัญหาวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว (Single stage planning) ร่วมกับการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยวิธีโดยอาศัยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม
8. ทดลองนำวิธีการที่นำเสนอไปใช้ในกรณีศึกษาจริงกับระบบไฟฟ้าในบริเวณกรุงเทพมหานคร
9. วิเคราะห์ สรุปผลงานวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรของระบบโดยการติดตั้ง CLR โดยการหาขนาด และตำแหน่งที่เหมาะสมโดยอาศัยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมในการหาคำตอบ
2. วิธีการวางแผนระบบส่งประกอบการศึกษากระแสลัดวงจรโดยอาศัยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมในการหาคำตอบ
3. โปรแกรมที่ใช้ในวางแผนระบบส่งประกอบการศึกษากระแสลัดวงจรอย่างเหมาะสมตามวิธีการที่นำเสนอ
4. สามารถนำโปรแกรมที่ได้ไปใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2

การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า โดยจะเริ่มจากการกล่าวถึงปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า จากนั้นจะกล่าวถึงประเภทของการวางแผนขยายระบบส่ง และวิธีในการแก้ไขปัญหาการวางแผนระบบส่งไฟฟ้า

2.1 ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า

จากความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น สิ่งหนึ่งที่เราจำเป็นต้องพิจารณาคือ การปรับปรุงระบบไฟฟ้าให้มีความเพียงพอและความมั่นคง ซึ่งสามารถทำได้โดยการดำเนินการวางแผนก่อสร้างโรงไฟฟ้าแห่งใหม่ หรือการเพิ่มกำลังการผลิต ทั้งนี้การดำเนินการดังกล่าวจะต้องทำควบคู่ไปกับการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าด้วย เนื่องมาจากการแบกรับภาระของสายส่งที่เพิ่มตามมาด้วย

โดยการวางแผนขยายระบบส่งเป็นแผนการพิจารณาการเลือกงานก่อสร้างสายส่งไฟฟ้า รวมไปถึงหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพื่อรองรับความต้องการปริมาณไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงเวลาพิจารณา (Planning horizon) [1] นอกจากนั้นแผนที่จะดำเนินการต้องมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และการปฏิบัติการน้อยที่สุด โดยทั่วไปการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลังต้องมีการพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ เช่น ขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง และขีดจำกัดเรื่องแรงดันในแต่ละบัส การแก้ไขปัญหาขีดจำกัดทางความร้อนนั้นในทางปฏิบัติสามารถแก้ไขได้โดยติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน หรือปรับแท๊ปของหม้อแปลง การสร้างสมการของปัญหาดังกล่าวมีความซับซ้อน และเป็นลักษณะไม่เชิงเส้น จึงมีความซับซ้อนยุ่งยาก และใช้เวลานานในการพิจารณาแก้ไขปัญหา จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองต่างๆ เพื่อแก้ไขปัญหา

แบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าในการประยุกต์ใช้แก้ไขปัญหการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลังสามารถพิจารณาได้หลายแบบ [2, 3 และ 4] ได้แก่ แบบจำลองกระแสตรง แบบจำลองกระแสสลับ แบบจำลอง transportation แบบจำลอง disjunctive และ แบบจำลอง hybrid เป็นต้น ซึ่งข้อดี และข้อเสียของแต่ละวิธีมีแตกต่างออกไป เช่น เรื่องของเวลาในการคำนวณ ซึ่งขัดแย้งกับเรื่องของความแม่นยำในการคำนวณ

2.2 ประเภทของการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า

ในการพิจารณาประเภทของการวางแผนขยายระบบส่งสามารถแบ่งตามขั้นของช่วงเวลาการพิจารณาในการวางแผน (Planning horizon) ได้ 2 ประเภท [1, 5 และ 6] คือ

1. การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว (Single-stage planning)
2. การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายขั้น (Multistage planning)

1. การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว

การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว หรือเรียกอีกแบบว่า Static transmission expansion planning (STEP) มีจุดประสงค์เพื่อหาคำตอบว่า ตำแหน่งก่อสร้างที่ใด และ สายส่งชนิดใด ที่ควรติดตั้งที่ทำให้ค่าใช้จ่ายต่ำสุดสำหรับข้อมูลของ generation และ load ภายใต้อายุเวลาที่กำหนด โดยที่ช่วงเวลาของการวางแผนทั้งหมดจะถูกพิจารณารวมกัน โดยไม่มีการแบ่งออกเป็นขั้นย่อย นั่น คือไม่มีการพิจารณาลำดับก่อนหลังของสายส่งที่ถูกเลือกให้ก่อสร้าง

ตัวอย่าง การวางแผนที่มีช่วงเวลาการวางแผน 10 ปี คำตอบที่ได้จากการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว คือ สายส่งที่ได้รับเลือกก่อสร้างเพื่อรองรับกับความต้องการใช้ไฟฟ้าอีก 10 ปี ข้างหน้า โดยไม่มีการบ่งบอกว่าสายส่งแต่ละเส้น ควรจะดำเนินการก่อสร้างในปีใด เนื่องจากความเป็นจริงเราอาจไม่จำเป็นต้องก่อสร้างสายส่งทุกเส้นให้เสร็จพร้อมกันตั้งแต่แรก แต่อาจจะสร้างเพิ่มขึ้นตามความต้องการการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นใน 10 ปี

ดังนั้น การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้กับการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าที่มีช่วงเวลาการวางแผนที่ยาวเกินไป ซึ่งวิธีการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายขั้น จะมีความเหมาะสมกว่า อย่างไรก็ดี ในงานวิจัยด้านการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าส่วนใหญ่มักจะเลือกใช้การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบขั้นเดียว เนื่องจากเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายขั้นเช่นกัน

2. การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายขั้น

การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายขั้น หรือเรียกอีกแบบว่า Dynamic transmission expansion planning (DTEP) มีจุดประสงค์เพื่อหาคำตอบที่เพิ่มจากการวางแผนแบบขั้นเดียวตรงที่ว่า เมื่อไหร่ ที่สายส่งควรจะดำเนินการก่อสร้างเพิ่มภายใต้ช่วงเวลาที่กำหนด [7]

การวางแผนแบบนี้ถึงแม้จะสามารถให้รายละเอียดได้มากกว่าการวางแผนแบบชั้นเดียว แต่โดยส่วนมากมีถึงถูกละเอียด เนื่องจากการวางแผนแบบนี้มีความยุ่งยาก และซับซ้อนมากจึงถูกละเลยในการวางแผนแบบระยะยาว โดยช่วงเวลาของการวางแผนจะแบ่งออกเป็นชั้นย่อย [8]

ตัวอย่าง การวางแผนที่มีช่วงเวลาการวางแผน 12 ปี เราอาจแบ่งช่วงเวลาการวางแผนออกเป็นชั้นย่อย 3 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีระยะเวลา 4 ปี

ดังนั้นในปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น จึงเปรียบเสมือนมีปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียวอยู่ภายใน ซึ่งแต่ละปัญหามีความเชื่อมโยงกัน กล่าวคือ ผลตอบของชั้นย่อยก่อนหน้ามีผลต่อผลตอบของชั้นย่อยปัจจุบัน มูลค่าเงินลงทุนของแผนงานที่ได้จากการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น จะคำนวณจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิของแผนงานย่อย ตลอดช่วงเวลาการวางแผนโดยมีการคิดมูลค่าของเงินตามเวลาด้วย (Time value of money)

วิธีการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบหลายชั้น วิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้กันก็คือ pseudodynamic procedures [1] โดยวิธีการดังกล่าวมีพื้นฐานอยู่บนการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าแบบชั้นเดียว

2.3 วิธีการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลัง

วิธีในการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลังทั้งแบบชั้นเดียว และแบบหลายชั้นมีมากมายหลายวิธีโดยที่สามารถแบ่งแยกได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

1. วิธีออปติไมเซชันทางคณิตศาสตร์ (Mathematical optimization)
2. วิธีการฮิวริสติก (Heuristic method)
3. วิธีการกึ่งฮิวริสติก (Meta-heuristic method)

1. วิธีออปติไมเซชันทางคณิตศาสตร์

โดยทั่วไปการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลัง มีจุดประสงค์เพื่อที่จะส่งกำลังให้เพียงพอต่อความต้องการไฟฟ้าที่ได้มีการพยากรณ์ขึ้น ภายใต้เงื่อนไขบังคับเรื่องความน่าเชื่อถือต่างๆ การสร้างสมการออปติไมเซชันโดยพิจารณาหาตัวราคาค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดจึงถูกพิจารณาเป็นฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) ภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ (Constraint functions) เช่น เงื่อนไขทางเทคนิค, เงื่อนไขทางเศรษฐศาสตร์ และเงื่อนไขทางความน่าเชื่อถือ [9] เป็นต้น

การแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์ที่กล่าวมาโดยวิธีที่เคยปฏิบัติ (Classical programming techniques) มีหลายวิธี เช่น linear programming (LP) [10 และ 11], nonlinear programming (NLP) [12] และ mixed integer programming (MIP) [13] หลังจากนั้นมีการปรับปรุงประยุกต์ใช้ decomposition technique เช่น Benders decomposition [14 และ 15] เพื่อให้ได้โมเดลที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

นอกจากวิธีที่กล่าวมา ยังมีวิธีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์ที่ได้นิยามมาการประยุกต์ใช้ เช่น branch and bound และ interior point method (IPM) [16]

ถึงแม้ว่าจะมีการประยุกต์ใช้วิธีต่างๆ มากมายในการแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์วางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลังโดยวิธีออปติไมเซชันทางคณิตศาสตร์ แต่ปัญหาที่พบคือในการพิจารณาแก้ไขปัญหาระบบที่มีขนาดใหญ่ เนื่องมาจากการได้คำตอบส่วนใหญ่มักไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด ข้อจำกัดในกระบวนการแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์ที่ไม่มีประสิทธิภาพ [17]

2. วิธีการฮิวริสติก

วิธีการฮิวริสติกเป็นการแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์โดยวิธีที่มีที่มาจากพื้นฐานของประสบการณ์ของวิศวกร [7] เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการคำนวณ และเวลาในการหาคำตอบ วิธีนี้จึงมีประสิทธิภาพที่ได้กว่าวิธีการออปติไมเซชันทางคณิตศาสตร์ โดยการแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์เป็นการพิจารณาเพิ่มสายส่งเข้าไปที่ละหนึ่งวงจรจากชุดสายส่งที่ใช้เป็นทางเลือก

ในการศึกษาได้มีการนำเสนอการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ดังกล่าวไว้ 2 วิธี ดังนี้ วิธีแรกใช้การคำนวณดัชนีความไว (Sensitivity index) เช่นดัชนีที่เกี่ยวกับการปลดโหลด [18] ดัชนีวัดการกระจายโหลดของระบบไฟฟ้ากำลัง [19] วิธีที่สองเป็นวิธีที่ใช้หลักการการคำนวณ OPF [18 และ 19] สายส่งที่มีคำตอบของตัวแปรที่ถูกลบออกจนเป็นตัวแปรจำนวนเต็มมากที่สุด จะถูกพิจารณาเลือกก่อสร้างก่อน

โดยทั่วไปการแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์โดยวิธีฮิวริสติกแต่คำตอบที่ได้ส่วนใหญ่จะไม่ใช่ global optimum และมักได้คำตอบไม่ดีรวมทั้งใช้เวลาในการคำนวณที่มากเมื่อระบบที่พิจารณามีขนาดใหญ่

3. วิธีการกึ่งฮิวริสติก

วิธีการกึ่งฮิวริสติก เป็นวิธีการที่ผสมผสานระหว่างวิธีออปติไมเซชันทางคณิตศาสตร์ และวิธีการฮิวริสติก [7] ซึ่งวิธีนี้จะได้คำตอบที่ดี และมีความรวดเร็วในการคำนวณมากกว่าทั้งสองวิธี กระบวนการค้นหาผลตอบของวิธีการกึ่งฮิวริสติกนี้จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปหลายวิธี โดยที่

แต่ละวิธีจะมีกระบวนการโดยเฉพาะนั้นเพื่อหาคำตอบที่เป็น local optimum ตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีการ เช่น วิธี genetic algorithms (GAs) [20, 21, 22, 23 และ 24] simulated annealing (SA) [25 และ 26] และ tabu search (TS) [27, 28 และ 29] ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ไขปัญหาคำถามวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลัง ข้อแตกต่างระหว่างวิธีเหล่านี้คือ GAs เริ่มการพิจารณาจากเซตคำตอบหลายๆจุดในขณะที่ SA และ TS เริ่มการพิจารณาจากคำตอบเพียงจุดเดียว จากเหตุผลนี้ GAs สามารถที่จะแก้ไขปัญหามีหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi-objective problem) [24] ส่วนวิธีอื่นได้แก่ expert systems และ greedy randomized [30] เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้วิธีการกึ่งฮิวริสติก โดยเลือกวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม หรือ genetic algorithms ในการแก้ไขปัญหาคำถามวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลัง ร่วมกับการพิจารณาการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร เนื่องจากการศึกษาที่กล่าวมาการแก้ไขปัญหานั้นซึ่งเป็นปัญหาแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย จึงพิจารณาเลือกวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร

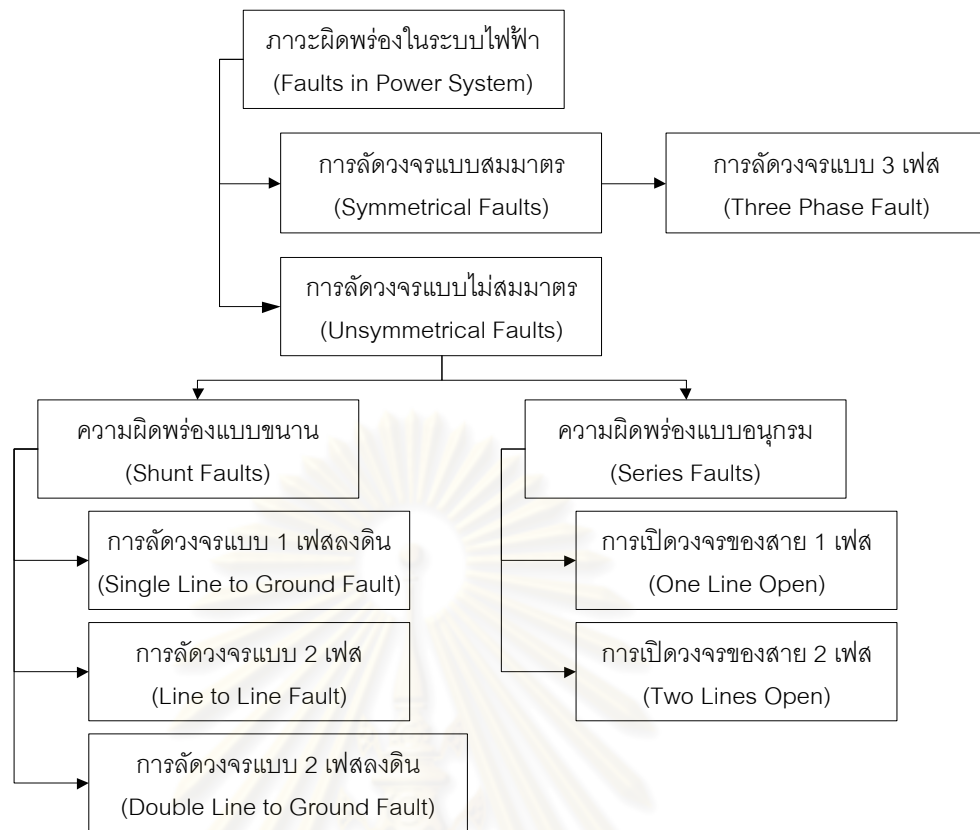
ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร โดยจะเริ่มจากการวิเคราะห์ความผิดปกติพ่วงในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งนำเสนอหลักการการวิเคราะห์เบื้องต้นจากนั้นนำไปสู่การแสดงปัญหาการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรในปัจจุบันแบบต่างๆ การประยุกต์ใช้วิธีการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรในต่างประเทศ และการประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับบริเวณกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นบริเวณที่พิจารณา

3.1 การวิเคราะห์ความผิดปกติพ่วงในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบการผลิต (Generation) ระบบส่งจ่าย (Transmission) และระบบจำหน่าย (Distribution) โดยในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนในแต่ละส่วน ซึ่งมีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในปริมาณที่สูง อันเนื่องมาจากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน การวิเคราะห์การทำงานของระบบในภาวะผิดปกติจึงเป็นประเด็นสำคัญ และต้องนำมาพิจารณาประกอบการออกแบบระบบป้องกัน รวมไปถึงการออกแบบการขยายของระบบไฟฟ้ากำลังด้วย

การผิดปกติของระบบไฟฟ้า คือ ภาวะที่ระบบไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงไปจาก สภาวะปกติ อันเนื่องมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น เกิดจากการชำรุดเองของอุปกรณ์ตามการเวลา ฟิวส์ ตันไม้ ทับสายส่ง เป็นต้น จึงทำให้โอกาส การเกิดความผิดปกติได้หลายแบบด้วยกัน แสดงดังรูปที่ 3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

ในความผิดปกติทั้งหมดนั้น ความผิดปกติแบบเฟสเดียวลงดิน (Single Line to Ground Fault) เป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุด คิดเป็นประมาณ 70 – 80 % ของความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าทั้งหมด ต่อมาคือ ความผิดปกติแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ซึ่งเป็นความผิดปกติที่เกิดบ่อยครั้งเนื่องจากการผิดปกติแบบเฟสเดียวลงดินที่ไม่จำกัดความผิดปกติออกภายในระยะเวลาที่ฉนวนสามารถทนแรงดันที่สูงขึ้นระหว่างเกิดความผิดปกติแบบลัดวงจรเฟสเดียวลงดินนั้นได้ แต่อย่างไรก็ตามความผิดปกติแบบลัดวงจร 3 เฟส ซึ่งเป็นความผิดปกติที่มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความผิดปกติแบบอื่น คิดคิดเป็นประมาณ 5 % ของความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าทั้งหมด มักมีความรุนแรงของผลที่ตามมามากกว่า เช่น มีค่าของกระแสผิดปกติมาก เป็นต้น ดังนั้น จึงมักใช้ในการพิจารณาในการเลือกฟักัดอุปกรณ์ป้องกัน

ในการพิจารณาเรื่องผลกระทบของกระแสลัดวงจรต่อฟักัดของอุปกรณ์ป้องกันนี้จึงพิจารณาความผิดปกติแบบลัดวงจร 3 เฟส ประกอบกับแบบลัดวงจรเฟสเดียวลงดินไปด้วย

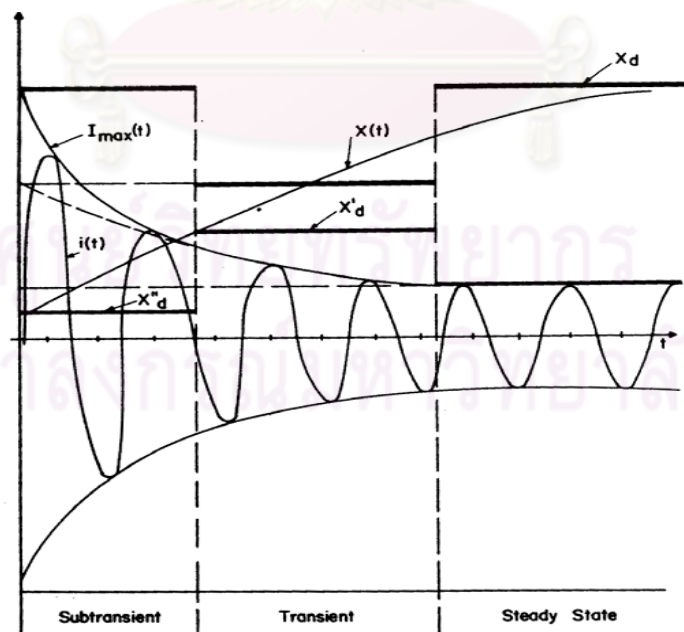
3.1.1 สภาวะชั่วคราวในขณะเกิดความผิดปกติ

โดยธรรมชาติระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณสมบัติเป็นวงจร RL ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนสถานะการทำงานอย่างฉับพลัน เช่น การปิดตัวของอุปกรณ์สวิตช์ ยกตัวอย่างเช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือ การลัดวงจรของสายส่ง กระแสที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 3 ช่วง ดังนี้

- ช่วงก่อนสภาวะชั่วคราว (Subtransient period)
- ช่วงสภาวะชั่วคราว (Transient period)
- ช่วงสภาวะอยู่ตัว (Steady-state period)

ในการเปลี่ยนแปลงทั้ง 3 ช่วงนี้ พบว่าในช่วงเวลา 1-5 รอบการทำงาน (คาบ) กระแสจะมีค่าสูงมากแล้วค่อยๆ ลดลง ซึ่งพิจารณาอยู่ในช่วง ช่วงก่อนสภาวะชั่วคราว และ ช่วงสภาวะชั่วคราว นอกจากนี้ พิจารณาว่า ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบมีค่าเปลี่ยนไปตามช่วงเวลาทำให้กระแสเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เมื่อกำหนดให้ X คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของวงจรสามารถแบ่งค่ารีแอกแตนซ์ออกเป็น 3 ดังนี้

- X_d'' แทนค่า direct-axis sub-transient reactance
- X_d' แทนค่า direct-axis transient reactance
- X_d แทนค่า direct-axis synchronous reactance

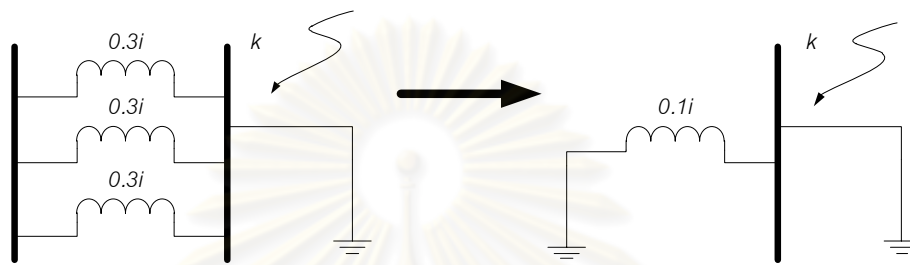


รูปที่ 3.2 กระแสผิดปกติที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

พิจารณาจากรูปที่ 3.2 พบว่าค่ากระแสลัดวงจรในช่วงก่อนสถานะชั่วคราว (Subtransient period) มีค่าที่สูงที่สุดจึงมักนำค่ารีแอกแตนซ์ในช่วงนี้มาประกอบในการพิจารณาในเรื่องพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน

3.1.2 การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่บัสใดๆ

ในเรื่องการคำนวณกระแสลัดวงจรนี้ อิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการคำนวณนี้จะสามารถหาได้มาจากวงจรสมมูลเทวินิน ตัวอย่างการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.3 สมมติให้เกิดลัดวงจรที่บัส k



รูปที่ 3.3 การหาวงจรสมมูลเทวินิน

จากรูปค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออยู่ทางซ้ายมือของบัส k 3 ตัวสามารถคิดเป็นการต่อแบบขนานกันลงดิน ดังรูปที่ 3 ดังค่าที่ได้นั้น ($0.1i$) คือค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส k ที่ใช้ในการคำนวณ

แต่สำหรับการคำนวณระบบที่มีขนาดใหญ่แล้วในการคำนวณหาอิมพีแดนซ์สมมูลโดยแปลงเป็นวงจรสมมูลเทวินินอาจทำได้ยากจึงใช้การแปลงอิมพีแดนซ์เป็นเมตริกซ์ของอิมพีแดนซ์สมมูล (Z_{bus}) โดยที่เมื่อพิจารณาที่บัสใด จะนำค่าที่ตำแหน่งทแยงมุมมาใช้ในการคำนวณ ยกตัวอย่างเช่น หากคิดที่ บัส 3 จะใช้ค่า $Z_{3,3}$ มาใช้ในการคำนวณ

3.1.3 การคำนวณกระแสลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ จำเป็นต้องมีวิธีการที่เหมาะสม เนื่องจากในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ๆ เป็นการยากที่จะเขียนไดอะแกรมเส้นเดียวเพื่อคำนวณหาอิมพีแดนซ์สมมูล แต่การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดย จัดรูปของระบบให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณได้ คือ จัดให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ ซึ่งเมตริกซ์ที่นิยมใช้กันมาก และมีความสะดวกมากที่สุดในการคำนวณกระแสลัดวงจร ได้แก่ Z_{bus} ซึ่งการคำนวณ Z_{bus} นิยมแปลงมาจากการอินเวอร์ส Y_{bus} นั้นเอง

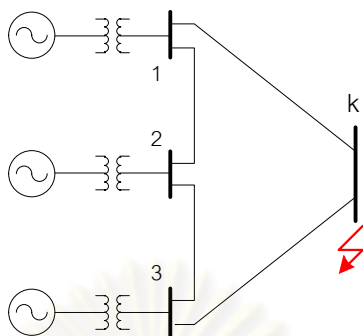
โดยความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่บัสเป็นไปตามสมการที่ 3.1

$$V_{bus} = Z_{bus} * I_{bus} \quad (3.1)$$

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส

I_{bus} คือ กระแสจากแหล่งจ่ายเข้าที่บัส

ตัวอย่าง. ระบบที่พิจารณามี k บัส ตามรูปที่ 3.4 สมมติว่าเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่บัส k



รูปที่ 3.4 ระบบไฟฟ้า k บัส

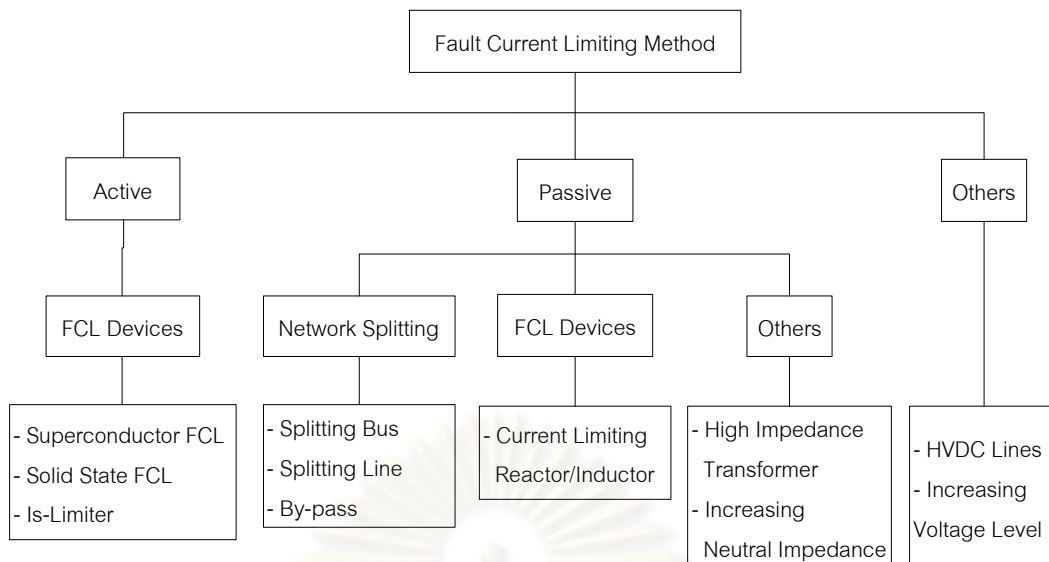
สามารถคำนวณความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า และกระแสที่บัสดังสมการที่ 3.2 และเมื่อกำหนดให้แรงดันก่อนเกิดความผิดปกติที่บัส k มีค่าเท่ากับ $V_{pre,k}$ ได้สมการทั่วไปในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่บัส k โดยไม่คิดกระแสก่อนเกิดความผิดปกติ ดังสมการที่ 3.3

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{pre,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{1k} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{2k} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{3k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{k1} & Z_{k2} & Z_{k3} & Z_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_f'' \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

$$I_f = \frac{V_{pre,k}}{Z_{kk}} \tag{3.3}$$

3.2 วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในปัจจุบัน

วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี สามารถแบ่งแยกตามลักษณะของค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการทำงานของระบบ [31, 32 และ 33] ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ดังนี้



รูปที่ 3.5 วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

3.2.1 การจำกัดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟ

การจำกัดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟเป็นการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ในการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ จะมีคุณสมบัติพิเศษคือ

สถานะที่ระบบทำงานปกติ (Normal condition) อุปกรณ์จะมีค่าอิมพีแดนซ์น้อยมากจนไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบ

สถานะที่ระบบเกิดลัดวงจร (Fault condition) อุปกรณ์จะเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์อย่างรวดเร็วเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นให้มีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะการทำงานของระบบ ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบในสถานะปกติ ซึ่งเป็นจุดเด่นของวิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟ

วิธีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีดังนี้

Superconductor Fault Current Limiter (SCFCL)

Superconductor Fault Current Limiter [34, 35 และ 36] เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่อาศัยหลักการทำงานของวัสดุตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าโดยปราศจากความต้านทาน ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิค่าหนึ่งที่เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) รวมถึงปัจจัยของปริมาณกระแส และสนามแม่เหล็ก ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสวิกฤต (Critical current level) และค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical field) โดยถ้าอุปกรณ์มีค่าใดค่าหนึ่งเกินค่าวิกฤต จะทำให้อุปกรณ์เกิดการเปลี่ยนสถานะ (Quenching) จากสถานะตัวนำยิ่งยวด (Superconductor state) เป็นสถานะความต้านทาน (Resistive state)

โดยวิธีการประยุกต์ใช้ SCFCL มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

- 1) อุปกรณ์ไม่ปรากฏค่าอิมพีแดนซ์ในระบบ เมื่อระบบอยู่ในช่วงสภาวะทำงานปกติ จึงไม่มีผลต่อการทำงานของระบบไฟฟ้า
- 2) ช่วงอุณหภูมิการทำงานมีความยืดหยุ่นสูง
- 3) มีประสิทธิภาพในการลดกระแสลัดวงจรได้ดี

ข้อเสีย

- 1) ปัจจุบันระดับแรงดันในช่วงทำงานสูงสุด เท่ากับ 145 kV จึงทำให้ไม่สามารถใช้ในระดับแรงดัน 230 kV หรือมากกว่านั้นได้
- 2) มีการนำมาใช้ไม่แพร่หลาย เนื่องจากอยู่ในช่วงวิจัยและพัฒนา
- 3) มีราคาสูงเนื่องจากทำมาจากวัสดุประเภท Superconductor จึงอาจไม่คุ้มกับการลงทุน

Solid-State Fault Current Limiter (SSFCL)

Solid-State Fault Current Limiter [37] เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่มีโครงสร้างโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่จำกัดกระแสและแรงดัน และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วย Solid-state switch เช่น GTO (Gate Turn-off) thyristors ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานของสวิตช์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ

โดยวิธีการประยุกต์ใช้ SSFCL มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

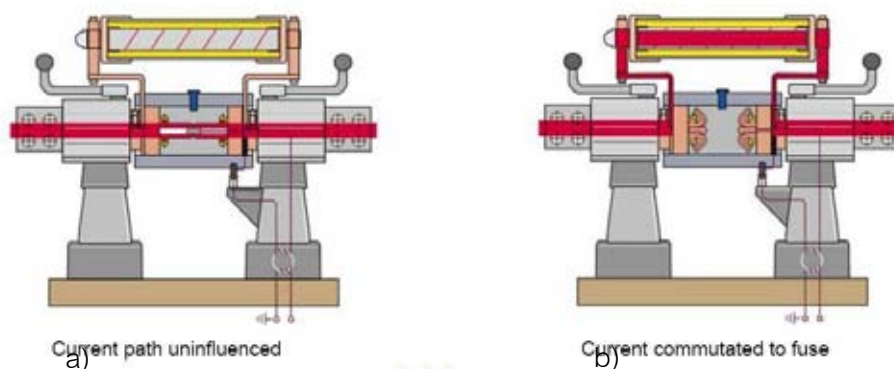
- 1) อุปกรณ์ไม่ปรากฏค่าอิมพีแดนซ์ในระบบ เมื่อระบบอยู่ในช่วงสภาวะทำงานปกติ
- 2) มีประสิทธิภาพในการลดกระแสลัดวงจรได้ดี
- 3) ทำให้คุณภาพไฟฟ้ากำลังดีขึ้น จากการช่วยลดขนาดของกระแสไหลพุ่ง (Inrush current) ที่เกิดจากการสับต่อหม้อแปลงเข้าไปในระบบ

ข้อเสีย

- 1) ราคาสูงมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ
- 2) มีความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์
- 3) มีการนำมาใช้ไม่แพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเชื่อถือได้ในการแก้ปัญหาต่ำ

Is-Limiter

Is-Limiter เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่มีกลไกการจำกัดกระแสลัดวงจรถูกพัฒนาและผลิตขึ้นโดยบริษัท ABB ซึ่งแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 หลักการทำงานของ Is-Limiter [31 และ 32]

Is-Limiter ประกอบด้วยตัวนำ 2 ชนิดขนานกัน จากรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าในสภาวะการทำงานปกติ กระแสจะไหลผ่านอุปกรณ์ โดยผ่านตัวนำหลักซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมาก ทำให้มีผลกระทบต่อระบบน้อยมาก ส่วนในสภาวะที่เกิดการลัดวงจร กลไกการทริปของอุปกรณ์จะทำงานทำให้กระแสไหลผ่านตัวนำที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งส่งผลให้กระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านอุปกรณ์มีค่าลดลง

โดยวิธีการประยุกต์ใช้ Is-Limiter มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

- 1) ใช้เงินลงทุนไม่สูงมาก
- 2) มีความเชื่อถือได้สูง

ข้อเสีย

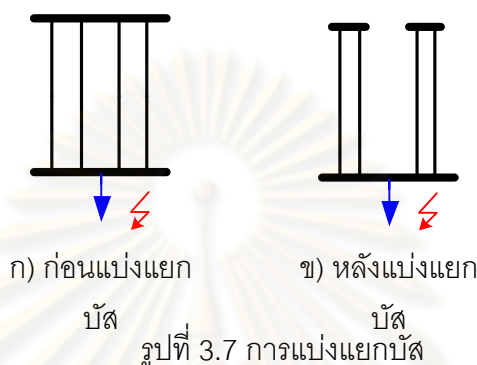
- 1) ใช้งานกับระดับแรงดันไม่สูง จึงมักประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่าย

3.2.2 การจำกัดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟ

การจำกัดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟมีคุณสมบัติ คือ จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเปลี่ยนแปลงไปทั้งในสภาวะที่ระบบทำงานปกติ และสภาวะที่ระบบเกิดลัดวงจร โดยค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจะเพิ่มขึ้นเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นให้มีค่าลดลง ซึ่งจะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงานของระบบ ทำให้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาการทำงานของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรอบคอบก่อนนำมาใช้งาน ซึ่งวิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบพาสซีฟที่มีการนำมาใช้ในปัจจุบัน มี ดังนี้

การแบ่งแยกบัส (Bus Splitting)

การปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าโดยวิธีการแบ่งแยกบัสในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเป็นหนึ่งในวิธีการลดกระแสลัดวงจร โดยเทคนิคการลดกระแสลัดวงจรที่สำคัญ คือ การเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบ [31] ซึ่งการแบ่งแยกบัสสามารถเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบได้ โดยลดการเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าลง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์บริเวณจุดที่เกิดการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังจากการแบ่งแยกบัส แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.7



โดยวิธีการแบ่งแยกบัส มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

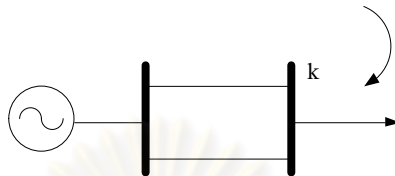
- 1) ลดความรุนแรงของกระแสลัดวงจร โดยแบ่งแยกแหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร
- 2) ไม่ต้องนำอุปกรณ์จำกัดกระแสมาเชื่อมต่อส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบ
- 3) เป็นวิธีที่สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในปัจจุบัน โดยใช้เวลาดำเนินการไม่มาก
- 4) ค่าใช้จ่ายต่ำมากเมื่อเทียบกับการแก้ปัญหาด้วยการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรต่างๆ

ข้อเสีย

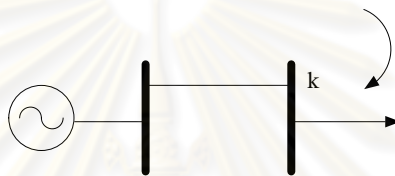
- 1) ต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่แบ่งแยก (Bus transfer equipment)
- 2) เมื่อบัสที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายหลักให้โหลดจุดหนึ่งในระบบถูกแบ่งแยก จะทำให้ความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลดนั้นลดลง จึงต้องทำการศึกษาลักษณะทาบในส่วนของโหลดอย่างรอบคอบ
- 3) เป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อใต้น้อย
- 4) ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง ในกรณีที่ต้องทำการเปลี่ยนชุดบัสบาร์ใหม่ หากชุดบัสบาร์เดิมไม่สามารถทำการแบ่งแยกได้

การเปิดวงจรสายส่ง

วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าด้วยการปลดวงจรสายส่งในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะสั้น และในสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดการเชื่อมต่อขนานของสายส่งในระบบดังรูปที่ 3.8 ซึ่งส่งผลทำให้ระบบมีอิมพีแดนซ์โดยรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจร ณ จุดต่างๆ ในระบบลดลง



ก) ระบบก่อนมีการเปิดวงจร



ข) ระบบหลังมีการเปิดวงจร

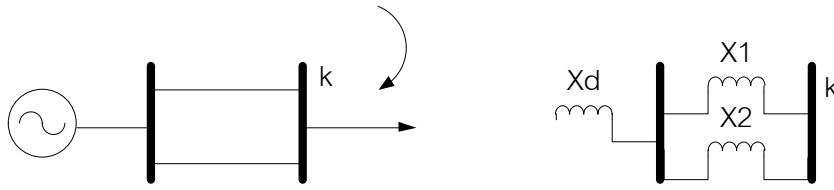
รูปที่ 3.8 การเปิดวงจรสายส่ง

เนื่องจากปริมาณกระแสลัดวงจรเป็นส่วนแบบผกผันกับค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่ติดอยู่ที่จุดที่เกิดการลัดวงจร ดังนั้นหากต้องการให้กระแสลัดวงจรมีค่าลดลงจึงอาจใช้วิธีการเปิดวงจรสายส่งเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลมีค่าเพิ่มขึ้นได้

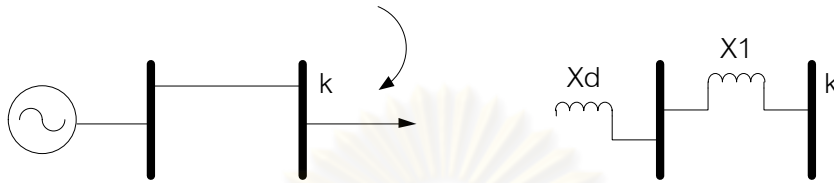
ตัวอย่าง. การลดกระแสลัดวงจรอันเนื่องมาจากการปลดสายส่ง

เมื่อกำหนดให้ส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้า และ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล เมื่อก่อนและหลังปลดสายส่งโดยที่สมมติให้เกิดลัดวงจรที่บัส k เป็นดังรูปที่ 3.9

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) ระบบก่อนมีการเปิดสาย และ อิมพีแดนซ์สมมูลของระบบเมื่อมองจากจุดที่เกิดการลัดวงจร



ข) ระบบหลังมีการเปิดสาย และ อิมพีแดนซ์สมมูลของระบบเมื่อมองจากจุดที่เกิดการลัดวงจร
รูปที่ 3.9 ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของระบบ ก่อน/หลัง การเปิดวงจร

จากรูปที่ 3.9 ก) เมื่อก่อนปลดสายส่งค่าอิมพีแดนซ์สมมูลมีค่าคือ

$$Z_{eq} = X_d + (X_1 // X_2)$$

แต่เมื่อหลังจากปลดสายส่งออกพบว่าอิมพีแดนซ์สมมูลมีค่าคือ

$$Z_{eq} = X_d + X_1$$

เมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์สมมูลทั้งก่อนและหลังพบว่าค่าอิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นอันส่งผลให้การแสลัดวงจรมีค่าลดลงมาจากกระแสลัดวงจรเป็นสัดส่วนแบบผกผันกับค่าอิมพีแดนซ์สมมูลดังที่กล่าวมาในข้างต้น

วิธีการเปิดวงจรสายส่ง เพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีข้อดีและข้อเสีย

ดังนี้

ข้อดี

- 1) แทบไม่มีความจำเป็นในการใช้เงินลงทุน
- 2) ดำเนินการแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย
- 3) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีทางเลือกในการแก้ไขปัญหาได้มาก
- 4) สามารถประยุกต์ใช้ได้หลายระดับแรงดัน

ข้อเสีย

- 1) วงจรสายส่งที่เปิดวงจรเปรียบเสมือนการหายไปของวงจรสายส่ง จึงต้องทำการศึกษาผลกระทบต่อการทำงานของระบบอย่างรอบคอบ
- 2) ความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลง

การ By-pass สายส่ง

วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าด้วยการ By-pass สายส่งในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะสั้น และในสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยมีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนทิศทางกระแสของกระแสลัดวงจรไม่ให้ไหลสู่บริเวณที่มีปริมาณกระแสลัดวงจรมากดังรูปที่ 3.10 ซึ่งส่งผลทำให้บริเวณที่ทำการ By-pass สายส่ง มีปริมาณกระแสลัดวงจรลดลง

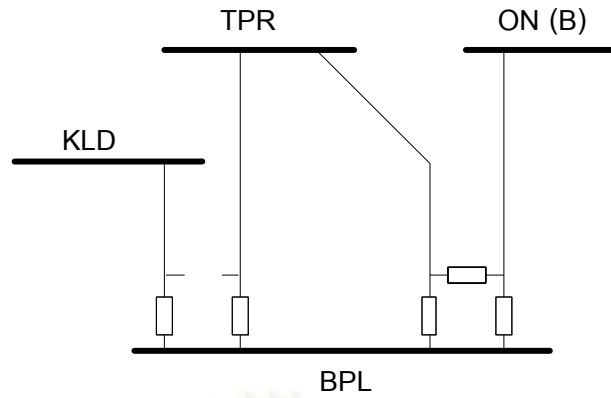
ข้อดี

- 1) แทบไม่มีความจำเป็นในการใช้เงินลงทุน
- 2) ดำเนินการแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย
- 3) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีความเชื่อถือได้สูง
- 4) ผลกระทบต่อระบบที่ตามมา มีน้อยกว่าวิธี การเปิดวงจร

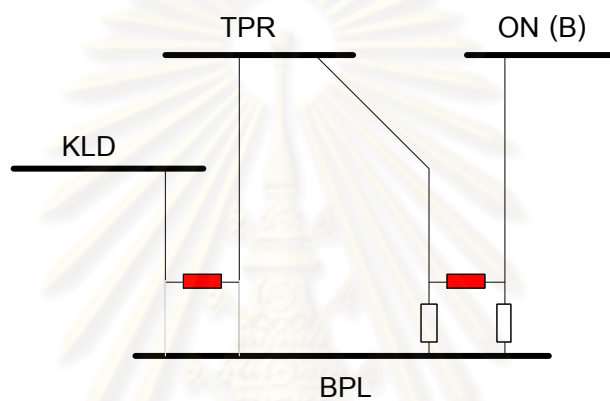
ข้อเสีย

- 1) วงจรสายส่งที่ทำการ By-pass ต้องทำการศึกษาผลกระทบต่อการทำงานของระบบอย่างรอบคอบ
- 2) ความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลง
- 3) บางระบบสามารถเลือกตำแหน่งในการทำการ By-pass ได้จำกัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) ก่อนการ By-pass สายส่ง



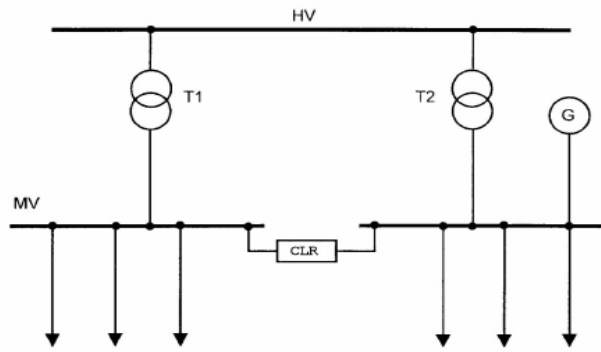
ข) หลังการ By-pass สายส่ง

รูปที่ 3.10 การ By-passสายส่ง

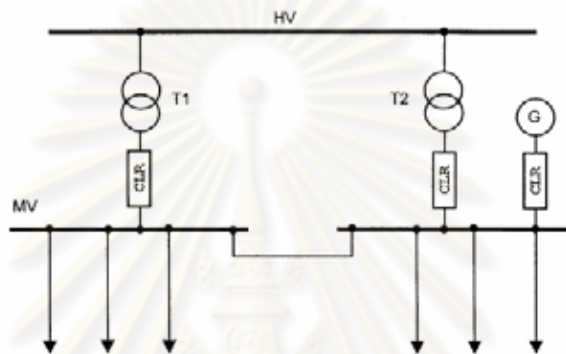
Current Limiting Inductor/Reactor

Current Limiting Reactor (CLR) [38-39] เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความต้านทานโดยรวมสูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะการต่อแบบอนุกรมเข้าไปภายในระบบไฟฟ้า การใช้งานของ CLR สามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบแล้วแต่จุดประสงค์ของผู้ใช้งาน เช่น ใช้เพื่อป้องกันกระแสลัดวงจรลงดิน หรือป้องกันกระแสลัดวงจรระหว่างเฟส นอกจากนี้ CLR ที่ใช้งานมีหลายประเภท

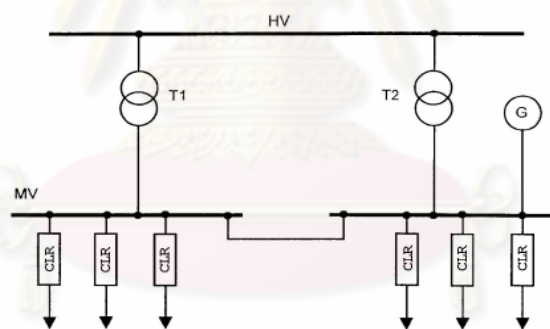
การใช้งานของ CLR จะต้องเลือกตำแหน่งในการติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด และสามารถต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้หลายลักษณะ ดังแสดงดังรูปที่ 3.11 แสดงการต่อ CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสบาร์ รูปที่ 3.12 แสดงการต่อ CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาเข้า และรูปที่ 3.13 แสดงการต่อ CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาออก การต่อ CLR กับบัสบาร์ในสถานีไฟฟ้าในลักษณะที่แตกต่างกันนี้ ซึ่งจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 3.11 CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสบาร์ [39]



รูปที่ 3.12 CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาเข้า [39]



รูปที่ 3.13 CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาออก [39]

ข้อดี

- 1) มีราคาไม่สูงมาก
- 2) สามารถช่วยจำกัดอุณหภูมิไม่ให้สูง เพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้า
- 3) มีความสามารถในการป้องกันกระแสลัดวงจรในระดับแรงดันสูงได้ดี

ข้อเสีย

- 1) มีปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อม กำลังสูญเสีย เนื่องจากอุปกรณ์มีค่าอิมพีแดนซ์สูงซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของกำลังที่สูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์

- 2) เกิด Magnetic flux ซึ่งส่งผลต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตที่อยู่ใกล้เคียง และสภาวะการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่อยู่ใกล้เคียง
- 3) จำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก เนื่องจากอุปกรณ์ยังมีขนาดใหญ่

High Impedance Transformer

วิธีการนี้สามารถจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการเพิ่มอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อจำกัดขนาดกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อมและกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงขึ้นเมื่อระบบทำงานในสภาวะปกติ และแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิไม่เป็นไปตามพิกัดที่ถูกต้อง นอกจากนี้ราคาหม้อแปลงค่าอิมพีแดนซ์สูงจะแพงกว่าหม้อแปลงที่ใช้งานโดยทั่วไป

ข้อดี

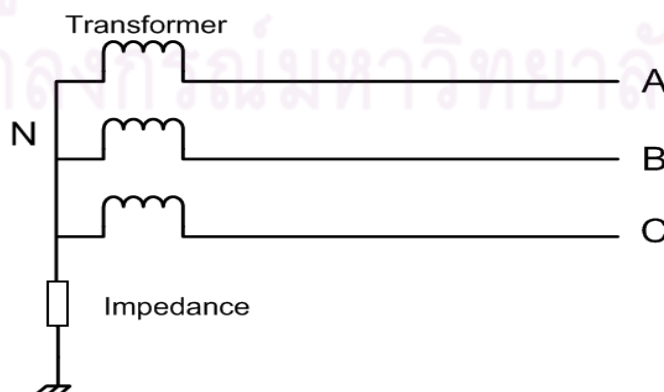
- 1) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่เข้าใจได้อย่างชัดเจน ไม่มีความซับซ้อนในการประยุกต์ใช้
- 2) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีความเชื่อถือได้

ข้อเสีย

- 1) มีปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อม และกำลังสูญเสีย
- 2) ไม่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้าที่มีพื้นที่จำกัด
- 3) แรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิไม่เป็นไปตามพิกัดที่ถูกต้อง
- 4) ราคาสูงกว่าหม้อแปลงที่ใช้งานโดยทั่วไป

Increasing Neutral Impedance

วิธีจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการต่ออิมพีแดนซ์ลงกราวด์ผ่านสายนิวทรัล [40] วิธีการนี้ไม่ส่งผลต่อการทำงานในสภาวะปกติ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท Single-phase-to-ground fault วิธีการนี้จะช่วยลดกระแสลัดวงจรได้สูงถึง 40% ดังรูปที่ 3.14 แสดงการต่ออิมพีแดนซ์ผ่านนิวทรัลลงกราวด์ของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.14 การต่ออิมพีแดนซ์ลงกราวด์ผ่านสายนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้า [40]

ข้อดี

- 1) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่เข้าใจได้อย่างชัดเจน ไม่มีความซับซ้อนในการประยุกต์ใช้
- 2) ประยุกต์ใช้ได้สะดวก และใช้เงินลงทุนต่ำ
- 3) ได้ผลดี กรณีกระแสลัดวงจรลงกราวด์มีค่าสูง

ข้อเสีย

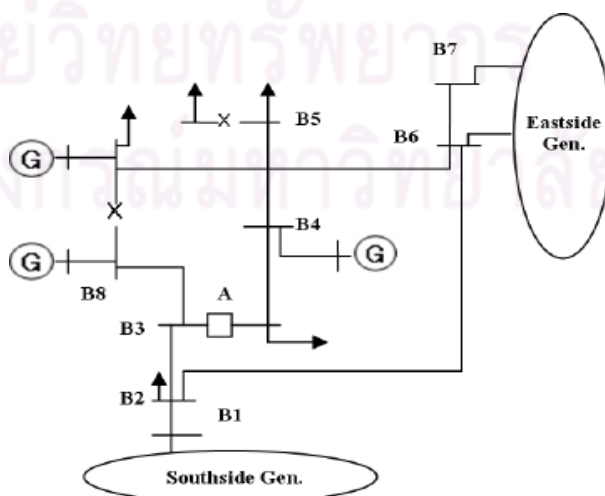
- 1) ความไวต่อการทำงานของรีเลย์กระแสเกินลดลง
- 2) ไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากในทางปฏิบัตินิยมให้อิมพีแดนซ์ของนิวทรัลมีค่าต่ำๆ
- 3) ระดับแรงดันนิวทรัลจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงขึ้น อุปกรณ์ป้องกันต้องใช้นวนในในระดับที่สูงขึ้น

3.3 การประยุกต์ใช้วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในต่างประเทศ

ปัญหาการจำกัดกระแสลัดวงจรเพื่อไม่ให้ขนาดกระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในหลายประเทศ โดยในปัจจุบันมีงานวิจัยที่นำเสนอกรณีศึกษา รวมไปถึงกรณีการนำไปประยุกต์ใช้จริงในการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงของประเทศต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

3.3.1 ประเทศเกาหลี [41]

ปัญหาขนาดกระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 40 kA ในเฟาเวอร์กิตระดับแรงดัน 345 kV ถูกนำมาศึกษาเพื่อหาวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสม โดยนำวิธีการติดตั้ง CLR วิธีการแบ่งแยกบัส วิธีการติดตั้ง SCFCL มาประยุกต์ใช้ที่บัสภายในสถานีไฟฟ้าตำแหน่ง A [41] ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลของเฟาเวอร์กิตระดับแรงดัน 345 kV [41]

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแต่ละวิธีการลดกระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง โดยเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบ ในด้านเสถียรภาพสภาวะชั่วคราว และเวลาจำกัดความผิดพลาดของวิฤต ซึ่งมีรายละเอียดของการประยุกต์ใช้แต่ละวิธีดังนี้

- 1) ติดตั้ง SCFCL เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ตำแหน่ง A
- 2) ติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ตำแหน่ง A
- 3) แบ่งแยกบัสที่ตำแหน่ง A

ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า การประยุกต์ใช้ SCFCL ให้ผลการพิจารณาที่ดีที่สุด

3.3.2 ประเทศคูเวต [42]

ประเทศคูเวตมีความต้องการทางไฟฟ้ามากขึ้น จึงจำเป็นต้องขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า ทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น ซับซ้อนขึ้น เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่ามากขึ้น หากค่ากระแสลัดวงจรมีค่าสูงเกินกว่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันจะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เหล่านั้นได้ [42]

การศึกษาเพื่อลดระดับกระแสลัดวงจรที่สูงขึ้นในประเทศคูเวตมีดังนี้

การเปลี่ยนสายส่งจาก AC Lines เป็น DC Lines

การเปลี่ยนสายส่งจาก AC Lines เป็น DC Lines ทำให้เพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้คุณสมบัติอีกอย่างของ DC Transmission คือ สามารถลดระดับกระแสลัดวงจรได้ โดยจะใช้การเชื่อมต่อผ่าน HVDC แต่วิธีการนี้จะใช้ค่าใช้จ่ายที่สูงมาก เพราะราคาของอุปกรณ์ที่ใช้งานมีราคาที่สูง (อินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์) ดังนั้นการเลือกเส้นที่จะเชื่อมต่อต้องมีความเหมาะสมมากที่สุด

ติดตั้งอุปกรณ์ Current Limiter Reactor

ปัจจุบันประเทศคูเวตมีความสนใจการใช้งาน Current Limiter Reactor (CLR) มากขึ้น ซึ่งการใช้งานของ CLR ก็มีหลากหลายวิธี โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดและตำแหน่งของการติดตั้งภายในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

แบ่งแยกบัส

การแบ่งแยกบัสในสถานีไฟฟ้าให้เป็น 2 บัส หรือมากกว่านั้น จะช่วยให้ค่าความต้านทานในระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้ระดับกระแสลัดวงจรในระบบมีค่าลดลง

วิธีการนี้เมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ มีข้อดีคือราคาต่ำกว่า แต่มีข้อจำกัดที่มากกว่า เพราะวิธีนี้ส่งผลกระทบต่อกับโหลดในระบบ

แบ่งแยกระบบ (Splitting the network)

การทำแบ่งแยกระบบจะต้องหาตำแหน่งในการแบ่งแยกที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ระบบยังรักษาความสมดุลของกำลังไฟฟ้าด้านการผลิตและความต้องการไฟฟ้าไว้ได้ และต้องสอดคล้องกับข้อบังคับด้านขีดจำกัดของสายส่งอีกด้วย หากระบบส่งไฟฟ้ายังมีขนาดใหญ่มากขึ้น ความยากและซับซ้อนในการแก้ปัญหาที่ยังมีมากยิ่งขึ้น

วางแผนระบบส่งใหม่

ในปัจจุบันนี้ระบบส่งไฟฟ้าในประเทศคูเวตใช้สายส่งกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 275 kV และ 132 kV ซึ่งจากการศึกษาและวางแผนการลดระดับกระแสลัดวงจร พบว่าวิธีการสร้างสายส่งกำลังไฟฟ้าในระดับแรงดันที่สูงขึ้น สามารถลดกระแสลัดวงจรได้ดี และมีความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์ โดยสายส่งที่วางแผนจะสร้างเพิ่มขึ้นอยู่ที่ระดับแรงดัน 400 kV ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่สูงขึ้นจากเดิม

วิธีการที่ประเทศคูเวตจะใช้ในอนาคตเพื่อการลดทอนกระแสลัดวงจรคือ การวางแผนสร้างสายส่งไฟฟ้าในระดับแรงดันที่สูงขึ้นเพิ่ม ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ระดับกระแสลัดวงจรมีน้อยลง และไม่เกินระดับการป้องกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบ

3.4 วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในประเทศไทย

จากวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรที่มีอยู่ในปัจจุบันที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าในหลายๆ วิธีไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลได้ โดยปัญหาอุปสรรคที่สำคัญ ดังนี้

1. ระดับแรงดันการที่ใช้งานที่สูงกว่า 230 kV และหลายๆ เทคโนโลยียังอยู่ในระหว่างการศึกษาและพัฒนา จึงยังไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรม
2. ข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่ในบริเวณกรุงเทพฯ ที่ไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมที่มีขนาดใหญ่ได้

จากเหตุผลดังกล่าววิธีการปรับปรุงโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการแบ่งแยกบัส การเปิดวงจรสายส่ง และการ By-pass วายส่ง เป็นวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรที่ กฟผ. นำมาใช้ในทางปฏิบัติ โดยอาศัยหลักการเลือกตำแหน่งที่มีกำลังผลิตมากที่สุดในระบบเป็นบริเวณที่จะทำการปรับปรุงโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการแบ่งแยกบัส ซึ่ง กฟผ. มีแผนการ

ที่จะทำการแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และสถานีไฟฟ้าพระนครใต้ เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งหลักการดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดปัญหามีขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนมาก รวมไปถึงการพิจารณาการ By-pass ในบริเวณที่มีกระแสลัดวงจรมาก เช่น บริเวณสถานีรังสิต เป็นต้น

การคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าภายหลังจากการปรับปรุงโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้า ควบคู่ไปกับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในระบบด้วย ดังนั้นคณะนักวิจัยจึงนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงในระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีปรับปรุงโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยการแบ่งแยกบัส การเปิดวงจรสายส่ง และการ By-pass สายส่ง

3.4.1 การประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัส

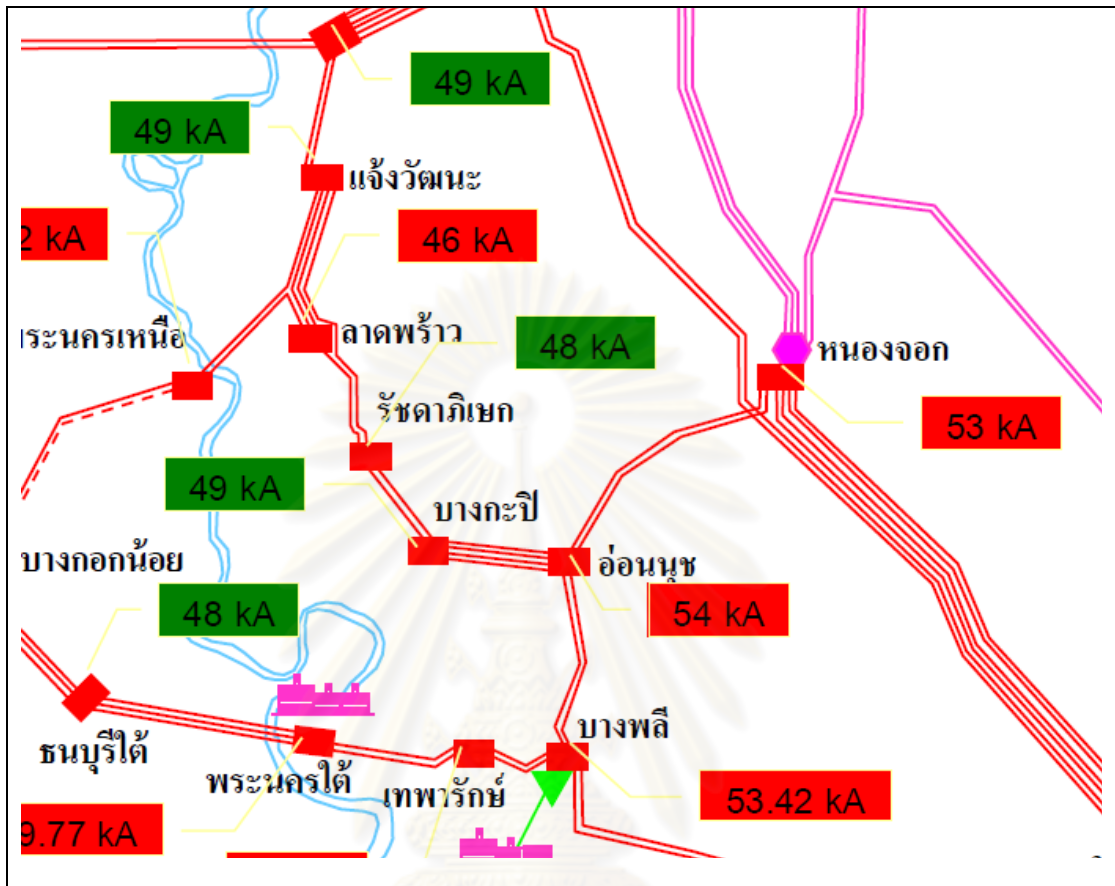
การแบ่งแยกบัสเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ใช้กันหลาย ๆ ประเทศ ใช้เงินลงทุนไม่สูงมากและมีความเชื่อถือได้สูง อย่างไรก็ตาม ควรนำการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส การส่งผ่านกำลัง ความมั่นคงของระบบ (Contingency) และความเชื่อถือได้ของระบบ (Reliability) ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยกบัส มาร่วมพิจารณาหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม ซึ่งถือเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบไม่เชิงเส้นที่มีความซับซ้อน จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม แต่ข้อจำกัดที่สำคัญคือ วิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับระบบของประเทศไทยได้อย่างจำกัดเนื่องจากในระบบมีบริเวณที่สามารถทำการแบ่งแยกบัสได้เพียงไม่กี่จุด

3.4.2 การประยุกต์ใช้วิธีการเปิดวงจรสายส่ง

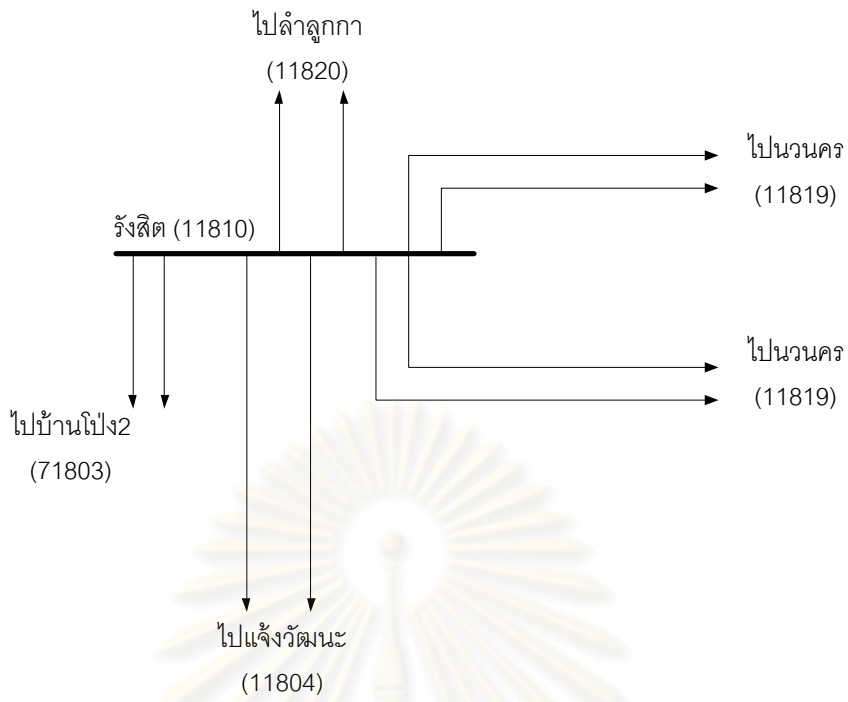
การเปิดวงจรสายส่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะสั้น และในกรณีที่ถูกเงิน โดยการเปิดวงจรสายส่งสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และไม่ใช้ต้นทุนในการแก้ปัญหา อย่างไรก็ตาม เปรียบเสมือนการหายไปของวงจรสายส่ง ซึ่งทำให้ภาพรวมของระบบดูอ่อนแอลง ดังนั้นในการพิจารณาเปิดวงจรสายส่ง ต้องคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นที่สามารถยอมรับได้ด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาประยุกต์ใช้ แต่ข้อดีที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบ่งแยกบัส คือมีตัวเลือกหรือบริเวณที่สามารถเปิดวงจรได้มากกว่า

ตัวอย่าง การประยุกต์ใช้การเปิดวงจรสายส่งทางการไฟฟ้า ได้ดำเนินการเปิดวงจรสายส่ง tie line ที่ระดับแรงดัน 230 kV ระหว่าง สถานีไฟฟ้าบางกะปิ และสถานีไฟฟ้ารัชดาภิเษก และระหว่าง

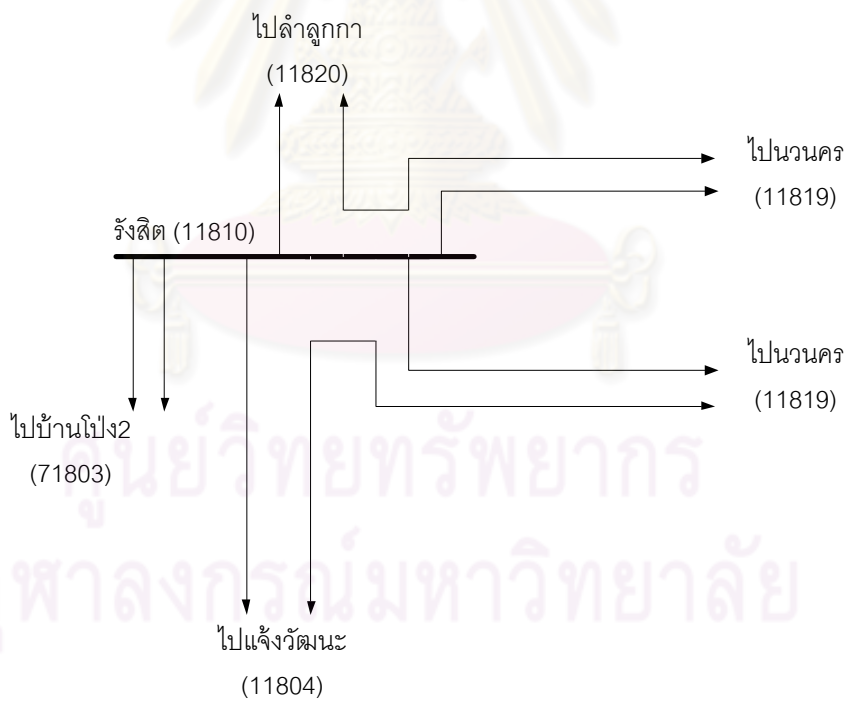
สถานีไฟฟ้ารัชดาภิเษกและสถานีไฟฟ้าลาดพร้าว เป็นต้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวแต่เมื่อระบบไฟฟ้ามีการขยายตัวขึ้นตามความต้องการไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 ตามลำดับ



รูปที่ 3.16 ระบบก่อนการพิจารณาเปิดวงจร



ก) ระบบก่อนทำการ By-pass
บริเวณรังสิต



ข) ระบบหลังทำการ By-pass
บริเวณรังสิต

รูปที่ 3.18 ระบบที่ทำการ By-pass สายส่ง

บทที่ 4

การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร

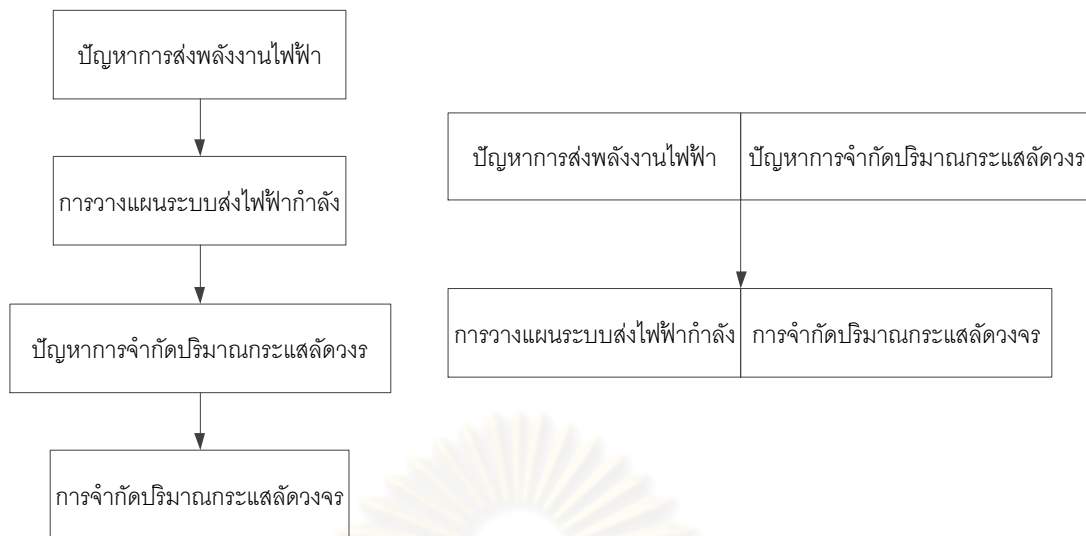
ในบทนี้จะกล่าวถึงการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า ร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยจะเริ่มจากการกล่าวถึงรูปแบบของปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร และการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยวิธีที่นำเสนอ คือ การติดตั้ง CLR จากนั้นจะกล่าวถึงการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการแก้ไขปัญหาโดยการประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม

4.1 ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่ง ร่วมกับการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยวิธีที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า โดยจะเริ่มจากการแสดงปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้า ในการพิจารณาเรื่องการไหลของกำลังไฟฟ้า ประกอบกับการพิจารณาเรื่องการเพิ่มขึ้นกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ต้องการ โดยเพิ่มทางเลือกในการแก้ไขปัญหากระแสลัดวงจรโดยการติดตั้ง CLR แทนการเปิดวงจรสายส่งในกรณีที่มีการละเมิดเงื่อนไขกระแสลัดวงจร

4.1.1 การพิจารณาปัญหา

โดยทั่วไปการศึกษา และในทางปฏิบัติ การพิจารณาปัญหาในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าเพื่อแก้ไขปัญหาในการส่งกำลังไฟฟ้า อันเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าที่มีการเพิ่มมากขึ้น เป็นเรื่องที่มีความละเอียดและซับซ้อน โดยมักจะพิจารณาแยกออกจากการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรมานั้นจะถูกนำมาคิดหลังจาก การวางแผนระบบส่งไฟฟ้ากำลังเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 4.1 ก) ซึ่งเป็นแนวคิดที่ง่ายในทางปฏิบัติแต่อาจไม่ใช่วิธีการแก้ไขปัญหาทั้ง 2 สองสิ่งที่เหมาะสม แตกต่างจากการพิจารณาปัญหาในเรื่องการวางแผนระบบส่งไปพร้อมกับการพิจารณาปัญหาการจำกัดกระแสลัดวงจร ดังรูปที่ 4.1 ข) ถึงแม้จะซับซ้อนและใช้เวลานานกว่า แต่นำมาซึ่งคำตอบที่มีความครอบคลุมและรอบคอบมากยิ่งขึ้นอีกทั้งยังไม่ต้องสูญเสียสายส่งไปในการเปิดวงจรเพื่อแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าโดยเปล่าประโยชน์



ก) การแก้ไขปัญหาโดยทั่วไป

ข) การแก้ไขปัญหาโดยวิธีที่นำเสนอ

รูปที่ 4.1 การแก้ไขปัญหาโดยวิธีที่นำเสนอ

ในการคัดเลือกสายส่งโดยการสุ่มสายส่งแต่ละวงจรเพื่อนำมาใช้เป็นแผนในการก่อสร้างสายส่งเพิ่มแล้วนำมาพิจารณาแต่ละเงื่อนไขที่กำหนดนั้นถึงแม้ว่าจะเป็นวิธีที่รอบคอบและละเอียดก็ตาม แต่นำมาซึ่งการสูญเสียเวลาในการคำนวณจำนวนมหาศาล

ยกตัวอย่างเช่น ระบบที่ใช้ในการทดสอบมีสายส่งทางเลือกทั้งหมดทั้งหมด 50 วงจร จะต้องใช้จำนวนรอบหรือเหตุการณ์ในการพิจารณาทั้งหมด เป็น 2^{50} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,125.89 ล้านล้านรอบ

นอกจากนั้นหากนำหลักการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการติดตั้ง CLR เพิ่มโดยเป็นการพิจารณาเลือกตำแหน่งรวมถึงขนาดของ CLR ที่ทำการติดตั้งร่วมกับการพิจารณาการวางแผนเพิ่มสายส่งเข้าไปด้วยจะทำให้การพิจารณา การวางแผนสายส่งนั้นมีความยากและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

ยกตัวอย่างเช่น ระบบที่ใช้ในการทดสอบมีสายส่งทางเลือกทั้งหมด 50 วงจร และมีตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้ง CLR 5 ตำแหน่ง จะต้องใช้จำนวนรอบหรือเหตุการณ์ในการพิจารณาทั้งหมดที่มากกว่าเดิมรวมทั้งในแต่ละตำแหน่งยังสามารถที่จะพิจารณาเลือกขนาดของ CLR ได้หลายขนาดอีก นับว่าเป็นการพิจารณาคำตอบที่ต้องใช้เวลา และซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

โดยที่ปัญหาในการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรนั้น เป็นปัญหาการหาแผนก่อสร้างสายส่ง รวมไปถึงหาตำแหน่งและขนาดที่ทำการติดตั้ง CLR ให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

เพื่อให้การวางแผนมีประสิทธิภาพ และครอบคลุมกับขอบเขตเงื่อนไขต่างๆ จึงจำเป็นต้องมีการนำวิธีทางคณิตศาสตร์มาช่วย ซึ่งในที่นี้คือ วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม (Genetic algorithm) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสายส่งน้อยที่สุดรวมถึงสะท้อนการเปลี่ยนแปลงระบบน้อยที่สุดในกรณีของการเปิดวงจร และการ By-pass

4.2 การจำกัดกระแสลัดวงจรโดยวิธีที่นำเสนอ

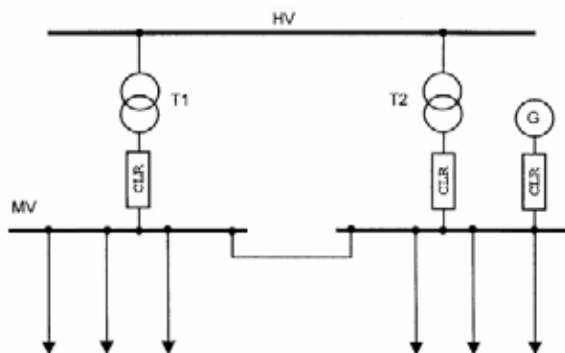
จากการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรทั้ง 3 วิธีในบริเวณกรุงเทพมหานครที่กล่าวไปในบทที่ 3 ได้แก่ การแบ่งแยกบัส การเปิดวงจร และการ By-pass สายส่ง ซึ่งถือว่าการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรที่สามารถลดปริมาณกระแสลัดวงจรลงได้ แต่ถือว่าการพิจารณาการแก้ไขปัญหาระยะสั้น และในกรณีฉุกเฉินเท่านั้น เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือ น้อย อีกทั้งยังสะท้อนปัญหาในเรื่องการสูญเสียของสายส่งในกรณีของการแก้ไขโดยการเปิดวงจร ออกที่สะท้อนถึงการสูญเสียสายส่งที่ได้มีการก่อสร้างไว้แล้ว

ในหัวข้อนี้นำเสนอการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้า โดยการพิจารณานำ CLR มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาโดยการประยุกต์ใช้ CLR โดยพิจารณาติดตั้งระหว่างสายส่งให้เหมาะสม เพื่อเพิ่มเป็นทางเลือกในการแก้ไขปัญหากรณีที่เกิดแผนการขยายระบบส่งไฟฟ้ามีปัญหา

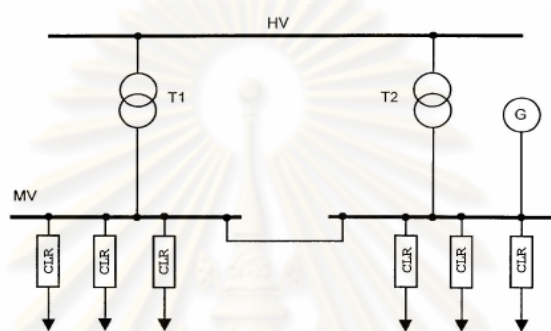
4.2.1 การประยุกต์ใช้ CLR

วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการประยุกต์ใช้ CLR เป็นวิธีการที่ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้า โดยได้นำเสนอไปแล้วในบทที่ 3

วิธีการติดตั้ง CLR มีการนำไปแก้ปัญหามาจริงในแก้ไขปัญหากระแสลัดวงจรในหลายประเทศประเทศ โดยมีการติดตั้งหลายแบบ แต่ลักษณะการติดตั้งที่ถูกนำไปใช้งานประเภทที่ ถูกนำมาพิจารณาในหัวข้อนี้ คือการติดตั้งในตำแหน่งที่เชื่อมโยงระหว่างบัสที่แรงดันต่างกัน การติดตั้งในตำแหน่งที่เชื่อมต่อบริเวณระหว่างสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 การติดตั้ง CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสที่แรงดันต่างกัน



รูปที่ 4.3 การติดตั้ง CLR เชื่อมโยงระหว่างสายส่ง

การติดตั้ง CLR ในลักษณะนี้ เป็นการทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้กระแสลัดวงจรลดลง แล้วยังทำให้ไม่ต้องสูญเสียสายส่งไปในการเปิดวงจร ซึ่งเป็นสิ่งที่มีประโยชน์กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปิดวงจรแบบถาวร ทำให้ในการพิจารณาเงื่อนไขบังคับการทำงานของระบบเมื่อทำการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงมีความยืดหยุ่นในการพิจารณา มากกว่า และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ในแง่ความมั่นคงของระบบ

การติดตั้งทั้งสองแบบที่กล่าวไปสามารถถึงพิจารณาข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันได้ดังนี้

การติดตั้ง CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสที่แรงดันต่างกัน

ข้อดีเมื่อเปรียบเทียบการติดตั้ง CLR กับการเปิดวงจร

1. สามารถช่วยในการแบ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เมื่อมีการติดตั้ง CLR แทนการเปิดวงจร ที่ตำแหน่งที่ติดตั้ง CLR ตามรูปที่ 4.2
2. สามารถจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรได้ตามต้องการที่จุดนั้นๆ เช่น สามารถจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรที่ไหลมาจากหม้อแปลงตัว T1 โดยขึ้นอยู่กับขนาดของ CLR ที่พิจารณาแต่ในกรณีการเปิดวงจร นั้นกระแสลัดวงจรจะถูกจำกัดไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่งตลอด

ข้อเสียเมื่อเปรียบเทียบการติดตั้ง CLR กับการเปิดวงจร

1. เนื่องจากในสภาวะปกติจะมีกำลังไหลผ่าน CLR ที่เปรียบเสมือนเป็นตัวต้านทานแบบหนึ่ง จึงเกิดกำลังสูญเสียขึ้นในระบบ
2. มีค่าใช้จ่ายที่มากกว่า รวมไปถึงต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้ง

การติดตั้ง CLR เชื่อมโยงระหว่างสายส่ง

ข้อดีเมื่อเปรียบเทียบการติดตั้ง CLR กับการเปิดวงจร

1. สามารถช่วยในการแบ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เมื่อมีการติดตั้ง CLR แทนการเปิดวงจรที่ตำแหน่งที่ติดตั้ง CLR ตามรูปที่ 4.3
2. สามารถจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรได้ตามต้องการที่จุดนั้นๆ เช่น สามารถจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรที่ไหลมาจากหม้อแปลงตัว T1 โดยขึ้นอยู่กับขนาดของ CLR ที่พิจารณาแต่ในกรณีการเปิดวงจร นั้นกระแสลัดวงจรจะถูกจำกัดไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่งตลอด

ข้อเสียเมื่อเปรียบเทียบการติดตั้ง CLR กับการเปิดวงจร

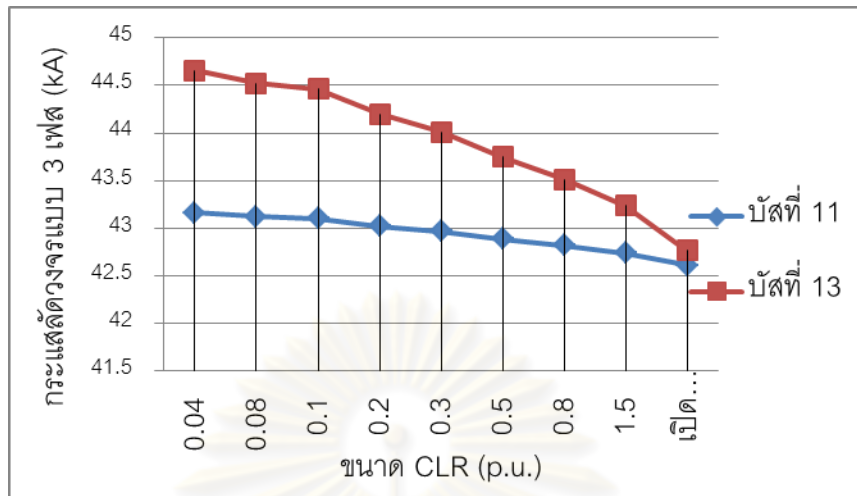
1. เนื่องจากในสภาวะปกติจะมีกำลังไหลผ่าน CLR ที่เปรียบเสมือนเป็นตัวต้านทานแบบหนึ่ง จึงเกิดกำลังสูญเสียขึ้นในระบบ
2. มีค่าใช้จ่ายที่มากกว่า รวมไปถึงต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้ง

ข้อดีของการติดตั้ง CLR แบบเชื่อมโยงระหว่างสายส่งที่ดีกว่าแบบเชื่อมโยงระหว่างบัสที่แรงดันต่างกัน คือความสะดวกในการจัดการควบคุมที่สามารถควบคุมการเชื่อมต่อเป็นจุดที่พิจารณานั้นๆได้ แต่จำเป็นต้องอาศัยเงินลงทุนที่มากกว่า เช่นหากต้องการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรที่มาจากหม้อแปลงตัวที่ T1 ตามรูปที่ 4.3 การติดตั้งแบบเชื่อมโยงระหว่างสายส่งจำเป็นต้องติดตั้ง CLR หลายตัว

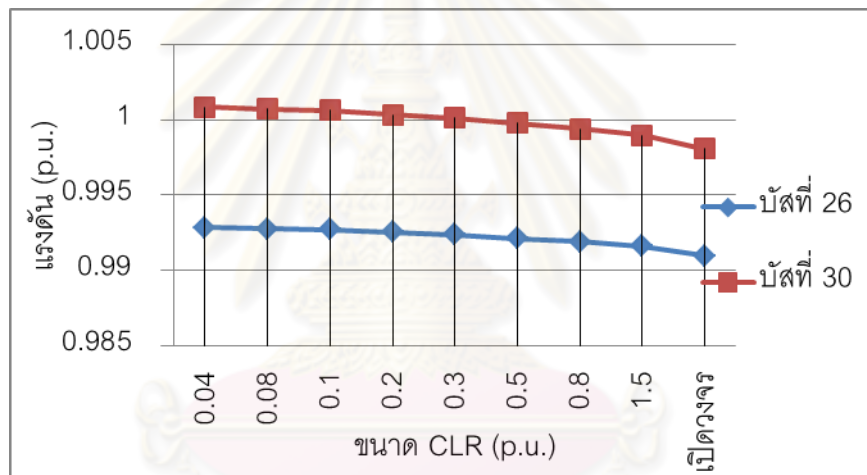
4.2.2 ผลกระทบในการประยุกต์ใช้ CLR

ในการทำการปรับเปลี่ยนขนาดของ CLR ที่เชื่อมต่อสายส่งระหว่างบัส โดยทำการทดสอบติดตั้งไปสายส่งในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส พบว่าส่งผลต่อกระแสลัดวงจรที่บัส คือ เมื่อทำการเพิ่มขนาดของ CLR ขึ้นส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่บัสมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) ซึ่งสอดคล้องตามหลักการที่ขนาดของ CLR ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของอิมพีแดนซ์ในระบบ และเมื่อขนาดของ CLR มีค่าเป็นอนันต์จะเปรียบเสมือนเป็นการเปิดวงจร เมื่อพิจารณาผลของแรงดันตามรูปที่ 4.4 (ข) พบว่าค่าแรงดันที่บัสมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มขนาดของ CLR ที่เชื่อมต่อระหว่างสาย ทำให้การพิจารณาต้องมีการเลือกขนาดของ CLR อย่างรอบคอบเพื่อป้องกันการที่แรงดันตกเกินค่าที่ใช้ในทางปฏิบัติ (0.98-1.05 p.u.) อีกทั้งหากพิจารณาในแง่ของ

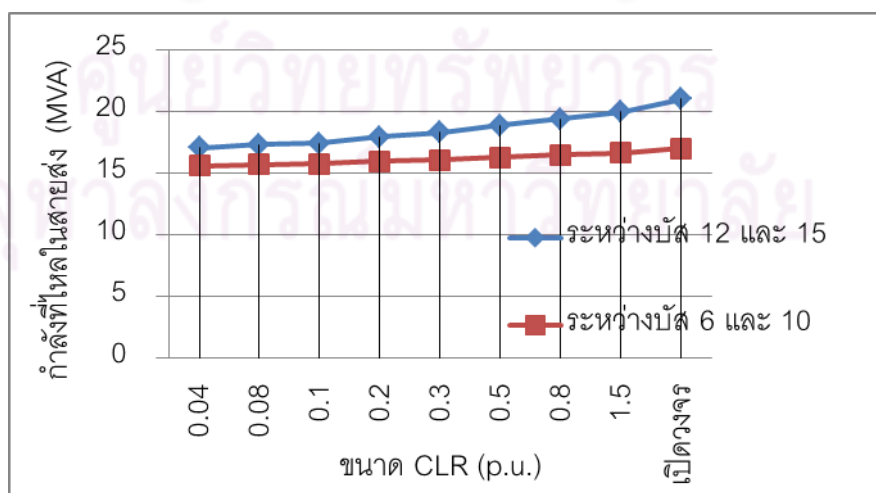
กำลังที่ไหลในสายส่ง ตามรูปที่ 4.4 (ค) พบว่าเมื่อขนาดของ CLR มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้กำลังที่ไหลในสายส่งบางวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



ก) กระแสลัดวงจร



ข) แรงดัน



ค) กำลังที่ไหลในสายส่ง

รูปที่ 4.4 ผลกระทบเมื่อติดตั้ง CLR

4.3 การแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่ง ร่วมกับการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยประยุกต์ใช้วิธีทางพันธุกรรม

การแก้ไขปัญหาโดยวิธีทางพันธุกรรม เป็นวิธีการแก้ปัญหาค่าขีดสุดแบบสุ่ม (Stochastic optimization) ประเภทหนึ่งที่อาศัยหลักการถ่ายทอดทางพันธุกรรมทางธรรมชาติเพื่อหาค่าเหมาะสมโดยรวม (Global optimum) โดยเริ่มจากการสมมติจุดคำตอบขึ้นมาหลายๆจุด (Population of solutions) แล้วใช้หลักการค้นหาจุดที่เหมาะสมที่สุดซึ่งมีโอกาสที่จะอยู่รอด (Survival of the fittest) มากที่สุด เพื่อไปสู่การหาคำตอบที่ดียิ่งขึ้นในแต่ละรุ่นของการถ่ายทอด (Generation) โดยที่ในแต่ละรุ่นของการถ่ายทอดจะมีการประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness) หรือความแข็งแรงของคำตอบแต่ละคำตอบแล้วพิจารณาเลือกคำตอบใหม่จากค่าความเหมาะสมนี้ โดยอาศัยกระบวนการในการคัดเลือกสายพันธุ์ โดยวิธีต่างๆ ประกอบด้วย การคัดเลือก การข้ามสายพันธุ์ และการผ่าเหล่า โดยที่คำตอบแต่ละคำตอบประกอบไปด้วยสตริง (String) ของตัวแปรที่ถูกกลรหส์ไว้เรียกว่าโครโมโซม (Chromosomes)

ความแตกต่างของวิธีการแก้ปัญหาขีดสุดโดยวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมกับวิธีการแก้ปัญหาขีดสุดวิธีอื่นๆ มีดังนี้

- 1) เป็นวิธีที่สะดวกในการแก้ปัญหากับตัวแปรได้หลายชนิดโดยไม่จำเป็นต้องเป็นตัวแปรชนิดต่อเนื่อง เนื่องจาก ใช้รหัสของตัวแปรเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาค่าขีดสุดแทนที่จะใช้ค่าของตัวแปรโดยตรง
- 2) เป็นวิธีที่คำตอบที่ได้เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมโดยรวม เนื่องจากขั้นตอนวิธีพันธุกรรม เป็นวิธีการแก้ปัญหาค่าขีดสุดที่หาจากจุดเริ่มต้นหลายๆ
- 3) สามารถใช้กับฟังก์ชันเป้าหมายได้ทุกชนิด ไม่จำเป็นต้องต่อเนื่องหรือหาอนุพันธ์ได้ เนื่องจาก ใช้ข้อมูลเพียงแค่ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายเท่านั้น

4.3.1 การสร้างประชากรเริ่มต้น (Initialization)

การสร้างประชากรเริ่มต้น คือ การหารูปแบบของคำตอบที่เป็นไปได้โดยไม่ละเมิดเงื่อนไขบังคับต่างๆในรูปแบบของโครโมโซมขึ้นมาจำนวนหนึ่งโดยการสุ่ม เพื่อให้กระบวนการทางพันธุกรรมสามารถดำเนินต่อไปได้

นอกจากนี้การหาในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลัง ร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรไฟฟ้าที่เป็นไปได้นั้นจะต้องคำนึงถึงเวลาในการคำนวณซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับจำนวนรูปแบบที่ต้องทำการวิเคราะห์ จากเหตุผลดังกล่าวการกำหนดประชากรเริ่มต้นที่ดีจึงต้องมีค่าไม่มากจนทำให้เสียเวลาในการคำนวณเริ่มต้นมาก แต่ก็ต้องไม่น้อยจนเกินไปเพื่อให้มีการ

ผสมสายพันธุ์ที่หลากหลาย โดยที่การพิจารณาเลือกประชากรเริ่มต้นนั้นถือว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความจำเป็นที่นำไปสู่คำตอบในเวลาแตกต่างกันไป

4.3.2 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function)

ฟังก์ชันเป้าหมายเป็นตัวหลักในการคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อเป็นตัวชี้คุณภาพของคำตอบ ซึ่งในการคำนวณหาคำตอบโดยวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมนี้พิจารณาหาค่าที่น้อยที่สุด หรือเป็นการ minimize ปัญหาซึ่งในที่นี้คือค่าใช้จ่ายในการวางแผนการขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรที่สามารถสร้างในรูปสมการคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (4.1)

$$\text{Minimize } V = \sum (c_{i,j} * s_{i,j}) + \sum (CLR_k * h_k) \quad (4.1)$$

โดยที่

V	คือ ค่าราคาในการก่อสร้างสายส่ง และแก้ปัญหากระแสลัดวงจรทั้งหมด
$c_{i,j}$	คือ ค่าราคาในการก่อสร้างสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j
$s_{i,j}$	คือ ตัวแปรจำนวนเต็มบวก แทนจำนวนของสายส่งที่จะก่อสร้างระหว่างบัส i กับ บัส j
CLR_k	คือ ราคาค่าใช้จ่ายของการติดตั้ง CLR ที่บัส k
h_k	คือ ตัวแปรจำนวนเต็มแทนสถานะ การติดตั้งของ CLR ที่บัส k

เมื่อ

$$\sum (c_{i,j} * s_{i,j}) = \text{ค่าใช้จ่ายการรวมในการก่อสร้างสายส่ง} \quad (4.2)$$

$$\sum (CLR_k * h_k) = \text{ค่าใช้จ่ายในติดตั้ง CLR เพื่อ จำกัดกระแสลัดวงจร} \quad (4.3)$$

สมการที่ (4.1) แสดงราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้างสายส่งเพิ่มรวมโดยพิจารณาในการวางแผนแบบขั้นเดียว (Single stage planning) รวมไปถึงค่าใช้จ่ายค่าหม้อแปลงในกรณีที่เป็นสายส่งที่เชื่อมต่อแรงดันที่แตกต่างกันด้วย นอกจากนี้มีการรวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง CLR เพื่อการจำกัดกระแสลัดวงจรอีกด้วย ดังสมการที่ (4.3)

4.3.3 เงื่อนไขบังคับ (Constraint)

เนื่องจากการเปิดวงจร และการ By-pass สายส่งออกย่อมส่งผลกระทบต่อปริมาณกระแสที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้นในสภาวะปกติ รวมไปถึง ผลกระทบด้านอื่นๆต่อระบบ ยกตัวอย่างเช่น

- ผลกระทบต่อสายส่ง คือ สายส่งที่มีอยู่ในระบบบางเส้นต้องรับภาระในการส่งกระแสไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกินค่าขีดจำกัดของสายส่งนั้น

- ผลกระทบของแรงดันในแต่ละบัส ซึ่งอาจก่อให้เกิดแรงดันมากกว่าหรือต่ำกว่าที่กำหนด

ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดจำเป็นต้องมีการพิจารณา เงื่อนไขบังคับต่างๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดความเหมาะสมของคำตอบที่ได้ หรือเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของคำตอบนั้น กล่าวอีกนัยหนึ่งเป็นตัวแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสม และความรอบคอบของแผนในการแก้ไขปัญหาการวางแผนสายส่ง โดยการหาคำตอบโดยวิธีที่นำเสนอประกอบไปด้วยเงื่อนไขบังคับดังต่อไปนี้

1. เงื่อนไขรูปร่างของโครงข่าย (Network configuration)

2. เงื่อนไขความสมดุลของโหลด (Load balance)

$$P_i = P_{G_i} - P_{D_i} - P_{loss} \quad (4.4)$$

$$Q_i = Q_{G_i} - Q_{D_i} - Q_{loss} \quad (4.5)$$

3. เงื่อนไขขีดจำกัดการจ่ายกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \quad (4.6)$$

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max} \quad (4.7)$$

4. เงื่อนไขขีดจำกัดเรื่องแรงดันในแต่ละบัส

$$|LV|_i \leq |V|_i \leq |UV|_i \quad (4.8)$$

5. เงื่อนไขพิคัดของกระแสลัดวงจรในแต่ละบัส

$$|I_{f,i}| \leq WC_i \quad (4.9)$$

6. เงื่อนไขพิคัดของกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร

$$S_{j,k} \leq FL_{j,k} \quad (4.10)$$

7. ข้อกำหนดอื่นๆ

$$0 \leq s_{ij} \leq s_{ij}^{\max} \quad (4.11)$$

$$ij \in \mathcal{E} \cup \mathcal{C}; i \in \mathcal{N} \quad (4.12)$$

$$k \in \mathcal{O} \quad (4.13)$$

โดยที่

P_i, Q_i คือ กำลังจริง และกำลังปรากฏที่ฉีดเข้าบัส i

P_{G_i}, Q_{G_i} คือ กำลังจริง และกำลังปรากฏที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าฉีดเข้าบัส i

P_{D_i}, Q_{D_i}	คือ กำลังจริง และกำลังปรากฏที่โหลดที่บัส i
P_{loss}, Q_{loss}	คือ กำลังจริง และกำลังปรากฏที่สูญเสีย
$P_{G_i}^{max}, Q_{G_i}^{max}$	คือ พิกัดมากที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายได้ทั้งกำลังจริง และกำลังปรากฏ
$P_{G_i}^{min}, Q_{G_i}^{min}$	คือ พิกัดน้อยสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายได้ทั้งกำลังจริง และกำลังปรากฏ
$ V _i$	คือ ขนาดของแรงดันที่บัส i (p.u.)
$ LV _i$	คือ ขนาดของแรงดันที่น้อยสุดที่บัส i (p.u.)
$ UV _i$	คือ ขนาดของแรงดันที่มากที่สุดที่บัส i (p.u.)
$ I_{f,i} $	คือ ขนาดของกระแสผิดพ่วง (กระแสลัดวงจร) ที่บัส i (A)
WC_i	คือ ขนาดของพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บัส i (A)
$S_{j,k}$	คือ กำลังที่ไหลในสายส่ง $j-k$ (MVA)
$FL_{j,k}$	คือ พิกัดของสายส่ง $j-k$ (MVA)
\mathcal{E}	คือ เซ็ตของเส้นทาง ij ที่มีสายส่งติดตั้งอยู่แล้วในระบบ
C	คือ เซ็ตของเส้นทาง ij ที่ใช้เป็นทางเลือกในการก่อสร้างสายส่ง
N	คือ เซ็ตของบัสในระบบไฟฟ้า
s_{ij}^{max}	คือ จำนวนวงจรของสายส่งที่สามารถก่อสร้างได้สูงสุดระหว่างบัส i กับบัส j
O	คือ เซ็ตของตำแหน่งที่พิจารณาสามารถติดตั้ง CLR ได้

เงื่อนไขที่แสดงด้านบนแสดงถึงกระบวนการคำนวณหาคำตอบในวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรต้องอยู่ในเงื่อนไขความปลอดภัยต่างๆด้วย โดยมีความหมายดังต่อไปนี้

รูปร่างของโครงข่าย (Network configuration)

เงื่อนไขนี้ถูกพิจารณาเป็นเงื่อนไขแรก เนื่องมาจากการปลดสายส่งบางวงจรก่อให้เกิดลักษณะระบบที่แบ่งแยกกัน (Islanding) ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการคือระบบจะแบ่งออกไปคนละส่วน ซึ่งอาจก่อให้เกิดการได้รับพลังงานไฟฟ้าไม่เพียงพอได้ในบางจุดโหลด อีกทั้งเป็นการลดภาระการคำนวณที่สำคัญอย่างหนึ่งโดยการไม่ต้องเสียเวลาพิจารณาเงื่อนไขบังคับอื่นหากละเมิดเงื่อนไขบังคับนี้

ความสมดุลของโหลด (Load balance) และ ขีดจำกัดการจ่ายกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เงื่อนไขบังคับนี้เป็นเงื่อนไขบังคับพื้นฐานกล่าวคือระบบต้องอยู่ในสถานะที่โหลดได้รับพลังงานไฟฟ้าเพียงพอ รวมไปถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเครื่องต้องไม่เกินค่าพิกัดของกำลังการผลิต

ขีดจำกัดเรื่องแรงดันในแต่ละบัส

เนื่องจากผลกระทบของการเปลี่ยนสถานะของสายส่งส่งผลกระทบต่อเรื่องแรงดัน จึงจำเป็นต้องพิจารณาเงื่อนไขแรงดันประกอบไปด้วย โดยที่ในทางปฏิบัติกำหนดไว้ที่ 0.98-1.05 p.u.

พิกัดของกระแสลัดวงจรในแต่ละบัส

พิกัดในเรื่องกระแสลัดวงจรในการวิจัยนี้ถือว่าเป็นเรื่องที่พิจารณาเป็นหลัก โดยไม่ได้เพียงแต่แสดงถึงพิกัดของอุปกรณ์ ป้องกันเพียงอย่างเดียวแต่ค่ากระแสลัดวงจรที่อาจเกิดขึ้นที่บัสใด ๆ ต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งค่านี้อาจเป็นค่าที่ทางด้านระบบแรงดันปานกลางเป็นตัวกำหนด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสลัดวงจรที่มีค่านั้นๆ ที่ระบบแรงดันสูง ส่งผลกระทบต่อระบบแรงดันปานกลาง

พิกัดของกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้น

การปลดสายส่งบางวงจรรอออกนั้นส่งผลให้ สายส่งวงจรที่เหลืออยู่ต้องแบกรับภาระการส่งพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เพื่อเป็นการป้องกันการส่งพลังงานเกินพิกัดของสายส่ง ซึ่งนำมา ซึ่งความเสียหาย จึงจำเป็นต้องพิจารณาพิกัดทางความร้อนของสายส่งร่วมด้วย

4.3.4 การประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness Value)

การประเมินค่าความเหมาะสมแต่ละค่าคำตอบที่ผ่านการถอดรหัสจากโครโมโซมในขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมจะถูกประเมินความเหมาะสมโดยทั่วไปค่าความเหมาะสมนี้จะขึ้นอยู่กับค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย สำหรับโครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ต้องการให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด นั่นคือ ต้องการให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยๆ จึงกำหนดให้ค่าความเหมาะสมมีค่าเท่ากับส่วนกลับของค่าฟังก์ชันเป้าหมายดังสมการที่ (4.14)

$$Fitness = \frac{1}{Obj.} \quad (4.14)$$

โดยที่

Fitness คือ ค่าความเหมาะสม

Obj. คือ ค่าฟังก์ชันเป้าหมาย

ค่าความเหมาะสมได้มีการปรับปรุงโดยมีค่าปรับโทษ (Penalty) มาช่วยในการคำนวณ เพื่อให้เงื่อนไขบังคับต่างๆในวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม มีบทบาทในการค้นหาค่าตอบมากขึ้น คือ นอกจากพิจารณาเพียงละเมิดหรือไม่ละเมิดเงื่อนไขบังคับเท่านั้น แต่ได้มีการให้ค่าความเหมาะสมของคำตอบที่ละเมิดหรือไม่ละเมิด เงื่อนไขบังคับใดๆ ที่แตกต่างกันไปด้วย โดยค่าเหล่านี้มาจาก

การทดลองจากการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ โดยสามารถแสดงค่าความเหมาะสมของคำตอบได้ดังสมการ (4.15)

$$Fitness = \frac{1}{Obj. + penNet + penPF + penV + penIL + penIf} \quad (4.15)$$

โดยที่

<i>Fitness</i>	คือ	ค่าความเหมาะสม
<i>Obj.</i>	คือ	ค่าฟังก์ชันเป้าหมาย
<i>penNet</i>	คือ	ค่าปรับโทษจากการพิจารณาเงื่อนไขรูปร่างของโครงข่าย
<i>penPF</i>	คือ	ค่าปรับโทษจากการพิจารณาเงื่อนไขการคำนวณ Power Flow
<i>penV</i>	คือ	ค่าปรับโทษจากการพิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดเรื่องแรงดันในแต่ละบัส
<i>penIL</i>	คือ	ค่าปรับโทษจากการพิจารณาเงื่อนไขพิกัดของกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้น
<i>penIf</i>	คือ	ค่าปรับโทษจากการพิจารณาเงื่อนไขพิกัดของกระแสลัดวงจรในแต่ละบัส

โดยค่าปรับโทษเหล่านี้นำมาช่วยในการพิจารณาความเหมาะสมของคำตอบนั้น ซึ่งนำมาใช้ในการพิจารณากระบวนการทางพันธุกรรมต่อไป

4.3.5 การคัดเลือก (Reproduction)

การคัดเลือก เป็นขั้นตอนในการเลือกการอยู่รอดของโครโมโซมแต่ละโครโมโซมในกลุ่มประชากร โดยจะพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละโครโมโซม โครโมโซมใดที่มีค่าความเหมาะสมสูงจะโอกาสที่จะอยู่รอดมาก โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำจะมีโอกาสอยู่รอดน้อย ซึ่งอธิบายได้ดังสมการที่ (4.16) โดยหลักการนี้เรียกว่า วิธีวงล้อรูเล็ตต์

$$P_i = \left(\frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \right) * 100 \quad (4.16)$$

โดยที่

f_i	คือ	เป็นค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม
n	คือ	เป็นจำนวนประชากรโครโมโซมทั้งหมด (Population Size)
P_i	คือ	โอกาสของโครโมโซมที่ถูกเลือก (Probability of Selection)

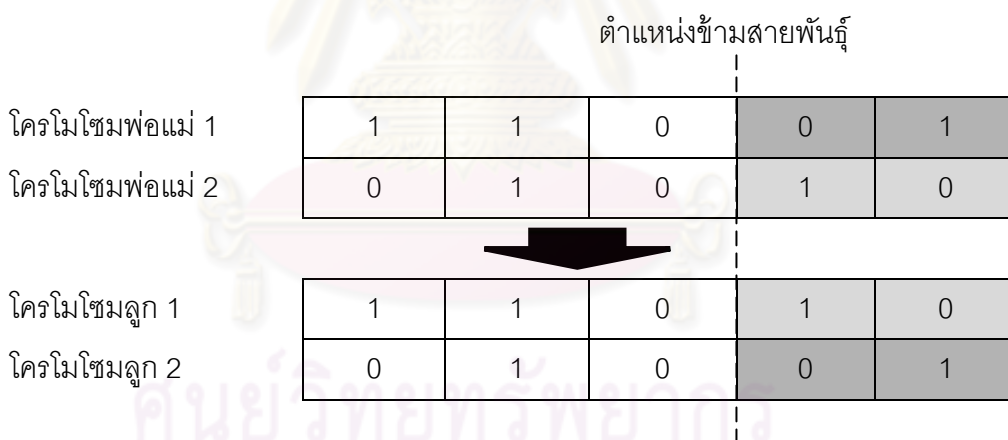
4.3.6 การข้ามสายพันธุ์ (Crossover)

การข้ามสายพันธุ์ เป็นกระบวนการในการแลกเปลี่ยนบิตระหว่างโครโมโซมคู่หนึ่งๆ โดย ซึ่งโครโมโซมคู่หนึ่งที่สุ่มขึ้นมาเรียกว่า โครโมโซมพ่อแม่ (Parent Chromosomes) หลังจากนั้นจะมี

การพิจารณาการแลกเปลี่ยนกันในบางตำแหน่งเพื่อสร้างโครโมโซมตัวใหม่ ๆ ขึ้นมาด้วยความน่าจะเป็นค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ (Probability of crossover; P_c)

โดยกระบวนการข้ามสายพันธุ์มีขั้นตอนดังนี้

- 1) สุ่มโครโมโซมเพื่อนำมาพิจารณาการข้ามสายพันธุ์ (โครโมโซมพ่อแม่) หนึ่งคู่
- 2) สุ่มตัวเลขในช่วง 0 ถึง 1 ขึ้นมาเป็นความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ ถ้าตัวเลขที่สุ่มนี้มีค่าสูงกว่าความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ก็จะไม่ทำการข้ามสายพันธุ์ แต่ถ้าเลขที่สุ่มขึ้นมานี้มีค่าต่ำกว่าความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ก็จะทำการข้ามสายพันธุ์
- 3) สุ่มตำแหน่งในการข้ามสายพันธุ์ (Cross site) ขึ้นมา เพื่อทำการแลกเปลี่ยนบิตในตำแหน่งที่อยู่หลังตำแหน่งนี้เป็นต้นไปเพื่อให้กำเนิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมาเรียกว่าโครโมโซมลูก ตามรูปที่ 4.5
- 4) วนทำซ้ำตามข้อ 1) จนได้โครโมโซมชุดใหม่ขึ้นมาครบตามจำนวนประชากรที่กำหนด



รูปที่ 4.5 การข้ามสายพันธุ์พื้นฐาน

การข้ามสายพันธุ์ด้วยวิธีนี้เรียกว่า การข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียว (Single point crossover) โดยการข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดี่ยวดังกล่าวจะให้ผลที่ไม่ดีนัก เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น และมีจำนวนตัวแปรควบคุมมากขึ้น

ด้วยเหตุผลที่กล่าวไปได้มีการปรับปรุงการข้ามสายพันธุ์ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ (Uniform Crossover) นำมาประยุกต์ในวิทยานิพนธ์นี้ โดยเป็นวิธีที่การข้ามสายพันธุ์มีโอกาสเกิดขึ้นที่ทุกบิตในโครโมโซมเท่าเทียมกัน ไม่ขึ้นกับตำแหน่งข้ามสายพันธุ์หรือความยาวบิตของโครโมโซมพ่อแม่

โดยกระบวนการข้ามสายพันธุ์ด้วยวิธีนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้


- 1) สุ่มโครโมโซมเพื่อนำมาพิจารณาการข้ามสายพันธุ์ (โครโมโซมพ่อแม่) หนึ่งคู่
- 2) สุ่มเลขระหว่าง 0 ถึง 1 ขึ้นมาเป็นความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ โดยถ้าเลขสุ่มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ก็จะทำการข้ามสายพันธุ์ แต่ถ้าเลขสุ่มดังกล่าวสูงกว่าความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ก็จะไม่ทำการข้ามสายพันธุ์ เป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (4.17)
- 3) การสุ่มบิตโครโมโซม 0 ถึง 1 ที่มีความยาวเท่ากับความยาวบิตของโครโมโซมพ่อแม่ขึ้นมาชุดหนึ่ง โดยเป็นตัวชี้การแลกเปลี่ยนบิตของโครโมโซมพ่อแม่ คือถ้าตำแหน่งใดของบิตโครโมโซมที่สุ่มขึ้นมาเป็น 1 จะทำการแลกเปลี่ยนบิตตำแหน่งนั้น ถ้าตำแหน่งใดของบิตสตรงที่สุ่มขึ้นมาเป็น 0 บิตตำแหน่งนั้นเหมือนเดิม ดังรูปที่ 4.6

$$P_R \leq P_C \tag{4.17}$$

โดยที่

P_R คือ ความน่าจะเป็นที่ถูกสุ่มขึ้นมาในแต่ละคู่โครโมโซม

P_C คือ ความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์

โครโมโซมพ่อแม่1	0	1	0	0	1
โครโมโซมพ่อแม่2	1	0	1	1	0
โครโมโซมสุ่ม	1	0	0	1	1
					
โครโมโซมลูก1	1	1	0	1	0
โครโมโซมลูก2	0	0	1	0	1

รูปที่ 4.6 การปรับปรุงการข้ามสายพันธุ์ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์

4.3.7 การผ่าเหล่า (Mutation)

การผ่าเหล่า เป็นกระบวนการที่ป้องกันการลู่เข้าก่อนกำหนด และไม่ให้สูญเสียข้อมูลที่สำคัญไปในระหว่างกระบวนการถ่ายทอด โดยกำหนดความน่าจะเป็นค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า (Probability of mutation; P_M)

โดยกระบวนการผ่าเหล่ามีขั้นตอนดังนี้

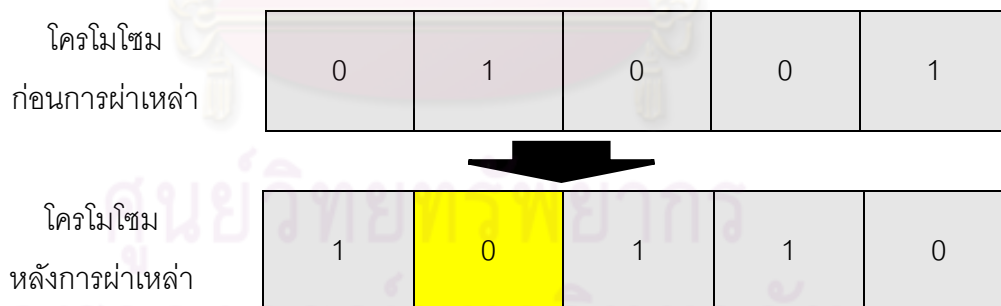
- 1) สุ่มเลขในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 เป็นค่าความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า ที่ทุกๆบิตของโครโมโซม
- 2) เปรียบเทียบเลขที่สุ่มแต่ละบิตกับความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า ถ้าเลขที่สุ่มตำแหน่งใดมีค่าสูงกว่าความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่าบิตตำแหน่งนั้นจะไม่ทำการผ่าเหล่า แต่ถ้าเลขที่สุ่มในบิตตำแหน่งใดมีค่าต่ำกว่าความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่าจะทำการผ่าเหล่าที่บิตตำแหน่งนั้น โดยเปลี่ยนบิตที่ตำแหน่งนั้นจาก 0 เป็น 1 หรือ 1 เป็น 0 เป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (4.18)

$$P_{R_i} \leq P_M \quad (4.18)$$

โดยที่

P_{R_i} คือ ความน่าจะเป็นที่ถูกสุ่มขึ้นมาในแต่ละบิตโครโมโซม

P_M คือ ความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า



รูปที่ 4.7 การผ่าเหล่า

4.3.8 การเลือกโครโมโซมเพื่อรักษาไว้ในรุ่นถัดไป

การเลือกโครโมโซมเพื่อรักษาไว้ในรุ่นถัดไป เพื่อเป็นหลักประกันว่าโครโมโซมที่ดีที่สุดในรอบถัดไปจะดีกว่าในรอบก่อนหน้านี้เสมอโดยการเก็บโครโมโซมที่ดีที่สุดในแต่ละรอบของการถ่ายทอดเอาไว้ในรอบถัดไป เนื่องจากกระบวนการทางพันธุกรรมเป็นกระบวนการที่อาศัยความ

น่าจะเป็นในการถ่ายทอดประชากรจากรุ่นหนึ่งไปยังอีกรุ่นหนึ่ง จึงไม่มีหลักประกันว่าในรอบถัดไป จะมีประชากรที่ดีกว่ารุ่นก่อนหน้า และในบางกรณีอาจสูญเสียโครโมโซมที่ดีไปในระหว่างการถ่ายทอด หลักการในการเลือกโครโมโซมเพื่อรักษาไว้ในรุ่นถัดไป นี้เรียกว่า อิลิติสซึม (Elitism)

4.3.9 เงื่อนไขการหยุด

เงื่อนไขการหยุดในวิธานิพนธ์ฉบับนี้เงื่อนไขการหยุดของขั้นตอนวิธีพันธุกรรมก็คือ หยุดหาค่าตอบเมื่อครบจำนวนรุ่นการถ่ายทอดสูงสุดที่กำหนดเอาไว้ หรือค่าฟังก์ชันเป้าหมายในแต่ละรุ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงครบจำนวนครั้งที่กำหนดไว้

สรุปขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมมีดังนี้

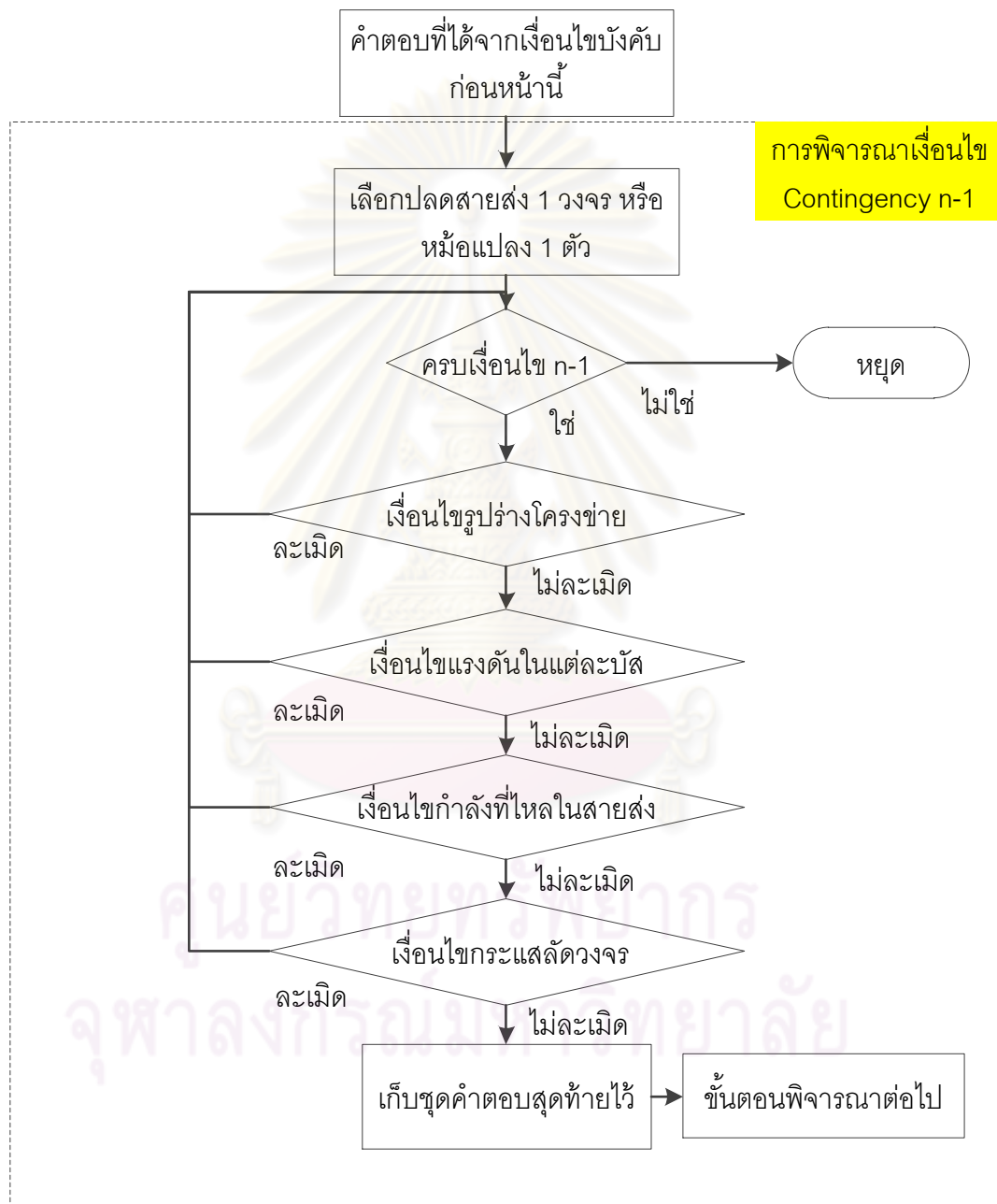
- 1) กำหนดประชากรเริ่มต้นโดยการสุ่ม ภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ
- 2) หาค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว จากขั้นตอนที่อธิบายในหัวข้อ 4.3.4
- 3) จากประชากรทั้งหมด จะเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุด (มีความเหมาะสมมากที่สุด) เก็บเอาไว้
- 4) นำโครโมโซมที่ไม่ได้รับคัดเลือกไปผ่านขั้นตอนการคัดเลือก การข้ามสายพันธุ์และการผ่าเหล่า โดยให้เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับต่างๆ
- 5) นำโครโมโซมจากขั้นที่ 3) และขั้นที่ 4) มารวมกัน
- 6) ย้อนไปทำขั้นที่ 2) จนผ่านเงื่อนไขการหยุดที่กำหนดไว้

4.3.10 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของระบบ (Contingency analysis) [43]-[47]

เนื่องมาจากปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการวางแผนของระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) ที่เป็นตัวสะท้อนความมีประสิทธิภาพที่ดีอย่างหนึ่ง ในการวิจัยนี้จึงนำเอาหลักการ การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของระบบ (Contingency Analysis) มาเป็นเครื่องมือช่วยในการวางแผนการปลดสายส่งบางวงจร ให้มีความน่าเชื่อถือที่มากขึ้น โดยเพิ่มเป็นเงื่อนไขบังคับอีกตัวหนึ่ง

การวิเคราะห์เรื่อง Contingency ในการวิจัยนี้ เป็นการพิจารณาผลกระทบของระบบเมื่อมีอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งหลุดจากระบบ หรือ ที่เรียกว่า n-1 Contingency เมื่อ n แทนจำนวนของอุปกรณ์ที่พิจารณาในระบบ (ในที่นี้เป็นจำนวนของสายส่งที่ที่เหลืออยู่หลังจากการพิจารณาการเงื่อนไขด้านบน) ยกตัวอย่างเช่น สายส่งบางเส้นหลุดไปเนื่องจากการ trip ของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ การหลุดออกของหม้อแปลง เป็นต้น โดยการพิจารณาจะใช้การวนทำซ้ำที่ละรอบเพื่อสมมติเหตุการณ์ที่อุปกรณ์หรือส่วนประกอบหลุดออกไปหนึ่งตัว

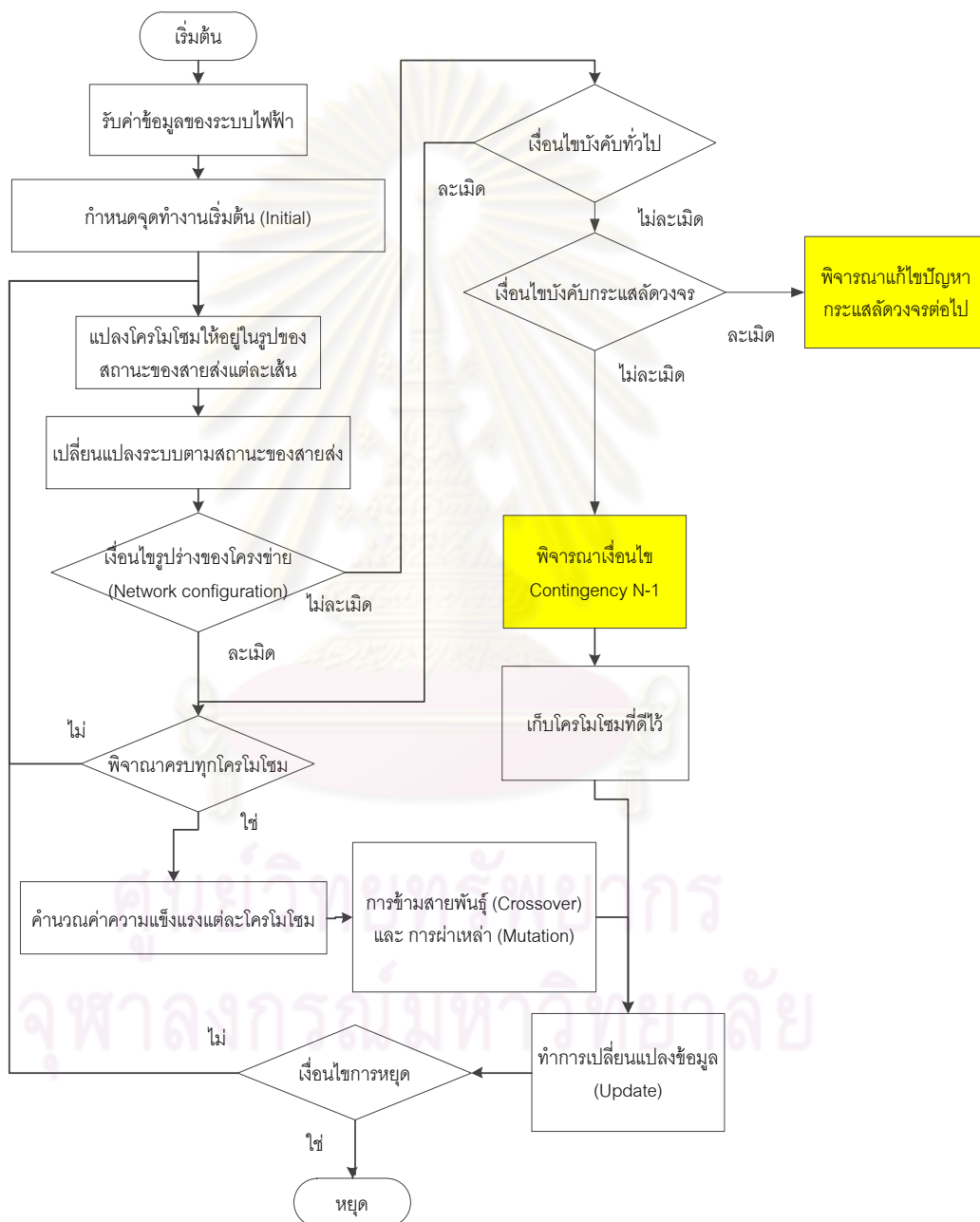
โดยการพิจารณาเงื่อนไข $n-1$ นี้ใช้การคำนวณโดยการสมมติกรณีสายส่งหลุดออกไปหนึ่ง วงจรแล้วพิจารณาถึงเงื่อนไขบังคับต่างๆของระบบด้วย เพื่อทำการสมมติเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้น ความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นของแต่ละสายส่ง และพิจารณาว่าละเมิดเงื่อนไขบังคับหรือไม่ หากมีการ ละเมิดเงื่อนไขเพียงข้อใดข้อหนึ่ง ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ จะไม่พิจารณาว่าเป็นคำตอบของปัญหา การวิเคราะห์เงื่อนไขนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์เงื่อนไขบังคับเรื่อง Contingency

4.3.11 หลักการวิเคราะห์

การลดกระแสลัดวงจรโดยการเลือกปลดสายส่งบางเส้นในการวิจัยชิ้นนี้เริ่มจากการหาจุดทำงานเริ่มต้น (Initial) ก่อนโดยจุดเริ่มต้นนี้มาจากการสุ่มสถานะต่างๆของสายส่งในแต่ละเส้นมาก่อน จากนั้นนำมาคำนวณโดยวิธีทางพันธุกรรมประกอบกับการพิจารณาเงื่อนไขบังคับร่วมด้วย โดยแสดงแผนภาพแนวคิดโดยรวมไว้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนภาพแนวคิดโดยรวม

โดยกำหนดให้ การคำนวณโดยวิธีทางพันธุกรรมนี้ มีโครโมโซม แบ่งออกเป็นสองส่วนต่อกันโดยส่วนที่หนึ่ง โครโมโซมแต่ละตัวแทนสถานะของสายส่งทุกวงจรโดยที่แต่ละบิตของโครโมโซมแทนสถานะของสายส่งนั้นๆ และส่วนที่สองแต่ละบิตสถานะของการติดตั้ง CLR ดังรูปที่ 4.10 โดยการแปลความหมายของสถานะของสายส่งแต่ละวงจรในรูปของโครโมโซม สามารถแสดงโดยบิตของโครโมโซม 2 บิต ด้วยกันโดยพิจารณาเป็นเลขฐานสอง ดังนี้

ส่วนที่หนึ่ง

00 แทน สถานะ 0 ของสายส่ง หมายความว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

01 แทน สถานะ 1 ของสายส่ง หมายความว่า มีการเปลี่ยนแปลงโดยการสร้างสายส่งขนานเพิ่ม 1 วงจร จากสายส่งวงจรเดิม

ส่วนที่สอง

00 แทน สถานะ 0 ของ CLR หมายความว่า ไม่มีการติดตั้ง CLR ขนาด 0.05 p.u.

01 แทน สถานะ 1 ของ CLR หมายความว่า มีการติดตั้ง CLR ขนาด 0.05 p.u.

10 แทน สถานะ 2 ของ CLR หมายความว่า มีการติดตั้ง CLR ขนาด 0.1 p.u.

10 แทน สถานะ 2 ของ CLR หมายความว่า มีการติดตั้ง CLR ขนาด 0.2 p.u.



รูปที่ 4.10 โครโมโซมแทนสถานะของสายส่ง

บทที่ 5

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะเป็นการทดสอบการวางแผนระบบส่ง ร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแส
ลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการทดสอบและการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย 3 กรณี โดยเริ่มจาก
กรณีแรกเป็นการทดสอบการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรโดยการประยุกต์ใช้งาน CLR กับระบบ
ทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส กรณีที่สองเป็นการทดสอบการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการ
จำกัดกระแสลัดวงจร โดยทำการทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส และสุดท้ายเป็น
กรณีศึกษาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลังร่วมกับการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบส่ง
บริเวณกรุงเทพมหานครโดยวิธีที่นำเสนอ

การทดสอบในบทนี้ จะใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยในส่วนวิธีการออปติไม
เซชันทางคณิตศาสตร์ นั้นพัฒนาโดยเขียนโปรแกรมบน MATLAB สำหรับการคำนวณ power
flow ในขั้นตอนของวิธีที่นำเสนอ จะทำโดยโปรแกรม MATPOWER 4.0

5.1 การสอบการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการติดตั้ง CLR กับระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส โดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบ

ในหัวข้อนี้ จะทำการทดสอบการวางแผนการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรในระบบ
ทดสอบด้วยวิธีการออปติไมเซชันโดยวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม โดยทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE-
RTS 24 บัส ที่ได้มีการปรับปรุงข้อมูลบางส่วนเพื่อให้มีความสอดคล้องกับในทางปฏิบัติมากยิ่งขึ้น
คือ ได้มีการเพิ่มข้อมูลค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณค่ากระแส
ลัดวงจร รูปที่ 5.1 แสดงระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัสที่ใช้ในการทดสอบ สำหรับรายละเอียด
ของข้อมูลบัส ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่งในระบบ แสดง
ไว้ในภาคผนวก ก.1

โดยที่วัตถุประสงค์ของการทดสอบในหัวข้อนี้ คือ ต้องการศึกษามลผลการติดตั้ง CLR กับ
การแก้ไขปัญหาหะยะสั้นโดยการเปิดวงจรสายส่ง รวมไปถึงต้องการพิจารณาถึงประสิทธิภาพของ
การใช้กระบวนการวิธีทางพันธุกรรมเป็นเครื่องมือในการคัดเลือกตำแหน่ง และขนาดของ CLR ที่
ต้องการทำการติดตั้ง เพื่อจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร

นอกจากนั้นเพื่อแสดงให้เห็นข้อแตกต่างของวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยวิธีที่นำเสนอ
กับวิธีแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าที่ใช้ในทางปฏิบัติ ในส่วนการทดลองนี้จึงได้แบ่งเป็น 2 กรณีในการ
จำกัดกระแสลัดวงจรดังนี้

กรณีที่ 1 การพิจารณาเลือกตำแหน่งเปิดวงจรบางวงจรออกเพื่อจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรโดยมีวัตถุประสงค์ คือมีการเปิดวงจรน้อยที่สุด โดยใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบ

กรณีที่ 2 การเลือกตำแหน่ง และขนาดของ CLR ที่ต้องการทำการติดตั้ง เพื่อจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรโดยมีวัตถุประสงค์ คือมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งน้อยที่สุด โดยใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบ

ในการวิเคราะห์การจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเบื้องต้นพิจารณาเพียงเงื่อนไขบังคับข้อทั่วไปไม่ได้พิจารณาเงื่อนไขบังคับ contingency n-1

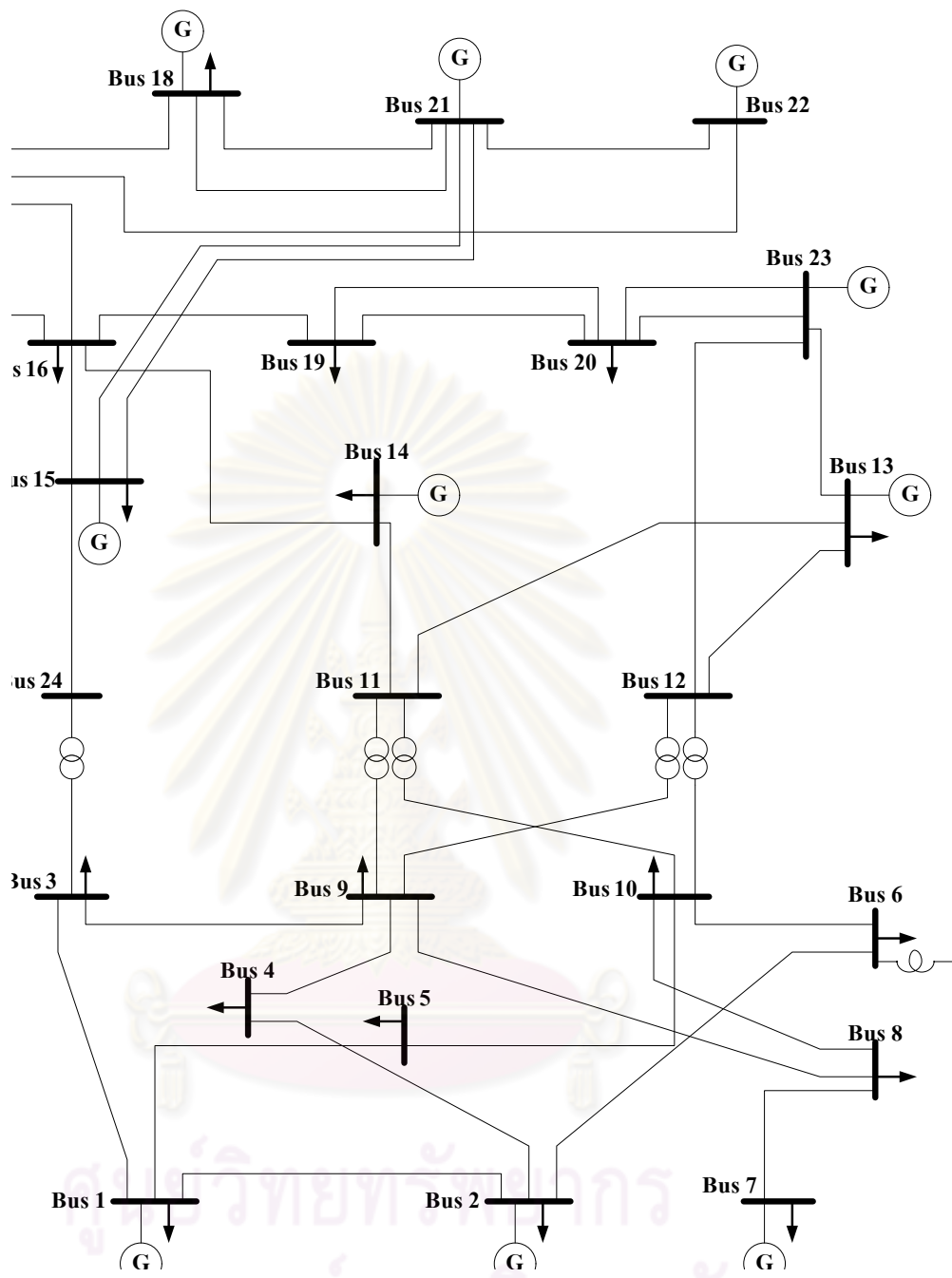
โดยจะนำผลของการจำกัดกระแสลัดวงจรทั้ง 2 กรณีมาเปรียบเทียบกับในเงื่อนไขของระบบดังกล่าวต่อไป

ข้อมูลค่าพิกัด และค่าพารามิเตอร์

พิกัดของเงื่อนไขบังคับ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบทดสอบนี้มีการกำหนด ดังนี้

- ขนาดของแรงดันที่น้อยสุดที่บัสใดๆ ($|LV|_i$) เท่ากับ 0.95 p.u.
- ขนาดของแรงดันที่มากที่สุดที่บัสใดๆ ($|UV|_i$) เท่ากับ 1.05 p.u.
- ขนาดของพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บัสใดๆ (WC_i) เท่ากับ 15 kA
- พิกัดกำลังของสายส่งใดๆ ($FL_{j,k}$) เท่ากับ 400 MVA
- ขนาดของ CLR ที่ทำการติดตั้ง คือ 0.01 p.u., 0.03 p.u., 0.05 p.u. และ 0.1 p.u.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบทั้ง 2 กรณีการเลือกสายส่งที่จะเปิดวงจรได้คำตอบดังนี้

กรณีที่ 1 คำตอบของตำแหน่งในการเปิดวงจรที่ได้จากขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม คือ เลือกเปิดวงจร 2 วงจร คือ สายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ บัสที่ 2 และสายส่งระหว่างบัสที่ 15 และ บัสที่ 16

กรณีที่ 2 คำตอบของตำแหน่ง และขนาดในการติดตั้ง CLR ที่ได้จากขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม คือ ติดตั้ง CLR 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งที่ 1 ติดตั้งระหว่างสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ บัสที่ 2 และตำแหน่งที่ 2 ติดตั้งระหว่างสายส่งระหว่างบัสที่ 15 และ บัสที่ 16

จากผลการทดสอบทั้งสองกรณีสามารถวิเคราะห์ผลกระทบในเรื่องกระแสลัดวงจร ผลกระทบในเรื่องกำลังที่ไหลในสายส่ง และผลกระทบในเรื่องแรงดันได้ดังต่อไปนี้

ผลกระทบในเรื่องกระแสลัดวงจร

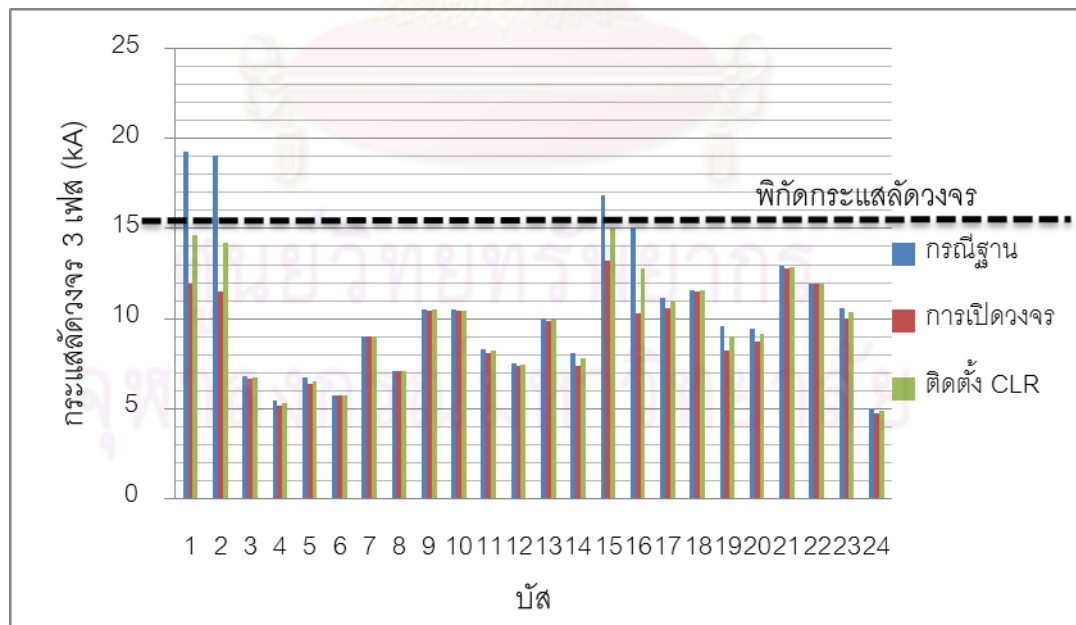
เมื่อคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสทั้งสองกรณีการทดสอบ รวมไปถึงกรณีของระบบที่ยังไม่มีการแก้ไขปัญหากระแสลัดวงจรซึ่งกำหนดให้เป็น **กรณีฐาน** สามารถแสดงดังตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 กระแสลัดวงจร 3 เฟส ในการทดสอบ 5.1

บัส	กระแสลัดวงจร 3 เฟส (kA)		
	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
1	19.281	11.9416	14.6427
2	19.0753	11.4875	14.2362
3	6.7756	6.6687	6.7273
4	5.4163	5.1823	5.2947
5	6.7284	6.3476	6.5277
6	5.7659	5.7044	5.7342
7	9.0192	9.0159	9.0177
8	7.0974	7.0875	7.0932
9	10.5064	10.4435	10.4783
10	10.4915	10.413	10.4562
11	8.3087	8.054	8.2058
12	7.4875	7.3846	7.4453

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) กระแสลัดวงจร 3 เฟส ในการทดสอบ 5.1

บัส	กระแสลัดวงจร 3 เฟส (kA)		
	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
13	10.03	9.8375	9.9525
14	8.1173	7.3911	7.8179
15	16.8745	13.2349	14.979
16	15.0696	10.2978	12.7812
17	11.1439	10.604	10.9269
18	11.5574	11.5263	11.5434
19	9.5796	8.229	9.0053
20	9.4705	8.7403	9.1713
21	12.9225	12.8022	12.8775
22	11.927	11.9255	11.9261
23	10.5951	10.011	10.3585
24	4.9539	4.7252	4.8653



รูปที่ 5.2 กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟส ในการทดสอบ 5.1

สรุปผลกระทบในเรื่องกระแสลัดวงจร

จากผลการคำนวณกระแสลัดวงจรตามตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 แสดงได้ว่าการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการเปิดวงจร และการติดตั้ง CLR สามารถที่จะจำกัดกระแสลัดวงจรไม่เกินค่าที่กำหนดได้ในกรณีนี้ คือ กระแสลัดวงจรที่บัส 1 บัส 2 บัส 15 และที่บัส 16 แต่ปริมาณของกระแสลัดวงจรที่ลดลงนั้น การเปิดวงจรจะสามารถลดปริมาณกระแสลัดวงจรได้มากกว่าการติดตั้ง CLR เนื่องจากการเปิดวงจรเปรียบเสมือนการติดตั้ง CLR ขนาดอนันต์ที่มีผลต่ออิมพีแดนซ์ของระบบมากกว่าอันนำมาซึ่งกระแสลัดวงจรที่มีมีค่าน้อยกว่า

ผลกระทบในเรื่องกำลังที่ไหลในสายส่ง

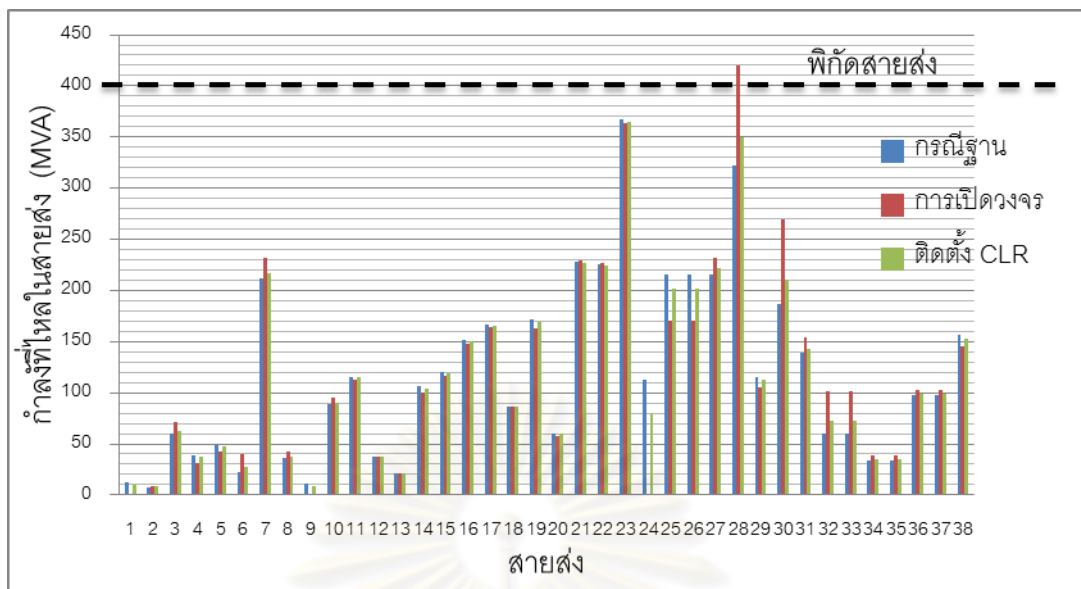
เมื่อคำนวณกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจรทั้งสองกรณีการทดสอบ รวมไปถึงกรณีของระบบที่ยังไม่มีการแก้ไขปัญหากระแสลัดวงจรซึ่งกำหนดให้เป็น **กรณีฐาน** สามารถแสดงดังตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ใน การทดสอบ 5.1

สายส่ง		กำลังที่ไหลในสายส่ง (MVA)		
จากบัส	ถึงบัส	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
1	2	11.93993	-	9.748273
1	3	7.966741	9.229612	8.719998
1	5	60.02686	71.76128	62.97178
2	4	38.43584	31.60087	37.21002
2	6	48.50056	42.06555	47.53831
3	9	22.89815	40.10048	27.78743
3	24	211.2061	231.3128	216.8683
4	9	36.15132	42.906	37.35373
5	10	11.71379	0.730446	8.841326
6	10	88.59219	95.13188	89.51183
7	8	115	112.8784	115
8	9	36.9232	37.88476	37.06773
8	10	21.19435	21.15389	21.05072
9	11	105.9185	100.1734	104.028

ตารางที่ 5.2 (ต่อ) กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ใน การทดสอบ 5.1

สายส่ง		กำลังที่ไหลในสายส่ง (MVA)		
จากบัส	ถึงบัส	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
9	12	120.4662	116.1114	118.9379
10	11	151.1768	147.3262	149.9405
10	12	166.7389	164.3623	165.889
11	13	86.14569	86.5438	85.90835
11	14	171.7731	163.1496	168.8656
12	13	60.51412	58.02912	59.56536
12	23	227.7015	228.8116	226.2574
13	23	225.3027	226.2584	224.1519
14	16	367.551	363.8172	364.5863
15	16	112.3009	-	79.61769
15	21	214.9193	170.4542	201.5309
15	21	214.9193	170.4542	201.5309
15	24	215.5377	231.313	221.4442
16	17	322.6765	419.6139	349.262
16	19	115.0827	104.9552	112.351
17	18	186.9409	269.319	210.4701
17	22	139.0883	154.4653	142.7028
18	21	60.28924	101.4718	72.13054
18	21	60.28924	101.4718	72.13054
19	20	33.17494	38.14985	34.53144
19	20	33.17494	38.14985	34.53144
20	23	97.28808	102.465	98.64834
20	23	97.28808	102.465	98.64834
21	22	156.4638	145.5347	152.8104



รูปที่ 5.3 กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ในการทดสอบ 5.1

สรุปผลกระทบในเรื่องกำลังที่ไหลในสายส่ง

จากผลการคำนวณกำลังที่ไหลในสายส่งตามตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 แสดงได้ว่าการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการเปิดวงจร ถึงแม้จะจำกัดกระแสลัดวงจรได้แต่มีโอกาสทำให้กำลังที่ไหลในสายส่งเกินค่าพิกัดที่ตั้งไว้ได้ในกรณีนี้ คือ สายส่งจากบัส 16 ไปบัส 17 ที่มีกำลังไหลเกินค่าที่ตั้งไว้ คือ 400 MVA เนื่องมาจากการเปิดสายส่งออกทำให้สายส่งที่เหลืออยู่ในระบบต้องแบกรับภาระการส่งกำลังที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการติดตั้ง CLR ถึงแม้จะส่งผลต่อการแบกรับภาระของสายส่งที่เพิ่มขึ้น แต่มีค่าน้อยกว่าการเปิดวงจรอย่างชัดเจน

ผลกระทบในเรื่องแรงดัน

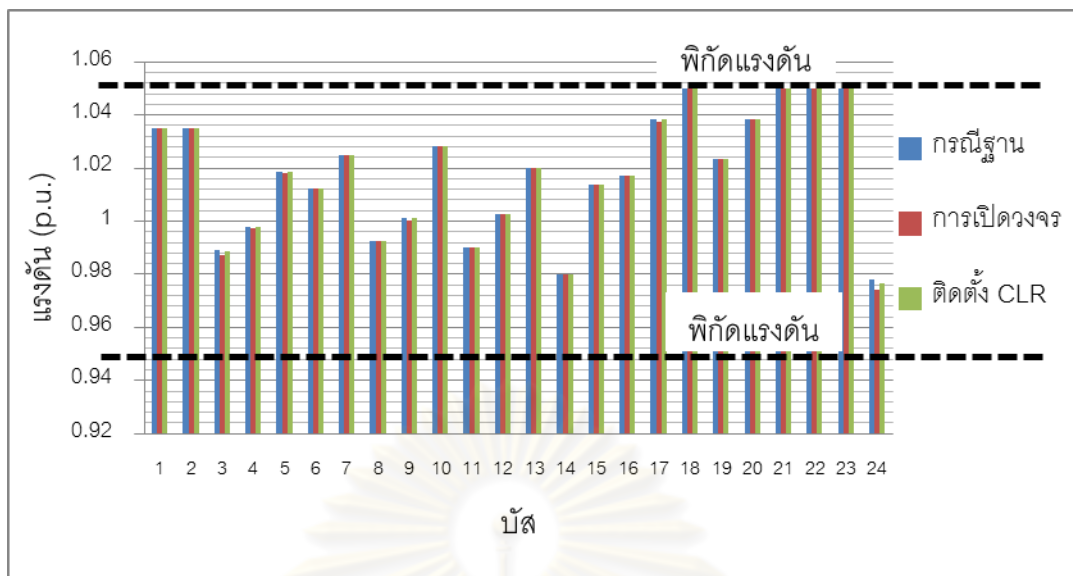
เมื่อคำนวณค่าแรงดันในแต่ละบัสทั้งสองกรณีการทดสอบ รวมไปถึงกรณีของระบบที่ยังไม่มีการแก้ไขปัญหากระแสลัดวงจรซึ่งกำหนดให้เป็น **กรณีฐาน** สามารถแสดงดังตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 แรงดันในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.1

บัส	แรงดัน (p.u.)		
	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
1	1.035	1.035	1.035
2	1.035	1.035	1.035
3	0.989378	0.987045	0.988763

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) แรงดันในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.1

บัส	แรงดัน (p.u.)		
	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
4	0.997945	0.997334	0.997799
5	1.018532	1.01814	1.018466
6	1.012401	1.01239	1.012413
7	1.025	1.025	1.025
8	0.992665	0.992383	0.9926
9	1.001335	1.000295	1.001075
10	1.02846	1.028246	1.028437
11	0.989894	0.990117	0.989978
12	1.002533	1.00279	1.002631
13	1.02	1.02	1.02
14	0.98	0.98	0.98
15	1.014	1.014	1.014
16	1.017	1.017	1.017
17	1.038552	1.037516	1.03828
18	1.05	1.05	1.05
19	1.023248	1.023254	1.023251
20	1.03849	1.038471	1.038485
21	1.05	1.05	1.05
22	1.05	1.05	1.05
23	1.05	1.05	1.05
24	0.977862	0.974262	0.976834



รูปที่ 5.4 แรงดันในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.1

สรุปผลกระทบในเรื่องแรงดัน

จากผลการคำนวณแรงดันในแต่ละบัสตามตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 แสดงได้ว่าการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการเปิดวงจร และการติดตั้ง CLR นั้นไม่มีการละเมิดเงื่อนไขพิกัดแรงดันที่ตั้งไว้ แต่การติดตั้ง CLR นั้นอาจส่งผลกระทบต่อแรงดันในแต่ละบัสน้อยกว่าการเปิดวงจรในแง่ที่ทำให้แรงดันในแต่ละบัสลดลง

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การแก้ปัญหาการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยวิธีการเลือกเปิดวงจรมันถึงแม้ว่าจะมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการติดตั้ง CLR แต่ผลกระทบต่อระบบจะมีมากกว่าการติดตั้ง CLR อย่างเห็นได้ชัดทั้งในแง่ของกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร และแรงดัน

สรุปผลการทดสอบ

การแก้ปัญหาการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการพิจารณาติดตั้ง CLR แทนการเปิดวงจรเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือมากกว่าการเปิดวงจรอย่างเห็นได้ชัดในแง่ของเงื่อนไขบังคับต่างๆ ที่กล่าวมาแต่จำเป็นต้องใช้ค่าใช้จ่ายที่มากกว่า ด้วยเหตุนี้การติดตั้ง CLR จำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณาหาตำแหน่ง และขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าใช้จ่ายมีค่าน้อยที่สุด การประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมมาเป็นเครื่องมือในการหาคำตอบจะสามารถช่วยในการแก้ไขปัญหาได้อย่างเหมาะสมทั้งในแง่ค่าใช้จ่าย และความน่าเชื่อถือของระบบที่ตามมา

5.2 การสอบการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการติดตั้ง CLR กับระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส โดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบ

ในหัวข้อนี้ จะทำการทดสอบการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรในระบบทดสอบด้วยวิธีการออปติไมเซชันโดยวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม โดยทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส ที่ได้มีการปรับปรุงข้อมูลบางส่วนเพื่อให้มีความสอดคล้องกับในทางปฏิบัติมากยิ่งขึ้น คือ ได้มีการเพิ่มข้อมูลคาร์แอกแทนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร รูปที่ 5.1 แสดงระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัสที่ใช้ในการทดสอบสำหรับรายละเอียดของข้อมูลบัส ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่งในระบบ แสดงไว้ในภาคผนวก ก.1 สำหรับระบบทดสอบซึ่งประกอบด้วยบัสจำนวนบัสจำนวน 24 บัส สายส่งจำนวน 38 วงจร มีความต้องการใช้ไฟฟ้ารวม 2,850.0 MW และมีกำลังการผลิตรวม 2,901.2 MW โดยมีการปรับปรุงการทดลองโดยการสมมติการขยายตัวของระบบไฟฟ้าภายในเวลาที่กำหนดคือ 5 ปีดังนี้

1. ความต้องการใช้ไฟฟ้าที่พิจารณารวม 2,850.0 MW เปลี่ยนแปลงให้มีการเพิ่มขึ้นทุกจุดโหลดปีละ 5 % ทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าภายในเขตที่พิจารณามีค่า 3,562.5 MW
2. กำลังการผลิตภายในบริเวณที่พิจารณารวม 2,901.2 MW เปลี่ยนแปลงให้มีการเพิ่มขึ้นทุกจุดปีละ 5 % กำลังการผลิตภายในบริเวณที่พิจารณารวมมีค่า 3,642.3 MW

โดยที่วัตถุประสงค์ของการทดสอบในหัวข้อนี้ คือ ศึกษาผลการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบในที่นี่คือ ระบบระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส โดยวิธีหาตำแหน่ง และขนาดในการติดตั้ง CLR อีกทั้งศึกษาผลกระทบที่ตามมาเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาได้อย่างเหมาะสมโดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

นอกจากนั้นเพื่อแสดงให้เห็นข้อแตกต่างของวิธีวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยวิธีที่น่าเสนอกับวางแผนขยายระบบส่งโดยทั่วไปโดยการทดสอบเป็น 2 กรณีรวมไปถึงระบบที่มีการขยายตัวแต่ยังไม่ได้มีการวางแผนขยายระบบส่งโดยมี 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ระบบที่มีการขยายตัวแต่ไม่มีการพิจารณาการวางแผนขยายระบบส่ง เพื่อใช้เป็นกรณีเปรียบเทียบกับแผนการแก้ปัญหาที่ได้

กรณีที่ 2 การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยการเลือกตำแหน่ง การก่อสร้างสายส่งใหม่ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ คือมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสายส่งเพิ่มน้อยที่สุด โดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

กรณีที่ 3 การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยการเลือกตำแหน่ง การก่อสร้างสายส่งใหม่ และหาตำแหน่ง รวมไปถึงขนาดของ CLR ที่ทำการติดตั้งเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจร ซึ่งมีวัตถุประสงค์ คือมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสายส่งเพิ่ม และค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง CLR น้อยที่สุด โดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

ในการวิเคราะห์การจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเบื้องต้นพิจารณาเพียงเงื่อนไขบังคับข้อทั่วไปไม่ได้พิจารณาเงื่อนไขบังคับ contingency n-1

โดยจะนำผลระบบต่อระบบไฟฟ้าทั้ง 3 กรณี และระบบก่อนการพิจารณาการขยายตัว เป็น **กรณีฐาน** ในการทดสอบมาเปรียบเทียบในเงื่อนไขของระบบดังกล่าวต่อไป

ข้อมูลค่าพิกัด และค่าพารามิเตอร์

พิกัดของเงื่อนไขบังคับ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบทดสอบนี้มีการกำหนด ดังนี้

- ขนาดของแรงดันที่น้อยสุดที่บัสใดๆ ($|LV|_i$) เท่ากับ 0.95 p.u.
- ขนาดของแรงดันที่มากที่สุดที่บัสใดๆ ($|UV|_i$) เท่ากับ 1.05 p.u.
- ขนาดของพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บัสใดๆ (WC_i) เท่ากับ 15 kA
- พิกัดกำลังของสายส่งใดๆ ($FL_{j,k}$) เท่ากับ 400 MVA
- ค่าราคาในการก่อสร้างสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j ($c_{i,j}$) เท่ากับ 10 ล้านบาท
- ขนาดของ CLR ที่ทำการติดตั้ง คือ 0.01 p.u., 0.03 p.u., 0.05 p.u. และ 0.1 p.u.

โดยมีราคา 1 ล้านบาท 1.2 ล้านบาท 1.5 ล้านบาท 2 ล้านบาท ตามลำดับ

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบทั้ง 3 กรณีได้คำตอบดังนี้

กรณีที่ 1 ระบบที่ไม่มีการขยายตัวแต่ไม่มีการวางแผนขยายระบบส่ง

กรณีที่ 2 คำตอบในการวางแผนขยายระบบส่ง คือทำการก่อสร้างสายส่งใหม่ 2 วงจร โดยมีรายละเอียดของสายส่งที่ทำการก่อสร้างเพิ่ม ดังตารางที่ 5.9

กรณีที่ 3 คำตอบในการวางแผนขยายระบบส่ง คือทำการก่อสร้างสายส่งใหม่ 2 วงจร โดยมีรายละเอียดของสายส่งที่ทำการก่อสร้างเพิ่ม ดังตารางที่ 5.4 และ คำตอบของตำแหน่ง และขนาดในการติดตั้ง CLR ที่ได้จากขั้นตอนวิธีทาง พันธุกรรม คือ ติดตั้ง CLR 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งที่ 1 ติดตั้งระหว่างสายส่งระหว่าง บัสที่ 1 และ บัสที่ 2 ขนาด 0.1 p.u. และตำแหน่งที่ 2 ติดตั้งระหว่างสายส่ง ระหว่างบัสที่ 15 และ บัสที่ 16 ขนาด 0.1 p.u.

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลสายส่งในแผนก่อสร้างเพิ่มในการทดสอบกรณีที่ 2 และ 3 การทดสอบ 5.2

สายส่ง		ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	มุม ของ หม้อ แปลง
จากบัส	ถึงบัส						
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	175	0	0
15	16	0.0022	0.0173	0.0364	500	0	0

จากผลการทดสอบทั้งสามกรณีสามารถวิเคราะห์ผลกระทบในเรื่องกำลังที่ไหลในสายส่ง ผลกระทบในเรื่องกระแสลัดวงจร และผลกระทบในเรื่องแรงดันได้ดังต่อไปนี้

ผลกระทบในเรื่องกำลังที่ไหลในสายส่ง

เมื่อคำนวณกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจรทั้งสามกรณีการทดสอบ รวมไปถึงกรณีระบบ ก่อนการพิจารณาการขยายตัวเป็น **กรณีฐาน** สามารถแสดงดังตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ใน การทดสอบ 5.2

สายส่ง		กำลังที่ไหลในสายส่ง (MVA)			
จากบัส	ถึงบัส	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
1	2	11.93993	14.67272	11.74218	9.811445
1	3	7.966741	9.489713	3.469536	4.714971
1	5	60.02686	74.81732	71.72764	74.90382
2	4	38.43584	47.64039	46.67673	45.54562
2	6	48.50056	60.77722	58.81224	58.01608
3	9	22.89815	25.93643	13.52434	19.34848

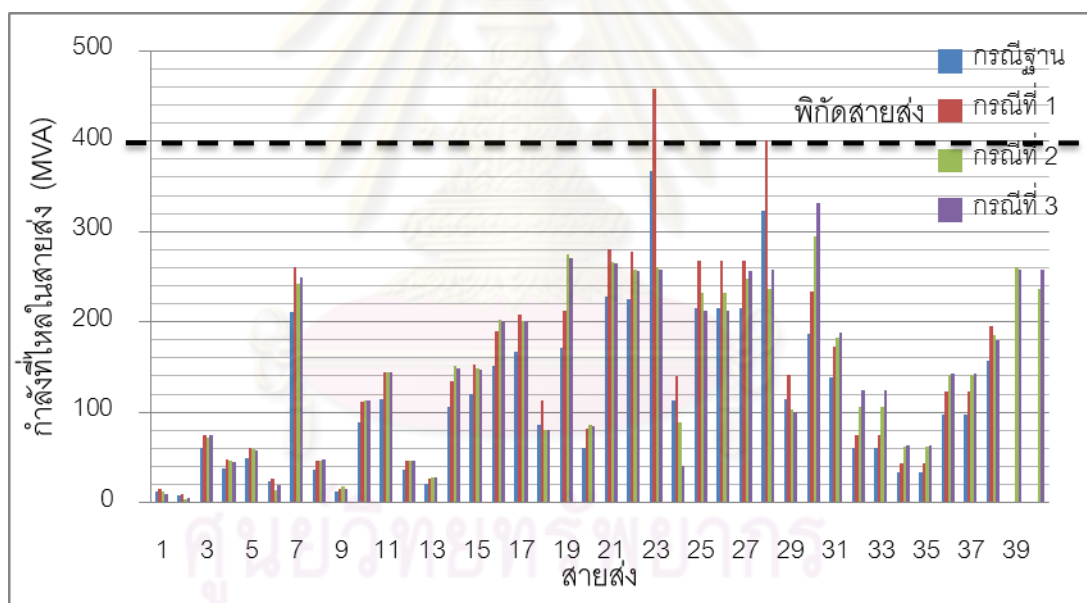
ตารางที่ 5.5 (ต่อ) กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ในการทดสอบ 5.2

สายส่ง		กำลังที่ไหลในสายส่ง (MVA)			
จากบัส	ถึงบัส	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
3	24	211.2061	261.0379	242.4644	249.5649
4	9	36.15132	45.78799	46.71959	47.82485
5	10	11.71379	15.11159	18.11222	15.0273
6	10	88.59219	110.9679	112.8258	113.5794
7	8	115	143.7501	143.7501	143.7501
8	9	36.9232	46.6361	45.91076	46.10527
8	10	21.19435	26.74076	27.46123	27.26769
9	11	105.9185	134.7071	150.6778	148.1675
9	12	120.4662	152.4933	148.9191	147.0286
10	11	151.1768	189.9916	202.8106	201.2237
10	12	166.7389	208.739	201.5919	200.652
11	13	86.14569	113.3729	80.81682	80.84067
11	14	171.7731	212.6542	274.2346	270.0798
12	13	60.51412	81.77934	85.97738	84.79021
12	23	227.7015	281.0792	266.0605	264.3953
13	23	225.3027	278.1945	257.9555	256.6312
14	16	367.551	457.7892	260.5609	258.4173
15	16	112.3009	139.8789	89.52894	41.03483
15	21	214.9193	267.6477	232.6875	212.1751
15	21	214.9193	267.6477	232.6875	212.1751
15	24	215.5377	267.9164	248.3459	255.8153
16	17	322.6765	401.21	236.8152	257.1893
16	19	115.0827	140.6937	103.2994	100.1402
17	18	186.9409	233.3792	295.1926	331.102
17	22	139.0883	172.9694	182.0555	187.5222
18	21	60.28924	75.29832	106.5131	124.6531
18	21	60.28924	75.29832	106.5131	124.6531

ตารางที่ 5.5 (ต่อ) กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ใน การทดสอบ 5.2

สายส่ง		กำลังที่ไหลในสายส่ง (MVA)			
จากบัส	ถึงบัส	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
19	20	33.17494	43.08661	61.64732	63.21724
19	20	33.17494	43.08661	61.64732	63.21724
20	23	97.28808	123.2352	141.8812	143.4599
20	23	97.28808	123.2352	141.8812	143.4599
21	22	156.4638	195.0865	185.8585	180.2928
15*	16	-	-	260.5609	258.4173
1*	2	-	-	236.8152	257.1893

*หมายเหตุ: สายส่งที่ก่อสร้างใหม่



รูปที่ 5.5 กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ในการทดสอบ 5.2

สรุปผลกระทบในเรื่องกำลังที่ไหลในสายส่ง

จากการคำนวณกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจรทั้งสามกรณีการทดสอบพบว่า เมื่อระบบทดสอบมีการขยายตัวจะเกิดการละเมิดพิกัดของกำลังที่ไหลในสายส่งได้ในที่นี้คือ สายส่งระหว่างบัสที่ 14 และบัสที่ 16 โดยปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการวางแผนระบบส่งดังกล่าวกรณีการทดสอบกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3

ผลกระทบในเรื่องกระแสลัดวงจร

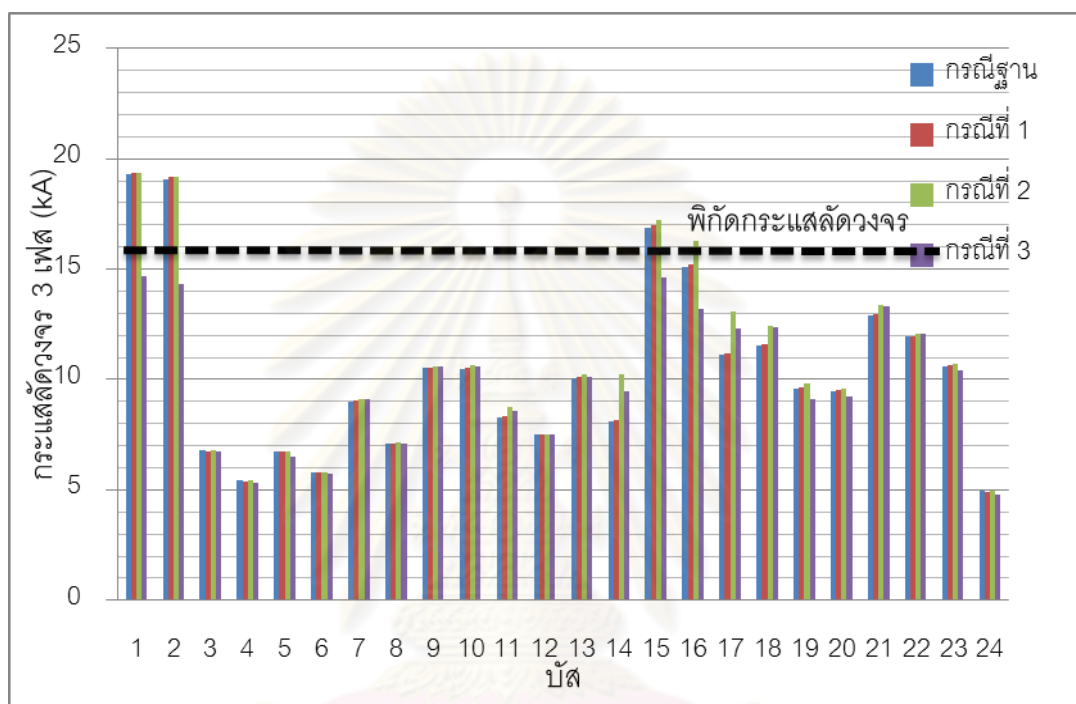
เมื่อคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสทั้งสามกรณีการทดสอบ รวมไปถึงกรณีระบบก่อนการพิจารณาการขยายตัวเป็น **กรณีฐาน** สามารถแสดงดังตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 กระแสลัดวงจร 3 เฟส ในการทดสอบ 5.2

บัส	กระแสลัดวงจร 3 เฟส (kA)			
	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
1	19.281	19.3719	19.3853	14.7074
2	19.0753	19.165	19.1792	14.3006
3	6.7756	6.7563	6.7752	6.7158
4	5.4163	5.4066	5.4167	5.2942
5	6.7284	6.726	6.7374	6.5341
6	5.7659	5.7703	5.785	5.7512
7	9.0192	9.08	9.0841	9.082
8	7.0974	7.1195	7.1315	7.1261
9	10.5064	10.5365	10.6135	10.5781
10	10.4915	10.5482	10.6265	10.5759
11	8.3087	8.3538	8.7489	8.5607
12	7.4875	7.4919	7.5407	7.4825
13	10.03	10.1335	10.2273	10.1124
14	8.1173	8.19	10.2627	9.4384
15	16.8745	16.9924	17.2158	14.6174
16	15.0696	15.1943	16.2618	13.1912
17	11.1439	11.1913	13.0705	12.2845
18	11.5574	11.6263	12.4431	12.3602
19	9.5796	9.641	9.8349	9.1134
20	9.4705	9.529	9.6039	9.2309
21	12.9225	12.9867	13.3684	13.3294
22	11.927	11.9374	12.0897	12.0811
23	10.5951	10.6641	10.7142	10.4168

ตารางที่ 5.6 (ต่อ) กระแสลัดวงจร 3 เฟส ในการทดสอบ 5.2

บัส	กระแสลัดวงจร 3 เฟส (kA)			
	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
24	4.9539	4.917	4.9445	4.8009



รูปที่ 5.6 กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟส ในการทดสอบ 5.2

สรุปผลกระทบในเรื่องกระแสลัดวงจร

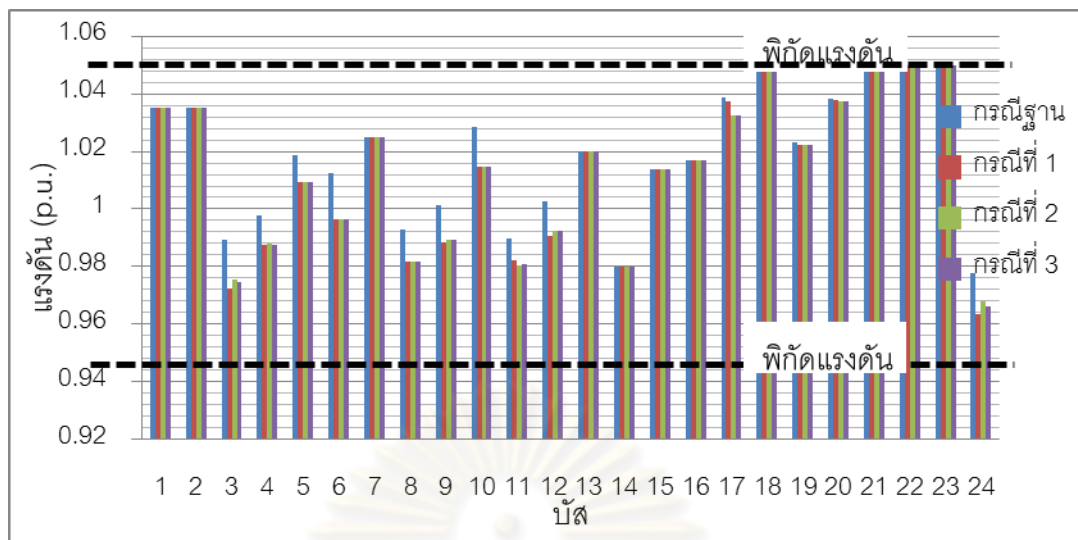
จากการคำนวณกระแสลัดวงจรทั้งสามกรณีการทดสอบพบว่า การวางแผนขยายระบบส่งเพียงอย่างเดียว (กรณีที่ 2) จะเกิดปัญหากระแสลัดวงจรเกินค่าพิกัดได้ในที่นี้ คือ ที่บัส 1 บัส 2 บัส 15 และบัส 16 ซึ่งปัญหาส่วนนี้จะไม่เกิดขึ้นในกรณีการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร (กรณีที่ 3)

ผลกระทบในเรื่องแรงดัน

เมื่อคำนวณในเรื่องแรงดันในแต่ละบัสทั้งสามกรณีการทดสอบ รวมไปถึงกรณีระบบก่อนการพิจารณาการขยายตัวเป็น **กรณีฐาน** สามารถแสดงดังตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 แรงดันในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.2

บัส	แรงดัน (p.u.)			
	กรณีฐาน	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
1	1.035	1.035	1.035	1.035
2	1.035	1.035	1.035	1.035
3	0.989378	0.972522	0.975374	0.974402
4	0.997945	0.98731	0.987874	0.987718
5	1.018532	1.009419	1.0095	1.009473
6	1.012401	0.996385	0.996488	0.996568
7	1.025	1.025	1.025	1.025
8	0.992665	0.981581	0.981827	0.981778
9	1.001335	0.988372	0.98937	0.9891
10	1.02846	1.014754	1.014799	1.014867
11	0.989894	0.98225	0.980507	0.980708
12	1.002533	0.990704	0.99222	0.9924
13	1.02	1.02	1.02	1.02
14	0.98	0.98	0.98	0.98
15	1.014	1.014	1.014	1.014
16	1.017	1.017	1.017	1.017
17	1.038552	1.037416	1.0327	1.03239
18	1.05	1.05	1.05	1.05
19	1.023248	1.022107	1.022086	1.02208
20	1.03849	1.037714	1.037594	1.037581
21	1.05	1.05	1.05	1.05
22	1.05	1.05	1.05	1.05
23	1.05	1.05	1.05	1.05
24	0.977862	0.963583	0.967785	0.966255



รูปที่ 5.7 แรงดันในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.2

สรุปผลกระทบในเรื่องแรงดัน

จากการคำนวณกระแสลัดวงจรทั้งสามกรณีการทดสอบพบว่า การวางแผนขยายระบบส่งเพียงอย่างเดียว (กรณีที่ 2) และการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร (กรณีที่ 3) จะไม่มีการละเมิดเงื่อนไขพิกัดแรงดัน

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวางแผนขยายระบบส่งเพียงอย่างเดียว (กรณีที่ 2) ซึ่งเป็นการวางแผนขยายระบบส่งโดยทั่วไป สามารถที่จะแก้ปัญหาการเกินพิกัดกำลังที่ไหลในสายส่งได้ แต่อาจเกิดปัญหาในเรื่องค่ากระแสลัดวงจรซึ่งปัญหาส่วนนี้จะสามารถแก้ไขได้โดยการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร

สรุปผลการทดสอบ

การวางแผนขยายระบบส่งโดยทั่วไปถึงแม้จะแก้ไขปัญหาในเรื่องการส่งกำลังได้แต่อาจเกิดปัญหาค่ากระแสลัดวงจรที่มากเกินพิกัด ซึ่งทำให้ต้องกลับมาพิจารณาปัญหาหลายรอบ การวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการติดตั้ง CLR (วิธีที่นำเสนอ) จะสามารถแก้ไขปัญหาการส่งกำลังไฟฟ้า และปัญหากระแสลัดวงจรได้อย่างพร้อมกัน โดยที่คำตอบที่ได้จากวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมจะเป็นค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดทั้งการก่อสร้างสายส่งและการติดตั้ง CLR

5.3 กรณีศึกษาการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยการติดตั้ง CLR กับระบบส่งบริเวณเขตกรุงเทพมหานคร โดยประยุกต์ใช้วิธี ขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบ

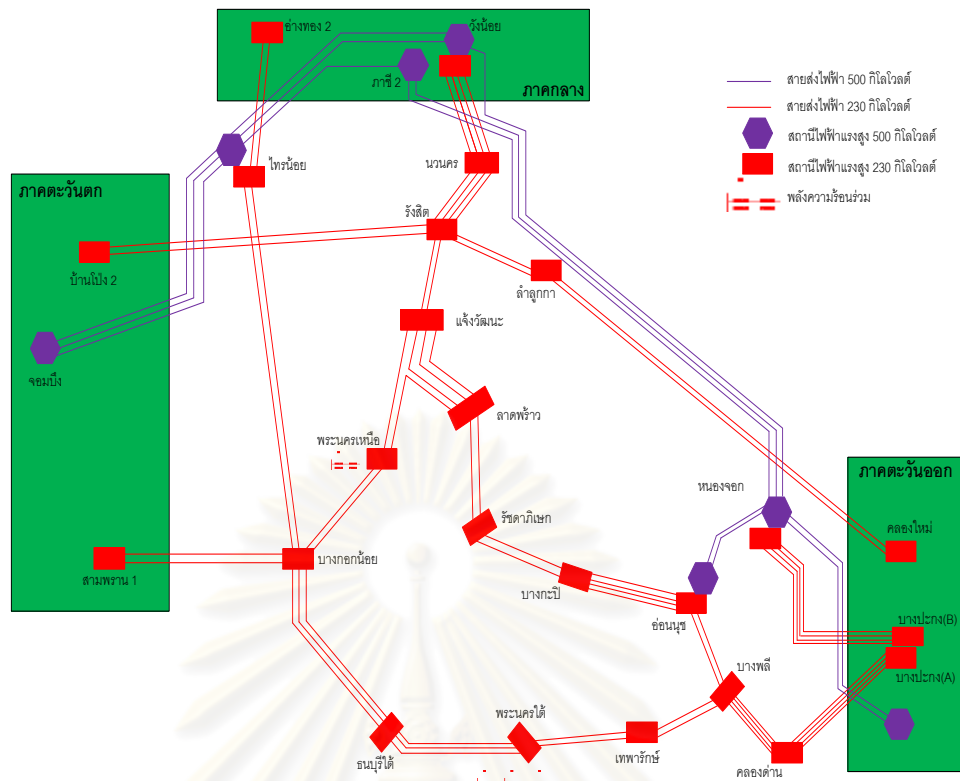
ในหัวข้อนี้ เป็นกรณีศึกษาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรในระบบส่งในเขตกรุงเทพมหานครของประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วยบัสจำนวนบัสจำนวน 254 บัส สายส่งจำนวน 429 วงจร มีความต้องการใช้ไฟฟ้าภายในเขตที่พิจารณารวม 17,519.6 MW และมีกำลังการผลิตภายในบริเวณที่พิจารณารวม 25,547.7 MW โดยมีการปรับปรุงการทดลองโดยการสมมติการขยายตัวของระบบไฟฟ้าภายในเวลาที่กำหนดคือ 5 ปีดังนี้

1. ความต้องการใช้ไฟฟ้าภายในเขตที่พิจารณารวม 17,519.6 MW เปลี่ยนแปลงให้มีการเพิ่มขึ้นทุกจุดโหนดปีละ 5 % ทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าภายในเขตที่พิจารณามีค่า 21,751.5 MW หรือมีค่าเพิ่มขึ้น 4,231.9 MW
2. กำลังการผลิตภายในบริเวณที่พิจารณารวม 25,547.7 MW เปลี่ยนแปลงให้มีการเพิ่มขึ้นทุกจุดปีละ 5 % กำลังการผลิตภายในบริเวณที่พิจารณารวมมีค่า 30,476.1 MW หรือมีค่าเพิ่มขึ้น 4,928.4 MW

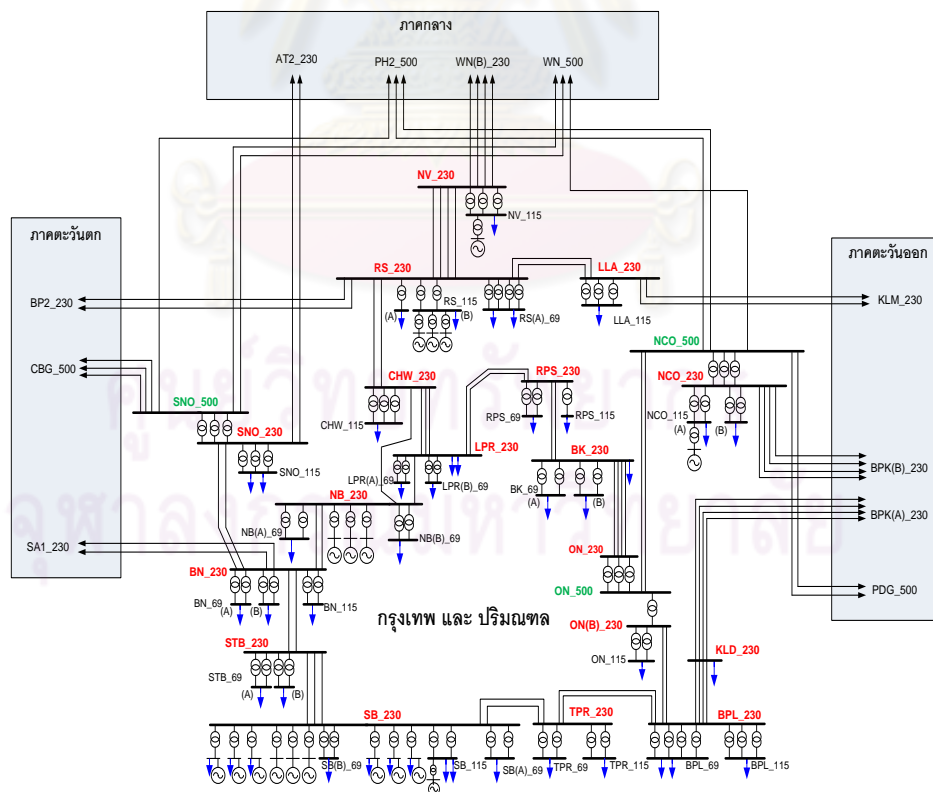
โดยที่การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น 5 % นี้พิจารณาอ้างอิงจากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573 [48]

รูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 แสดงแผนที่ระบบไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานคร และแผนภาพเส้นเดียวของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในเขตกรุงเทพ และปริมาตรตามลำดับ สำหรับรายละเอียดข้อมูลบัส กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบริเวณที่พิจารณา สายส่งและหม้อแปลงรวมทั้งข้อมูลต่างๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก ก.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.8 แผนที่ระบบไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 5.9 แผนภาพเส้นเดียวของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในเขตกรุงเทพ และปริมณฑล

ในกรณีศึกษานี้ได้มีการพิจารณาแนวทางที่ใช้ในการทดสอบถึงผลกระทบต่อระบบ เมื่อพิจารณาแนวทางในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าพร้อมกับการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาระบบที่ได้มีการขยายตัวแต่ไม่ได้มีการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่ง และปัญหากระแสลัดวงจร

กรณีที่ 2 พิจารณาระบบที่ได้มีการขยายตัว โดยมีการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยการเลือกตำแหน่ง การก่อสร้างสายส่งใหม่ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ คือมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสายส่งเพิ่มน้อยที่สุด โดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

กรณีที่ 3 พิจารณาระบบที่ได้มีการขยายตัว โดยมีการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าพร้อมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการเลือกตำแหน่ง การก่อสร้างสายส่งใหม่ และหาตำแหน่ง รวมไปถึงขนาดของ CLR ที่ทำการติดตั้งเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจร ซึ่งมีวัตถุประสงค์ คือมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสายส่งเพิ่ม และค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง CLR น้อยที่สุด โดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

นอกจากทั้ง 3 กรณีที่กล่าวมาในกรณีศึกษานี้ได้มีการพิจารณาระบบก่อนทำการแบ่งแยกบัสพระนครใต้ (SB) และบัสพระนครเหนือ (NB) เป็นกรณีฐานเพื่อให้เห็นปริมาณของกระแสลัดวงจรที่มีค่ามาก

โดยจะนำผลของการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายต่อระบบไฟฟ้าทั้ง 3 กรณีมาเปรียบเทียบในเงื่อนไขของระบบดังกล่าวต่อไป ในกรณีศึกษาหัวข้อนี้มีการนำเอา Contingency n-1 เข้ามาเป็นเงื่อนไขบังคับเพิ่มเติมด้วยการพิจารณานั้นไม่ได้คำนวณ การหลุดออกของสายส่งทั้ง 429 วงจร เนื่องจากในบางตำแหน่งที่มีการเชื่อมระหว่างบัสโดยสายส่งที่มากกว่าหนึ่งวงจร สามารถที่จะพิจารณาเพียงสายส่งวงจรใดวงจรหนึ่งหลุดออก ก็มีความเพียงพอสำหรับเงื่อนไข n-1

วัตถุประสงค์ของการทดสอบในหัวข้อนี้ คือ ศึกษาผลการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบของจริงในที่นี่คือ ระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร อีกทั้งศึกษาผลกระทบที่ตามมาเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงจาก 3 กรณีข้างต้น เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาได้อย่างเหมาะสม

ข้อมูลค่าพิกัด และพารามิเตอร์

พิกัดของเงื่อนไขบังคับต่างๆที่ใช้ในระบบทดสอบนี้มีการกำหนด ดังนี้

- ขนาดของแรงดันที่น้อยสุดที่บัสใดๆ ($|LV|_i$) เท่ากับ 0.95 p.u.
- ขนาดของแรงดันที่มากที่สุดที่บัสใดๆ ($|UV|_i$) เท่ากับ 1.05 p.u.
- ขนาดของพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บัสใดๆ (WC_i) ไม่เกินค่ามากที่สุดที่คำนวณได้ก่อนระบบมีการขยายตัวในทันทีคือ 48 kA
- พิกัดกำลังของสายส่งใดๆ ($FL_{j,k}$) ไม่เกิน 95% ของพิกัดของสายส่งวงจรมันๆ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามสมการฟังก์ชันเป้าหมายสมการที่ 4.1 ถูกกำหนดไว้ดังนี้

- ค่าราคาในการก่อสร้างสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j ($c_{i,j}$) เท่ากับ 10 ล้านบาท
- ขนาดของ CLR ที่ทำการติดตั้ง คือ 0.01 p.u., 0.03 p.u., 0.05 p.u. และ 0.1 p.u. โดยมีราคา 1 ล้านบาท 1.2 ล้านบาท 1.5 ล้านบาท 2 ล้านบาท ตามลำดับ

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบทั้ง 3 กรณีได้คำตอบดังนี้

กรณีที่ 1 ระบบที่ไม่มีการขยายตัวแต่ไม่มีการวางแผนขยายระบบส่ง

กรณีที่ 2 คำตอบในการวางแผนขยายระบบส่ง คือทำการก่อสร้างสายส่งใหม่ 2 วงจร โดยมีรายละเอียดของสายส่งที่ทำการก่อสร้างเพิ่ม ดังตารางที่ 5.8

กรณีที่ 3 คำตอบในการวางแผนขยายระบบส่ง คือทำการก่อสร้างสายส่งใหม่ 2 วงจร โดยมีรายละเอียดของสายส่งที่ทำการก่อสร้างเพิ่ม ดังตารางที่ 5.8 และคำตอบของตำแหน่ง และขนาดในการติดตั้ง CLR ที่ได้จากขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม ดังนี้

1. ติดตั้งระหว่างบัสแจ้วัฒนะ (11804) และบัสลาดพร้าว (11806) ขนาด CLR 0.05 p.u.
2. ติดตั้งระหว่างบัสรังสิต (11810) และบัสนวนคร (11819) ขนาด CLR 0.05 p.u.
3. ติดตั้งระหว่างบัสรังสิต(11810) และบัสลำลูกกา (11820) ขนาด CLR 0.05 p.u.

โดยรายละเอียดของแผนการขยายระบบส่ง และแผนการขยายระบบส่งร่วมกับการ
พิจารณากระแสลัดวงจร แสดงไว้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 5.8 ข้อมูลสายส่งในแผนก่อสร้างเพิ่มในการทดสอบกรณีที่ 2 และ 3 การทดสอบ 5.3

จากบัส	ถึงบัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อ แปลง (ratio)	มุม ของ หม้อ แปลง
11909	11839	0	0.018	0	1000	0.95	0
11813	11011	0	0.06993	0	140	1.05	30
11813	11012	0	0.07143	0	140	1.05	30
11813	11013	0	0.06957	0	140	1.05	30
11812	11712	0	0.05867	0	300	0.99794	0

จากผลการทดสอบทั้งสามกรณีสามารถวิเคราะห์ผลกระทบในเรื่องกำลังที่ไหลในสายส่ง
ผลกระทบในเรื่องกระแสลัดวงจร และผลกระทบในเรื่องแรงดันได้ดังต่อไปนี้

ผลกระทบในเรื่องกำลังที่ไหลในสายส่ง

เมื่อคำนวณกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจรทั้งสามกรณีการทดสอบ รวมไปถึงกรณีระบบ
ก่อนการพิจารณาการขยายตัวเป็น **กรณีฐาน** สามารถแสดงดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ในการทดสอบ 5.3

สายส่ง		พิกัด สายส่ง (MVA)	กำลังที่ไหล			% กำลังที่ไหลเทียบกับพิกัด ของสายส่ง		
จากบัส	ถึงบัส		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
11813	11011	140	135	67.5	67.5	96.42	48.21	48.21
11813	11012	140	135	67.5	67.5	96.42	48.21	48.21
11813	11013	140	137.5	68.75	68.75	98.21	49.1	49.1
11808	11031	307	287.5	287.5	287.5	93.64	93.64	93.64

ตารางที่ 5.9 (ต่อ) กำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร ในการทดสอบ 5.3

สายส่ง		พิกัด สายส่ง (MVA)	กำลังที่ไหล			% กำลังที่ไหลเทียบกับพิกัด ของสายส่ง		
จากบัส	ถึงบัส		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
11808	11032	307	287.5	287.5	287.5	93.64	93.64	93.64
11808	11033	330	300	300	300	90.9	90.9	90.9
11811	11611	300	270.79	270.79	270.79	90.26	90.26	90.26
11811	11611	300	270.79	270.79	270.79	90.26	90.26	90.26
11707	15003	52.94	50	50	50	94.44	94.44	94.44
11812	11712	300	296.32	222.69	222.69	98.77	74.23	74.23
11812	11712	300	296.32	222.69	222.69	98.77	74.23	74.23
11812	11712	300	303.55	228.12	228.12	101.18	76.04	76.04
11807	11737	200	180.96	180.96	180.96	90.48	90.48	90.48
11909	11809	1000	897.27	862.44	875.04	89.72	86.24	87.5
11909	11809	1000	897.27	862.44	875.04	89.72	86.24	87.5
11909	11809	1000	897.27	862.44	875.04	89.72	86.24	87.5
11912	11812	750	701.26	700.81	701.21	93.5	93.44	93.49
11912	11812	750	701.26	700.81	701.21	93.5	93.44	93.49
11912	11812	750	701.26	700.81	701.21	93.5	93.44	93.49
11909	11839	1000	937.19	552.8	542.78	93.71	55.28	54.27

สรุปผลกระทบในเรื่องกำลังที่ไหลในสายส่ง

จากการคำนวณกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจรทั้งสามกรณีการทดสอบพบว่า เมื่อระบบทดสอบมีการขยายตัวจะเกิดการละเมิดพิกัดของกำลังที่ไหลในสายส่งได้ในที่นี้คือ สายส่งระหว่างบัสที่ 11813 และบัสที่ 11013 สายส่งระหว่างบัสที่ 11812 และบัสที่ 11712 โดยปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการวางแผนระบบส่งดังกรณีการทดสอบกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3

ผลกระทบในเรื่องกระแสลัดวงจร

เมื่อคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสทั้งสามกรณีการทดสอบ รวมไปถึงกรณีระบบก่อนการพิจารณาการขยายตัวเป็น **กรณีฐาน** สามารถแสดงดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 กระแสลัดวงจร 3 เฟส ในการทดสอบ 5.3

บัส	ระดับแรงดัน	กระแสลัดวงจร (kA)				
		ระบบก่อนแบ่งแยกบัส	กรณีที่ 0	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
11602	69	46.08315	40.9604	41.55127	43.19678	43.10317
11603	69	21.19213	20.0176	20.20266	20.22802	20.22791
11606	69	23.27565	21.9014	22.49915	22.50738	22.37317
11608	69	27.08308	23.3349	23.45205	23.47752	23.47741
11610	69	37.68631	35.7014	36.37627	36.38003	36.01578
11611	69	30.98036	29.3188	30.11808	30.14709	29.98602
11613	69	24.97462	21.8383	22.22255	22.54946	22.53098
11614	69	21.51092	20.1515	20.42533	20.45961	20.45953
11615	69	22.35321	20.8407	21.04016	21.40054	21.38024
11631	69	23.14578	22.3506	22.96988	22.99451	22.92545
11633	69	22.72338	21.363	21.57392	21.60322	21.60309
11636	69	31.53168	29.1597	29.93919	29.95387	29.71285
11638	69	27.33367	24.4221	25.17169	25.1802	25.08055
11643	69	24.61473	22.1696	22.47973	22.55251	22.55243
11644	69	21.21474	19.8964	20.15927	20.19254	20.19246
11702	115	22.36418	20.389	20.74877	21.38369	21.34756
11703	115	16.66918	15.5181	15.6509	15.67528	15.67518
11704	115	23.97259	21.9992	22.69115	22.69938	22.49043
11707	115	15.58001	15.5641	15.72709	15.74086	15.74027
11709	115	14.16504	13.5853	13.7612	14.37544	14.36862
11710	115	10.71305	10.4032	10.56978	10.57031	10.51961
11711	115	8.729833	8.4513	8.627384	8.631489	8.608678

ตารางที่ 5.10 (ต่อ) กระแสลัดวงจร 3 เฟส ในการทดสอบ 5.3

บัส	ระดับแรงดัน	กระแสลัดวงจร (kA)				
		ระบบก่อนแบ่งแยกบัส	กรณีที่ 0	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
11712	115	20.64055	20.0635	20.29411	24.59385	24.59337
11713	115	17.75947	15.7697	15.98863	16.19754	16.18573
11715	115	14.13719	13.1199	13.27683	13.51874	13.5051
11719	115	23.94143	23.103	23.42061	23.42295	23.0786
11720	115	19.06067	18.5631	18.94686	18.95959	18.01211
11737	115	13.01245	12.9991	13.0415	13.05163	13.05119
11740	115	20.06619	19.5002	19.82126	19.82237	19.71643
11801	230	48.97743	40.3059	41.97114	42.25078	41.37829
11802	230	51.70046	35.1293	36.04001	40.69988	40.41855
11803	230	65.26393	39.934	41.03138	41.43611	41.43358
11804	230	60.91753	42.7339	44.64809	44.71061	43.12737
11806	230	60.45302	41.1607	43.07979	43.17885	41.49715
11807	230	38.71619	38.5559	38.87948	39.06851	39.0584
11808	230	60.10486	26.7237	27.0598	27.18906	27.18833
11809	230	48.2498	41.3079	42.80966	43.19357	42.48833
11810	230	59.67065	47.0713	48.89961	48.92118	46.82095
11811	230	51.6388	39.9926	41.75019	41.9393	40.80964
11812	230	43.98872	38.7484	39.46003	39.55712	39.55378
11813	230	62.03505	31.5582	32.30291	32.881	32.87998
11814	230	61.05589	36.3863	37.38136	37.83955	37.83774
11815	230	52.17773	32.7374	33.57149	37.28401	37.06293
11816	230	46.24361	36.6081	37.40608	40.318	39.80769
11819	230	47.95557	41.2899	42.44043	42.45784	40.01155
11820	230	32.49948	30.026	30.77987	30.85312	26.399
11838	230	36.23649	33.4571	35.00059	35.0558	34.36179
11839	230	36.23649	29.5549	30.15377	37.74618	37.64632

ตารางที่ 5.10 (ต่อ) กระแสลัดวงจร 3 เฟส ในการทดสอบ 5.3

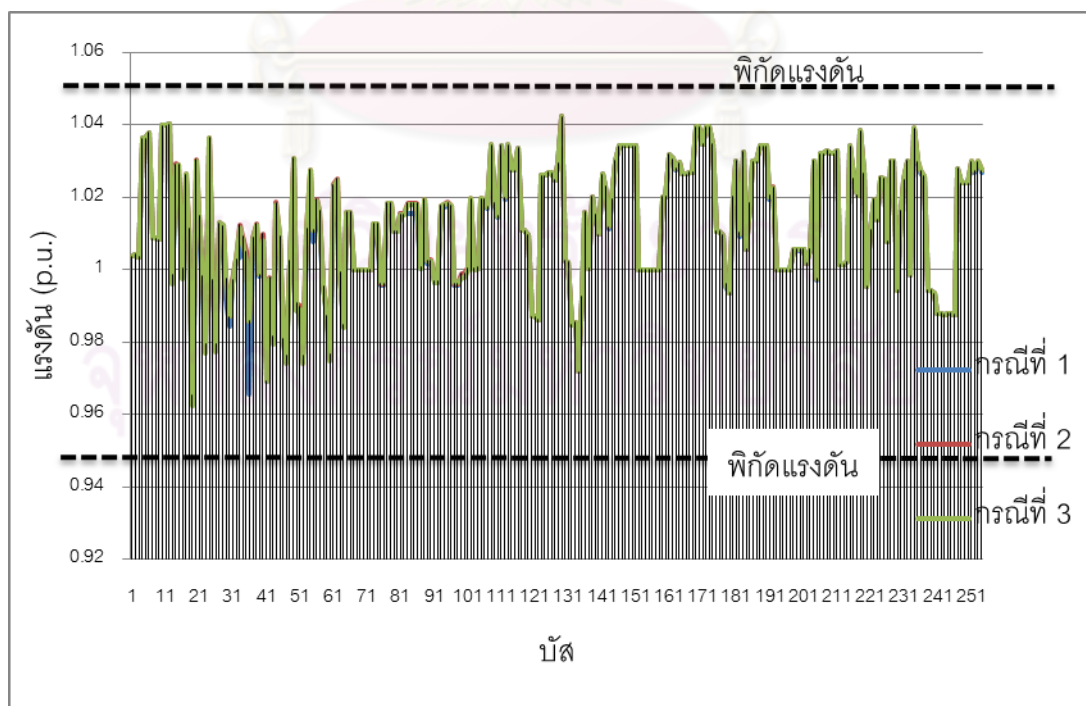
บัส	ระดับแรงดัน	กระแสลัดวงจร (kA)				
		ระบบก่อนแบ่งแยกบัส	กรณีที่ 0	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
11843	230	29.74616	28.1006	28.74637	30.88329	30.75938
11907	500	43.58718	39.9894	40.58851	41.76792	41.69223
11909	500	36.39364	33.7723	34.39506	35.78759	35.69055
11912	500	37.12565	34.8268	35.12606	35.29873	35.2848

สรุปผลกระทบในเรื่องกระแสลัดวงจร

จากการคำนวณกระแสลัดวงจรทั้งสามกรณีการทดสอบพบว่า การวางแผนขยายระบบส่งเพียงอย่างเดียว (กรณีที่ 2) จะเกิดปัญหากระแสลัดวงจรเกินค่าพิกัดได้ ซึ่งปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้นในกรณีการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร (กรณีที่ 3)

ผลกระทบในเรื่องแรงดัน

เมื่อคำนวณในเรื่องแรงดันในแต่ละบัสทั้งสามกรณีการทดสอบ รวมไปถึงกรณีระบบก่อนการพิจารณาการขยายตัวเป็น **กรณีฐาน** สามารถแสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แรงดันในแต่ละบัส ในการทดสอบ 5.3

สรุปผลกระทบในเรื่องแรงดัน

จากการคำนวณกระแสลัดวงจรทั้งสามกรณีการทดสอบพบว่า การวางแผนขยายระบบส่งเพียงอย่างเดียว (กรณีที่ 2) และการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร (กรณีที่ 3) จะไม่มีการละเมิดเงื่อนไขพิกัดแรงดัน

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวางแผนขยายระบบส่งเพียงอย่างเดียว (กรณีที่ 2) ซึ่งเป็น การวางแผนขยายระบบส่งโดยทั่วไป สามารถที่จะแก้ปัญหาการเกินพิกัดกำลังที่ไหลในสายส่งได้ แต่อาจเกิดปัญหาในเรื่องค่ากระแสลัดวงจรซึ่งปัญหาส่วนนี้จะสามารถแก้ไขได้โดยการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร

สรุปผลการทดสอบ

การวางแผนขยายระบบส่งโดยทั่วไปถึงแม้จะแก้ไขปัญหาในเรื่องการส่งกำลังได้แต่อาจเกิดปัญหาค่ากระแสลัดวงจรที่มากเกินพิกัด ซึ่งทำให้ต้องกลับมาพิจารณาปัญหาหลายรอบ การวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการติดตั้ง CLR (วิธีที่นำเสนอ) จะสามารถแก้ไขปัญหาการส่งกำลังไฟฟ้า และปัญหากระแสลัดวงจรได้อย่างพร้อมกัน โดยที่คำตอบที่ได้จากวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมจะเป็นค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดทั้งการก่อสร้างสายส่ง และการติดตั้ง CLR

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การจำกัดกระแสลัดวงจรในระยะสั้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำกัดกระแสลัดวงจรในระยะสั้นโดยการเปิดวงจรบางวงจร และการ By-pass สายส่งโดยการประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมเป็นเครื่องมือในการหาคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาลัดวงจรเพิ่มเติมในกรณีที่มีระบบที่ได้มีการวางแผน อาจมีปัญหาในเรื่องกระแสลัดวงจรได้ โดยเริ่มจากปัญหาการจำกัดกระแสลัดวงจรในระยะสั้นโดยวิธีที่น่าเสนอ จากนั้นจะกล่าวถึงการแก้ไขปัญหาลัดวงจรโดยการประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม รวมไปถึงการทดสอบวิธีที่น่าเสนอกับระบบทดสอบในส่วนสุดท้าย

6.1 ปัญหาการจำกัดกระแสลัดวงจรในระยะสั้นโดยวิธีที่น่าเสนอ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจำกัดกระแสลัดวงจรในระยะสั้นเนื่องจากในบางกรณีแผนที่ระบบส่งไฟฟ้าที่มีอยู่อาจเกิดปัญหาลัดวงจรที่เกินค่าพิกัดที่ตั้งไว้การแก้ไขปัญหาระยะสั้นจึงเป็นวิธีที่ถูกพิจารณานำมาใช้เพื่อเป็นรักษาความน่าเชื่อถือของระบบ โดยพิจารณาวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรที่มีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในที่นี้ คือ ระบบส่งในบริเวณกรุงเทพมหานคร จากที่กล่าวไปในบทที่ 3 วิธีที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มี 2 วิธี คือ

1. การพิจารณาเลือกเปิดวงจรสายส่งบางวงจรออก
2. การพิจารณาทำการ By-pass สายส่งบางบริเวณ

6.1.1 การพิจารณาปัญหา

ในการคัดเลือกสายส่งโดยการสุ่มสายส่งแต่ละวงจรเพื่อนำมาใช้เป็นแผนในเปิดวงจร และคัดเลือกตำแหน่งในการพิจารณาทำการ By-pass ต้องนำมาพิจารณาแต่ละเงื่อนไขที่กำหนดนั้น ถึงแม้ว่าจะเป็นวิธีที่รอบคอบและละเอียดก็ตาม แต่นำมาซึ่งการสูญเสียเวลาในการคำนวณจำนวนมหาศาล

ยกตัวอย่างเช่น ระบบที่ใช้ในการทดสอบมีสายส่งทางเลือกที่สามารถเปิดวงจรทั้งหมด 50 วงจร จะต้องใช้จำนวนรอบหรือเหตุการณ์ในการพิจารณาทั้งหมด เป็น 2^{50} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,125.89 ล้านรอบ

นอกจากนั้นหากนำวิธีการ By-pass สายส่งร่วมเข้ามาจะทำให้การพิจารณา การจำกัดกระแสลัดวงจรระยะสั้นนั้นมีความยากและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

โดยที่ปัญหาในการจำกัดกระแสลัดวงจรนั้น เป็นปัญหาการหาตำแหน่งสายส่งที่ต้องการเปิดวงจร และบริเวณที่ต้องทำการ By-pass โดยให้มีการเปลี่ยนแปลง (การเปิดวงจร และการ By-pass) น้อยที่สุด

เพื่อให้การวางแผนการจำกัดกระแสลัดวงจรมีประสิทธิภาพ และครอบคลุมกับขอบเขตเงื่อนไขต่างๆ จึงจำเป็นต้องมีการนำวิธีทางคณิตศาสตร์มาช่วย ซึ่งในที่นี้คือ วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม (Genetic algorithm) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ มีการเปลี่ยนแปลงระบบน้อยที่สุดในกรณีของการเปิดวงจร และการ By-pass

6.2 การแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่ง ร่วมกับการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยประยุกต์ใช้วิธีทางพันธุกรรม

6.2.1 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function)

ฟังก์ชันเป้าหมายเป็นตัวหลักในการคำนวณหาค่าตอบที่ดีที่สุด เพื่อเป็นตัวชี้คุณภาพของคำตอบ ซึ่งในการคำนวณหาค่าตอบโดยวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมนี้พิจารณาหาค่าที่น้อยที่สุด หรือเป็นการ minimize ปัญหาซึ่งในที่นี้คือค่าใช้จ่ายในการวางแผนการขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรที่สามารถสร้างในรูปสมการคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (6.1)

$$\text{Minimize } Config. = \left(\sum m_{i,j} o_{i,j} + k \sum n_k b_k \right) \quad (6.1)$$

โดยที่

<i>Config.</i>	คือ จำนวนเต็มแสดงจำนวนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด
$m_{i,j}$	คือ ตัวคูณให้ความสำคัญของการเปิดวงจรสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j
$o_{i,j}$	คือ สถานะของสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j ที่พิจารณาการเปิดวงจร
k	คือ ตัวคูณให้ความสำคัญของการเปลี่ยนแปลงโครงข่าย แบบ By-pass
n_k	คือ ตัวคูณให้ความสำคัญของบริเวณที่ทำการ By-pass ที่บัส k
b_k	คือ สถานะของบริเวณบัส k ที่พิจารณาการ By-pass

เมื่อ

$$\sum m_{i,j} o_{i,j} = \text{จำนวนสายส่งที่ทำการเปิดวงจร} \quad (6.2)$$

$$\sum n_k b_k = \text{จำนวนบริเวณที่ทำการ By-pass สายส่ง} \quad (6.3)$$

6.2.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraint)

เนื่องจากการเปิดวงจร และการ By-pass สายส่งออกย่อมส่งผลกระทบต่อปริมาณกระแสที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้นในสภาวะปกติ รวมไปถึง ผลกระทบด้านอื่นๆต่อระบบ ยกตัวอย่างเช่น

- ผลกระทบต่อสายส่ง คือ สายส่งที่มีอยู่ในระบบบางเส้นต้องรับภาระในการส่งกระแสไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกินค่าขีดจำกัดของสายส่งนั้น

- ผลกระทบของแรงดันในแต่ละบัส ซึ่งอาจก่อให้เกิดแรงดันมากกว่าหรือต่ำกว่าที่กำหนด

ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดจำเป็นต้องมีการพิจารณา เงื่อนไขบังคับต่างๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดความเหมาะสมของคำตอบที่ได้ หรือเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของคำตอบนั้น กล่าวอีกนัยหนึ่งเป็นตัวแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสม และความรอบคอบของแผนในการแก้ไขปัญหาการวางแผนสายส่ง โดยการหาคำตอบโดยวิธีที่นำเสนอประกอบไปด้วยเงื่อนไขบังคับดังต่อไปนี้

1. เงื่อนไขรูปร่างของโครงข่าย (Network configuration)

2. เงื่อนไขความสมดุลของโหลด (Load balance)

$$P_i = P_{G_i} - P_{D_i} - P_{loss} \quad (6.4)$$

$$Q_i = Q_{G_i} - Q_{D_i} - Q_{loss} \quad (6.5)$$

3. เงื่อนไขขีดจำกัดการจ่ายกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \quad (6.6)$$

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max} \quad (6.7)$$

4. เงื่อนไขขีดจำกัดเรื่องแรงดันในแต่ละบัส

$$|LV|_i \leq |V|_i \leq |UV|_i \quad (6.8)$$

5. เงื่อนไขพิกัดของกระแสลัดวงจรในแต่ละบัส

$$|I_{f,i}| \leq WC_i \quad (6.9)$$

6. เงื่อนไขพิกัดของกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจร

$$S_{j,k} \leq FL_{j,k} \quad (6.10)$$

7. ข้อกำหนดอื่นๆ

$$0 \leq s_{ij} \leq s_{ij}^{\max} \quad (6.11)$$

$$ij \in \mathcal{E} \cup \mathcal{C}; i \in \mathcal{N} \quad (6.12)$$

$$k \in \mathcal{O} \quad (6.13)$$

โดยที่

P_i, Q_i คือ กำลังจริง และกำลังปรากฏที่ฉีดเข้าบัส i

P_{G_i}, Q_{G_i} คือ กำลังจริง และกำลังปรากฏที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าฉีดเข้าบัส i

P_{D_i}, Q_{D_i}	คือ กำลังจริง และกำลังปรากฏที่โหลดที่บัส i
P_{loss}, Q_{loss}	คือ กำลังจริง และกำลังปรากฏที่สูญเสีย
$P_{G_i}^{max}, Q_{G_i}^{max}$	คือ พิกัดมากที่สุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายได้ทั้งกำลังจริง และกำลังปรากฏ
$P_{G_i}^{min}, Q_{G_i}^{min}$	คือ พิกัดน้อยสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายได้ทั้งกำลังจริง และกำลังปรากฏ
$ V _i$	คือ ขนาดของแรงดันที่บัส i (p.u.)
$ LV _i$	คือ ขนาดของแรงดันที่น้อยสุดที่บัส i (p.u.)
$ UV _i$	คือ ขนาดของแรงดันที่มากที่สุดที่บัส i (p.u.)
$ I_{f,i} $	คือ ขนาดของกระแสผิดพ่วง (กระแสลัดวงจร) ที่บัส i (A)
WC_i	คือ ขนาดของพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บัส i (A)
$S_{j,k}$	คือ กำลังที่ไหลในสายส่ง $j-k$ (MVA)
$FL_{j,k}$	คือ พิกัดของสายส่ง $j-k$ (MVA)
\mathcal{E}	คือ เซ็ตของเส้นทาง ij ที่มีสายส่งติดตั้งอยู่แล้วในระบบ
C	คือ เซ็ตของเส้นทาง ij ที่ใช้เป็นทางเลือกในการก่อสร้างสายส่ง
N	คือ เซ็ตของบัสในระบบไฟฟ้า
s_{ij}^{max}	คือ จำนวนวงจรของสายส่งที่สามารถก่อสร้างได้สูงสุดระหว่างบัส i กับบัส j
O	คือ เซ็ตของตำแหน่งที่พิจารณาสามารถติดตั้ง CLR ได้

เงื่อนไขที่แสดงด้านบนแสดงถึงกระบวนการคำนวณหาคำตอบในวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรต้องอยู่ในเงื่อนไขความปลอดภัยต่างๆด้วย โดยมีความหมายดังต่อไปนี้

รูปร่างของโครงข่าย (Network configuration)

เงื่อนไขนี้ถูกพิจารณาเป็นเงื่อนไขแรก เนื่องมาจากการปลดสายส่งบางวงจรก่อให้เกิดลักษณะระบบที่แบ่งแยกกัน (Islanding) ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการคือระบบจะแบ่งออกไปคนละส่วน ซึ่งอาจก่อให้เกิดการได้รับพลังงานไฟฟ้าไม่เพียงพอได้ในบางจุดโหลด อีกทั้งเป็นการลดภาระการคำนวณที่สำคัญอย่างหนึ่งโดยการไม่ต้องเสียเวลาพิจารณาเงื่อนไขบังคับอื่นหากละเมิดเงื่อนไขบังคับนี้

ความสมดุลของโหลด (Load balance) และ ขีดจำกัดการจ่ายกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เงื่อนไขบังคับนี้เป็นเงื่อนไขบังคับพื้นฐานกล่าวคือระบบต้องอยู่ในสถานะที่โหลดได้รับพลังงานไฟฟ้าเพียงพอ รวมไปถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเครื่องต้องไม่เกินค่าพิกัดของกำลังการผลิต

ขีดจำกัดเรื่องแรงดันในแต่ละบัส

เนื่องจากผลกระทบของการเปลี่ยนสถานะของสายส่งส่งผลกระทบต่อเรื่องแรงดัน จึงจำเป็นที่จะพิจารณาเงื่อนไขแรงดันประกอบไปด้วย โดยที่ในทางปฏิบัติกำหนดไว้ที่ 0.98-1.05 p.u.

พิกัดของกระแสลัดวงจรในแต่ละบัส

พิกัดในเรื่องกระแสลัดวงจรในการวิจัยนี้ถือว่าเป็นเรื่องที่พิจารณาเป็นหลัก โดยไม่ได้เพียงแต่แสดงถึงพิกัดของอุปกรณ์ ป้องกันเพียงอย่างเดียวแต่ค่ากระแสลัดวงจรที่อาจเกิดขึ้นที่บัสใด ๆ ต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งค่านี้อาจเป็นค่าที่ทางด้านระบบแรงดันปานกลางเป็นตัวกำหนด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสลัดวงจรที่มีค่านี้นั้นๆ ที่ระบบแรงดันสูง ส่งผลกระทบต่อระบบแรงดันปานกลาง

พิกัดของกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้น

การปลดสายส่งบางวงจรรอออกนั้นส่งผลให้ สายส่งวงจรที่เหลืออยู่ต้องแบกรับภาระการส่งพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เพื่อเป็นการป้องกันการส่งพลังงานเกินพิกัดของสายส่ง ซึ่งนำมา ซึ่งความเสียหาย จึงจำเป็นต้องพิจารณาพิกัดทางความร้อนของสายส่งร่วมด้วย

6.2.3 กระบวนการหาคำตอบโดยวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม

กระบวนการหาคำตอบโดยวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมที่ประกอบไปด้วยหลายขั้นตอนดังนี้

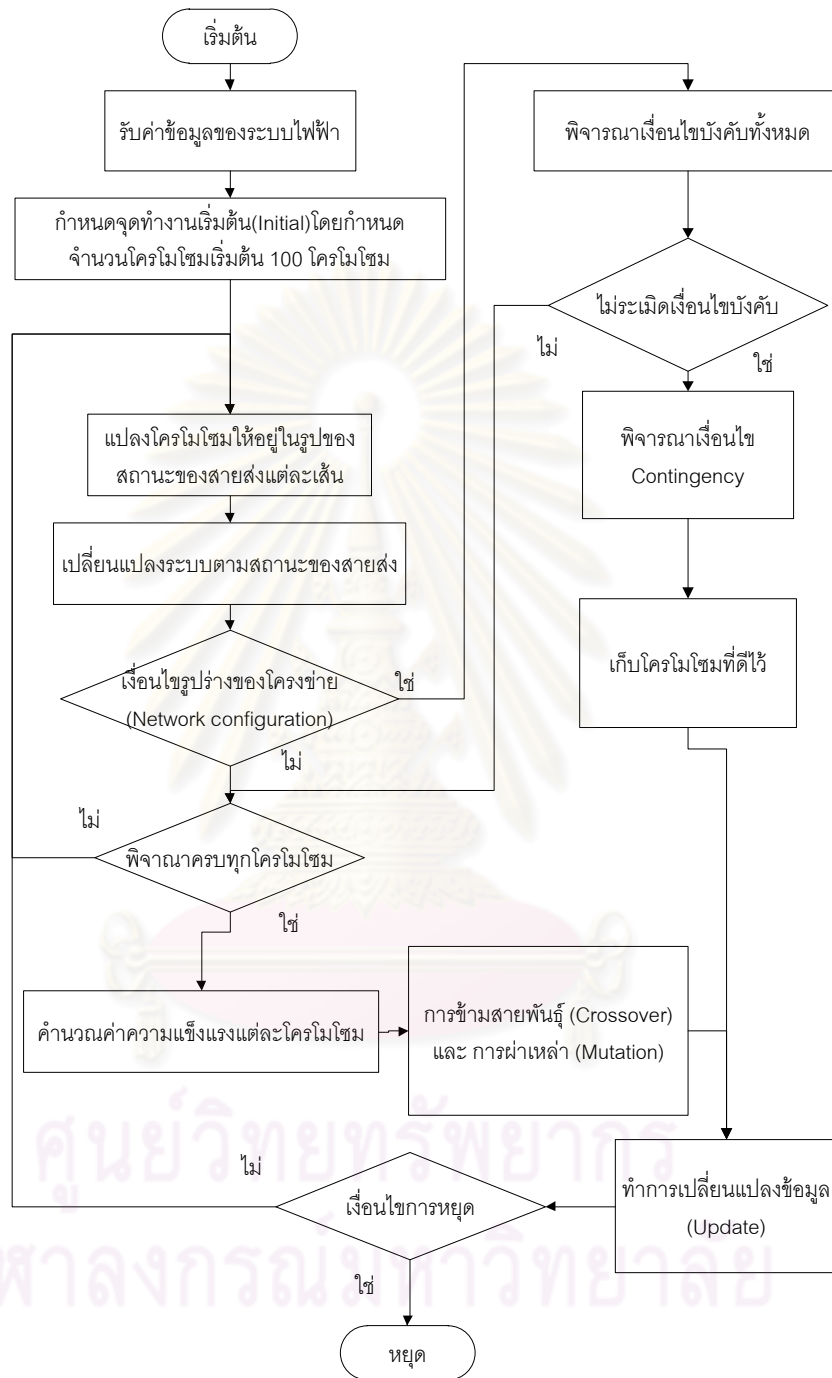
- การประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness Value)
- การคัดเลือก (Reproduction)
- การข้ามสายพันธุ (Crossover)
- การผ่าเหล่า (Mutation)
- การเลือกโครโมโซมเพื่อรักษาไว้ในรุ่นถัดไป
- เงื่อนไขการหยุด

สามารถพิจารณาโดยใช้วิธีเดียวกับที่กล่าวไว้ในบทที่ 4

6.2.4 หลักการวิเคราะห์

การจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการเลือกเปิดวงจร และการ By-pass สายส่งในการวิจัยชิ้นนี้ เริ่มจากการหาจุดทำงานเริ่มต้น (Initial) ก่อนโดยจุดเริ่มต้นนี้มาจากการสุ่มสถานะต่างๆของสาย

ส่งในแต่ละเส้นมาก่อน จากนั้นนำมาคำนวณโดยวิธีทางพันธุกรรมประกอบกับการพิจารณาเงื่อนไขบังคับร่วมด้วย โดยแสดงแผนภาพแนวคิดโดยรวมไว้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แผนภาพแนวคิดโดยรวม

โดยกำหนดให้ การคำนวณโดยวิธีทางพันธุกรรมนี้ มีโครโมโซม แบ่งออกเป็นสองส่วนต่อกันโดยส่วนที่หนึ่ง โครโมโซมแต่ละตัวแทนสถานะของสายส่งที่สามารถเปิดวงจรได้โดยที่แต่ละบิตของโครโมโซมแทนสถานะของสายส่งนั้นๆ และส่วนที่สองแต่ละบิตสถานะของทำ By-pass ดัง

รูปที่ 6.2 โดยการแปลความหมายของสถานะของสายส่งแต่ละวงจรในรูปของโครโมโซม สามารถแสดงโดยบิตของโครโมโซม 2 บิต ด้วยกันโดยพิจารณาเป็นเลขฐานสอง ดังนี้

ส่วนที่หนึ่ง

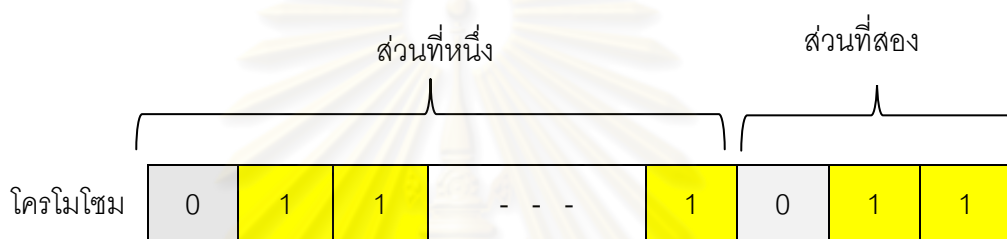
00 แทน สถานะ 0 ของสายส่ง หมายความว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

01 แทน สถานะ 1 ของสายส่ง หมายความว่า เปิดวงจรออกเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจร

ส่วนที่สอง

00 แทน สถานะ 0 ของการทำ By-pass หมายความว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

01 แทน สถานะ 1 ของการทำ By-pass หมายความว่า ทำการ By-pass บริเวณนั้นๆ



รูปที่ 6.2 โครโมโซมแทนสถานะของสายส่ง

6.3 การทดสอบวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในระยะสั้นโดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม

การทดสอบในบทนี้ จะใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยในส่วนวิธีการออปติไมเซชันทางคณิตศาสตร์ นั้นพัฒนาโดยเขียนโปรแกรมบน MATLAB สำหรับการคำนวณ power flow ในขั้นตอนของวิธีที่นำเสนอ จะทำโดยโปรแกรม MATPOWER 4.0

6.3.1 การทดสอบการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรโดยการเปิดวงจรบางวงจรออกเพื่อแก้ไขปัญหาในระยะสั้นโดยวิธีทางพันธุกรรม

ในหัวข้อนี้ จะทำการทดสอบการวางแผนการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรในระบบทดสอบด้วยวิธีการออปติไมเซชันโดยวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรม โดยทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ที่ได้มีการปรับปรุงข้อมูลบางส่วนเพื่อให้มีความสอดคล้องกับในทางปฏิบัติมากยิ่งขึ้น คือได้มีการเพิ่มข้อมูลค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร และได้มีการเพิ่มโหลดเพื่อแสดงถึงการขยายตัวของระบบไฟฟ้ากำลัง รูปที่ 6.3 แสดงระบบทดสอบ 30 บัส ที่ใช้ในการทดสอบ สำหรับรายละเอียดของข้อมูลบัส ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่อง

กำเนิดไฟฟ้า ข้อมูลสายส่งในระบบ และข้อมูลสายส่งที่ใช้เป็นทางเลือกในการก่อสร้างเพิ่ม และเปิดวงจรแสดงไว้ในภาคผนวก ก.3

โดยที่วัตถุประสงค์ของการทดสอบในหัวข้อนี้ คือ ต้องการพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการใช้กระบวนการวิธีทางพันธุกรรมเป็นเครื่องมือในการคัดเลือกสายส่งที่ทำการเปิดวงจรออกเพื่อจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร

นอกจากนั้นเพื่อแสดงให้เห็นข้อแตกต่างของวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยวิธีที่นำเสนอ กับวิธีที่ใช้ในทางปฏิบัติ ในส่วนการทดลองนี้จึงได้แบ่งเป็น 2 กรณีในการเลือกสายส่งที่ต้องการปลดออกดังนี้

กรณีที่ 1 การเลือกสายส่งที่ต้องการเปิดวงจร โดยเลียนแบบวิธีที่ได้มีการปฏิบัติมาก่อน โดยการใช้หลักเลือกเปิดวงจรสายส่งเฉพาะที่อยู่ใกล้ กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ และพิจารณาเพียงเงื่อนไขของกระแสลัดวงจรเพียงอย่างเดียวเป็นลำดับแรก

กรณีที่ 2 การเลือกแบบใช้วิธีที่นำเสนอโดยพิจารณาเงื่อนไขของระบบที่กล่าวมาในบทที่ 4 อย่างครบถ้วน

ในการวิเคราะห์การจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเบื้องต้นพิจารณาเพียงเงื่อนไขบังคับข้อทั่วไปไม่ได้พิจารณาเงื่อนไขบังคับ contingency n-1

โดยจะนำผลของการปลดสายส่งต่อระบบไฟฟ้าทั้ง 2 กรณีมาเปรียบเทียบในเงื่อนไขของระบบดังกล่าวต่อไป

ข้อมูลค่าพิกัด

พิกัดของเงื่อนไขบังคับต่างๆที่ใช้ในระบบทดสอบนี้มีการกำหนด ดังนี้

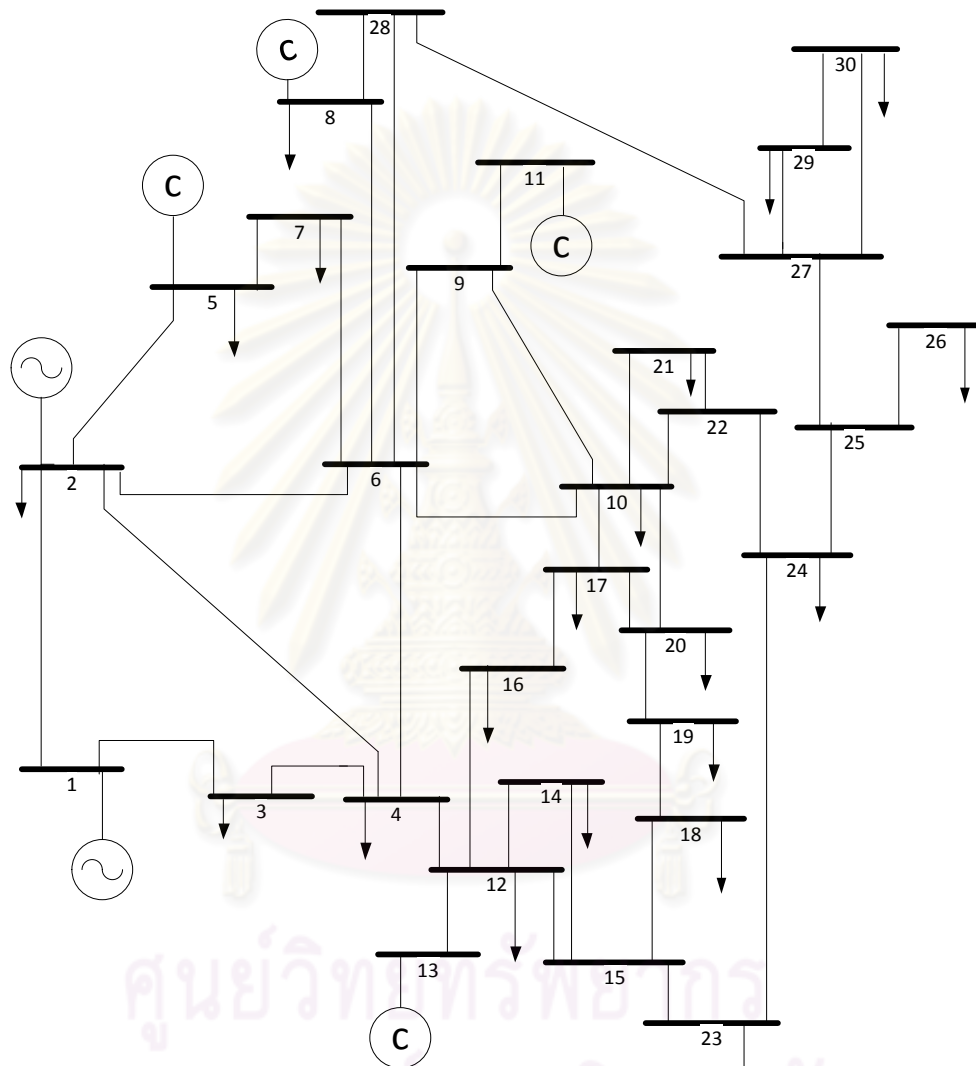
- ขนาดของแรงดันที่น้อยสุดที่บัสใดๆ ($|LV|_i$) เท่ากับ 0.95 p.u.
- ขนาดของแรงดันที่มากที่สุดที่บัสใดๆ ($|UV|_i$) เท่ากับ 1.10 p.u.
- ขนาดของพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บัสใดๆ (WC_i) เท่ากับ 10 kA
- พิกัดกำลังของสายส่งใดๆ ($FL_{j,k}$) เท่ากับ 180 MVA

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบทั้ง 2 กรณีการเลือกสายส่งที่จะเปิดวงจรได้คำตอบดังนี้

กรณีที่ 1 ทำการเลือกสายส่งที่อยู่ใกล้กับแหล่งจ่ายขนาดใหญ่ในที่นั่งอยู่ที่บัสที่ 1 จึงทำการสุ่มเลือกสายที่จะเปิดวงจรโดยหลักการคัดเลือกนั้นพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขค่ากระแสลัดวงจรเท่านั้น ซึ่งคำตอบที่ คือ เลือกเปิดวงจร 2 (จากบัส 1 ไปบัส 3), 3 (จากบัส 2 ไปบัส 4) และ 6 (จากบัส 2 ไปบัส 6) ตามรูปที่ 6.3

กรณีที่ 2 จากวิธีที่ได้เสนอได้คำตอบของการเลือกสายส่งที่ต้องการจะเปิดวงจร คือเปิดวงจร 3 (จากบัส 2 ไปบัส 4), 5 (จากบัส 2 ไปบัส 5) และ 12 (จากบัส 6 ไปบัส 10) ตามรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ระบบทดสอบแบบปรับปรุงระบบ IEEE 30 บัส

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาถึงเงื่อนไขบังคับของระบบแสดงดังตารางที่ 6.1 และ 6.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.1 กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสในแต่ละบัส ในการทดสอบ 6.1

บัส	กระแสลัดวงจร 3 เฟส (A)		
	ไม่มีการเปิดวงจร (กรณีฐาน)	การเลือกปลดสายส่ง	
		กรณีที่ 1 2, 3 และ 6	กรณีที่ 2 3, 5 และ 12 (GA)
1	9301.538	7053.975	8672.282
2	10748.41	7919.11	8753.512
3	7374.656	4317.528	6831.043
4	9164.517	5613.124	8031.498
5	7394.533	7398.515	5531.896
6	10281.86	7113.817	9739.493
7	6677.342	5852.691	6222.164
8	8602.346	6830.071	8373.679
9	5667.578	4942.027	5322.521
10	4889.681	4257.317	4161.086
11	5276.219	5097.28	5198.237
12	5426.132	4693.809	5189.968
13	5398.075	5113.579	5315.872
14	2717.468	2501.194	2640.514
15	3840.448	3433.749	3667.381
16	3304.337	2997.931	3120.611
17	3747.247	3354.657	3370.762
18	2556.181	2356.945	2431.487
19	2547.995	2348.648	2394.024
20	2713.968	2491.503	2522.739
21	3872.58	3446.748	3429.094
22	3845.304	3423.868	3420.598
23	2577.318	2369.846	2474.893
24	2896.271	2628.998	2735.024
25	1978.884	1826.552	1936.522

ตารางที่ 6.1 (ต่อ) กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสในแต่ละบัส ในการทดสอบ 6.1

บัส	กระแสลัดวงจร 3 เฟส (A)		
	ไม่มีการเปิดวงจร (กรณีฐาน)	การเลือกปลดสายส่ง	
		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
		2, 3 และ 6	3, 5 และ 12 (GA)
26	904.4895	863.0836	891.5346
27	2115.328	1934.015	2083.104
28	6579.896	5186.073	6369.504
29	1094.228	1033.959	1081.273
30	989.7057	937.8025	978.1307

ผลการทดลองเมื่อพิจารณาถึงกระแสลัดวงจรพบว่าในกรณีที่ยังไม่มีเปิดวงจรสายส่งบางวงจรรอบนอก (กรณีฐาน) กระแสลัดวงจรในบัสที่ 2 มีค่าที่มากกว่าค่าของฟักดอุปกรณ์ป้องกันที่กำหนดไว้ แต่เมื่อมีการเปิดวงจรสายส่งออกโดยการเลือกทั้ง 2 กรณีนี้ส่งผลให้กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าฟักดอุปกรณ์ป้องกันที่กำหนดไว้

ตารางที่ 6.2 กำลังที่ไหลในสายส่งในแต่ละวงจร ในการทดสอบ 6.1

สายส่ง		กำลังที่ไหลในสายส่ง (MVA)		
		ไม่มีการเปิดวงจรสาย (กรณีฐาน)	การเปิดวงจรสายส่ง	
			กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
จากบัส	ถึงบัส		2, 3 และ 6	3, 5 และ 12 (GA)
1	2	173.3071	342.8267	131.9445
1	3	87.6498	0	150.5191
2	4	43.65269	0	0
3	4	82.1419	2.400888	138.9356
2	5	82.36132	340.5669	0
2	6	60.37998	0	147.2466
4	6	72.12733	46.30852	78.41122
5	7	14.95105	195.1184	99.93011
6	7	38.13212	155.0953	127.2242
6	8	29.56306	30.65984	30.14936

ตารางที่ 6.2 (ต่อ) กำลังที่ไหลในสายส่งในแต่ละวงจร ในการทดสอบ 6.1

สายส่ง		กำลังที่ไหลในสายส่ง (MVA)		
		ไม่มีการเปิดวงจรสาย (กรณีฐาน)	การเปิดวงจรสายส่ง	
			กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
จากบัส	ถึงบัส		2, 3 และ 6	3, 5 และ 12 (GA)
6	9	27.72124	32.22184	35.97763
6	10	15.83966	18.31626	0
9	11	5.48×10^{-4}	1.18×10^{-14}	4.44×10^{-14}
9	10	27.72124	32.22184	35.97763
4	12	44.19322	36.03888	50.3376
12	13	4.20×10^{-14}	2.64×10^{-14}	4.86×10^{-15}
12	14	7.85752	7.069037	8.419498
12	15	17.89177	14.48321	20.20232
12	16	7.243938	3.286633	10.51578
14	15	1.583193	0.802622	2.134954
16	17	3.690104	0.245559	6.913921
15	18	6.016829	3.990237	7.840871
18	19	2.778235	0.767471	4.577374
19	20	6.743796	8.760987	4.947218
10	20	9.02535	11.07659	7.208031
10	17	5.331669	9.274786	2.118894
10	21	15.78559	16.38033	14.24042
10	22	7.618295	8.006384	6.610282
21	22	1.82626	1.24077	3.363177
15	23	5.03533	2.921702	6.017172
22	24	5.739348	6.70738	3.200563
23	24	1.803945	0.310281	2.776453
24	25	1.218219	2.388757	2.790152
25	26	3.544627	3.546318	3.545414
25	27	4.786934	5.973881	6.37871

ตารางที่ 6.2 (ต่อ) กำลังที่ไหลในสายส่งในแต่ละวงจร ในการทดสอบ 6.1

สายส่ง		กำลังที่ไหลในสายส่ง (MVA)		
		ไม่มีการเปิดวงจรสาย (กรณีฐาน)	การเปิดวงจรสายส่ง	
			กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
จากบัส	ถึงบัส		2, 3 และ 6	3, 5 และ 12 (GA)
27	29	6.189946	6.194848	6.192031
27	30	7.092003	7.098259	7.094665
29	30	3.703715	3.705215	3.704353
8	28	0.546818	0.122482	0.130424
6	28	18.6735	19.47124	19.86527
28	27	18.06888	19.26699	19.66541

ผลการทดลองเมื่อพิจารณาถึงพิกัดของกำลังที่ไหลในสายส่งแต่ละวงจรพบว่าในสภาวะที่ยังไม่มีการเปิดวงจรสายส่งนั้น ถึงแม้จะมีขนาดกระแสลัดวงจรเกินเงื่อนไขที่กำหนดดังที่กล่าวแต่ค่าของกำลังที่ไหลในแต่ละสายนั้นไม่เกินค่าพิกัดที่กำหนด เช่นเดียวกับ กำลังที่ไหลในระบบที่มีการเปิดวงจรโดยเลือกสายส่งโดยวิธีที่กำหนด แต่ในทางกลับกัน กำลังที่ไหลในระบบที่มีการเปิดวงจรโดยใช้วิธีการเลือกสายส่งเลียนแบบในทางปฏิบัติกลับมีบางสายส่งที่มีกำลังไหลเกินพิกัดสายส่งที่กำหนดไว้

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดลองโปรแกรมการวิเคราะห์การเลือกสายส่งที่ต้องการเปิดวงจรออกเพื่อจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าโดยพิจารณาถึงเงื่อนไขบังคับทั่วไป พบว่าการเลือกเปิดวงจรสายส่งบางวงจรโดยใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมเป็นเครื่องมือในการเลือกสายส่งที่ต้องการจะเปิดวงจรออกสามารถ ช่วยจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบได้ตามค่าที่กำหนด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ปฏิบัติมาก่อนหน้านี้ ที่มีปัญหาในเรื่องการละเมิดเงื่อนไขบังคับที่ตามมา ซึ่งทำให้ต้องมีการพิจารณาหลายรอบ การใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมจึงสามารถช่วยในการคัดเลือกสายส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า รวมไปถึงการยืนยันหลักการในการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการเลือกเปิดวงจรสายส่งบางวงจรออกได้

6.3.2 กรณีศึกษาการแก้ไขปัญหาการจำกัดกระแสลัดวงจรในระยะสั้นโดยวิธีการเปิดวงจร และการ By-pass สายส่งในระบบส่งไฟฟ้ากำลังกับระบบส่งไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานคร

ในหัวข้อนี้ เป็นกรณีศึกษาการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรในระบบส่งในเขตกรุงเทพมหานครของประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วยบัสจำนวนบัสจำนวน 254 บัส สายส่งจำนวน 429 วงจร มีความต้องการใช้ไฟฟ้าภายในเขตที่พิจารณารวม 17,519.6 MW และมีกำลังการผลิตภายในบริเวณที่พิจารณารวม 25,547.7 MW

รูปที่ 6.4 แสดงแผนที่ระบบไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานคร สำหรับรายละเอียดข้อมูลบัสกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบริเวณที่พิจารณา สายส่งและหม้อแปลงรวมทั้งข้อมูลต่างๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก ก.2

ในกรณีศึกษานี้ได้มีการพิจารณาแนวทางที่ใช้ในการทดสอบถึงผลกระทบต่อระบบ เมื่อพิจารณาแนวทางในการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

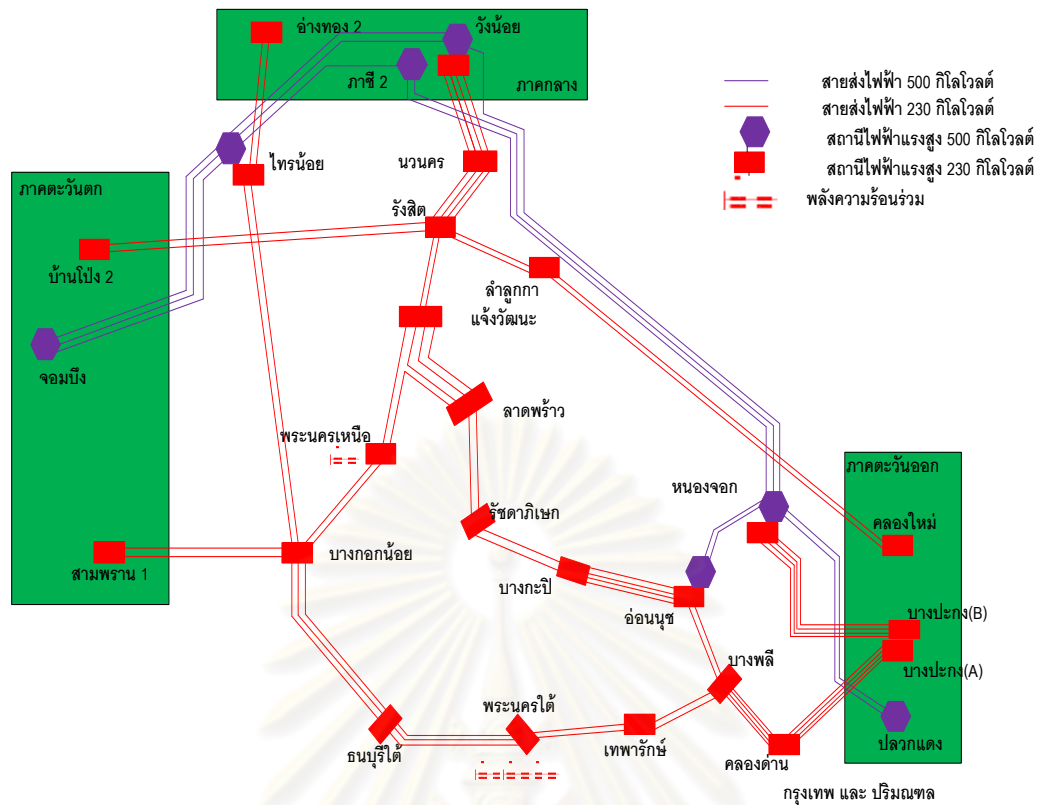
กรณีที่ 1 ทำการคัดเลือกสายส่งที่ทำการเปิดวงจรออก

กรณีที่ 2 ทำการคัดเลือกบริเวณที่ทำการ By-pass สายส่ง

โดยจะนำผลของการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายต่อระบบไฟฟ้าทั้ง 2 กรณีมาเปรียบเทียบในเงื่อนไขของระบบดังกล่าวต่อไป

วัตถุประสงค์ของการทดสอบในหัวข้อนี้ คือ ศึกษาผลการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบของจริงในที่นี้คือ ระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร โดยวิธีการเปิดวงจร และการ By-pass สายส่ง อีกทั้งศึกษาผลกระทบที่ตามมาเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงจาก 2 วิธีข้างต้น เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาได้อย่างเหมาะสม

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.4 แผนที่ระบบส่งไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานคร

การทดสอบ

การทดสอบนี้ได้แสดงใน 2 กรณีในการศึกษาดังนี้

กรณีที่ 1 ทำการเลือกทำการตัดเลือกสายส่งที่ทำการเปิดวงจรในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อกับบัส RS เนื่องจากปริมาณกระแสลัดวงจรที่บัสนี้มีค่าสูงที่สุด โดยรายละเอียดการเปิดวงจรแสดง ตามตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 สถานะสายส่งก่อนและหลังการพิจารณาเปิดวงจร การทดสอบ 6.2

บริเวณที่ทำการ เปิดวงจร	สายส่ง			
	จากบัส	ถึงบัส	สถานะ Circuit breaker	
			ก่อน เปิดวงจร	หลัง เปิดวงจร
RS	RS (11810)	NV (11819)	ON	OFF
RS	RS (11810)	LLA (11820)	ON	OFF
RS	RS (11810)	BP2 (71802)	ON	OFF
RS	RS (11810)	CHW (11804)	ON	OFF

ผลการทดสอบ

การทดสอบเลือกเปิดดวงจรบางดวงจรออก ผลการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรหลังการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายในบริเวณที่ค่ากระแสลัดวงจรมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสในแต่ละบัส ในกรณีที่ 1 การทดสอบ 6.2

บัส	กระแสลัดวงจร (kA)				
	ไม่มีการเปิดดวงจร	Open RS-NV	Open RS-LLA	Open RS-NV และ RS-LLA	Open RS-CHW
CHW_230	38.776	38.588	37.917	37.724	36.011
LPR_230	38.018	37.869	37.333	37.180	35.769
RS_230	41.286	41.007	40.033	39.751	40.020
LLA_230	26.290	26.226	20.924	20.896	26.0049

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การเปิดดวงจรสามารถลดปริมาณกระแสลัดวงจรได้มากที่สุดประมาณ 5 kA โดยที่การลดปริมาณกระแสลัดวงจรนี้ ยังส่งผลกระทบต่อบริเวณอื่นที่อยู่ห่างออกไปอีกด้วย แต่ปริมาณกำลังที่ไหลในสายส่งจะมีปริมาณที่มากขึ้น โดยจากการทดลองมีปริมาณมากที่สุดที่พบ ประมาณ 590 MW

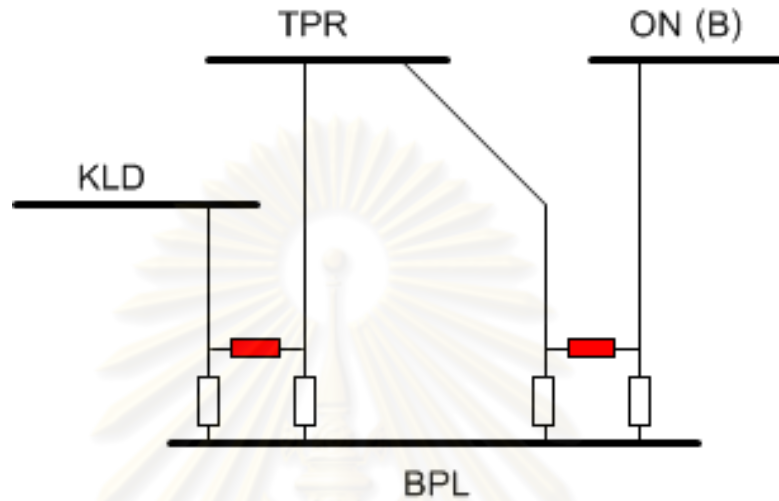
กรณีที่ 2 ทำการเลือกทำการตัดเลือกบริเวณที่สามารถทำการ by-pass สายส่งได้ โดยที่การตัดเลือกบริเวณนั้นอาศัยลักษณะตามโครงข่ายของระบบนั้นๆ ซึ่งระบบที่นำมาเป็นกรณีศึกษานี้สามารถพิจารณาการ by-pass สายส่งได้ 2 บริเวณ ตามรูปที่ 6.5 และ 6.6

การ By-pass สายส่ง

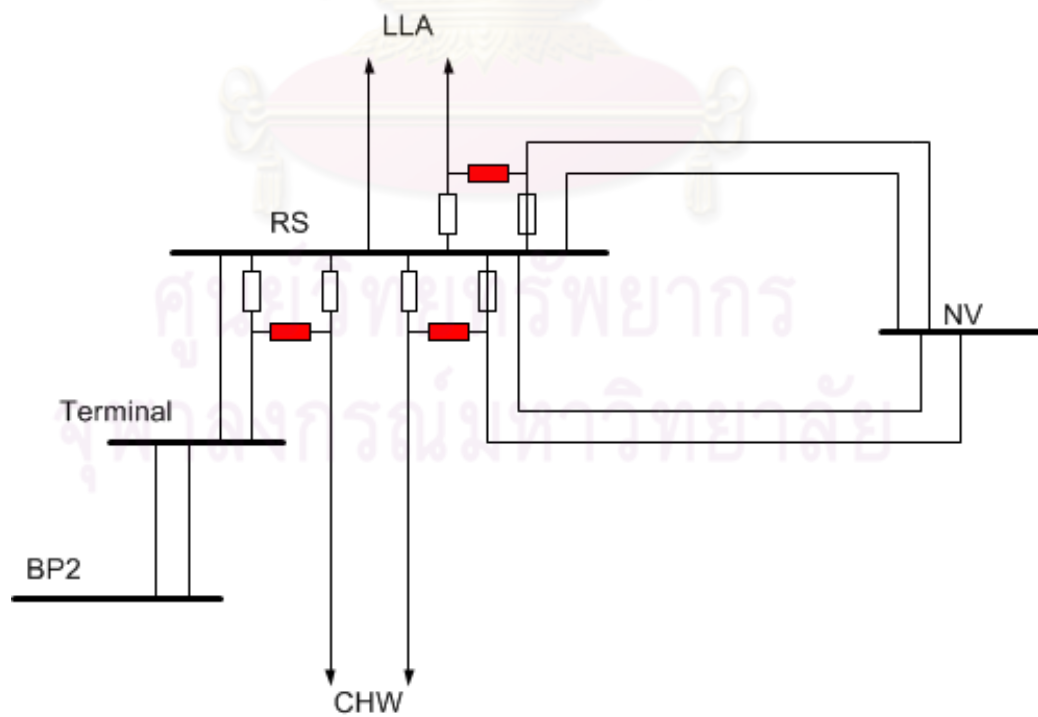
รายละเอียดบริเวณที่ทำการเปิดดวงจรในการทดสอบนี้ประกอบด้วย 4 จุด ดังนี้

1. ทำการ By-pass สายส่งบริเวณ BPL (บางพลี) จากบัส TPR (เทพารักษ์) ไปบัส ON (อ่อนนุช)
2. ทำการ By-pass สายส่งบริเวณ RS (รังสิต) จากบัส CHW (แจ้งวัฒนะ) ไปบัส NV (นวนคร)

3. ทำการ By-pass สายส่งบริเวณ RS (รังสิต) จากบัส LLA (ลำลูกกา) ไปบัส NV (นวนคร)
4. ทำการ By-pass สายส่งบริเวณ BPL (บางพลี) จากบัส TPR (เทพารักษ์) ไปบัส KLD (คลองด่าน)



รูปที่ 6.5 การ by-pass สายส่งบริเวณบางพลี (BPL)



รูปที่ 6.6 การ by-pass สายส่งบริเวณรังสิต (RS)

ผลการทดสอบ

การทดสอบเลือกเปิดดวงจรบางวงจรรอบ ผลการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรหลังการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายในบริเวณที่ค่ากระแสลัดวงจรมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสในแต่ละบัส ในกรณีที่ 2 การทดสอบ 6.2

บัส	กระแสลัดวงจร (kA)				
	ไม่มีการ by-pass	TPR-ON (BPL)	CHW-NV (RS)	LLA -NV (RS)	TPR -KLD (BPL)
BPL	27.134	26.553	27.107	26.946	26.867
CHW	38.776	38.769	37.502	37.972	38.772
LPR	38.018	38.014	36.985	37.378	38.013
RS	41.286	41.270	39.733	40.109	41.283
TPR	25.409	24.967	25.386	25.250	24.642
NV	35.603	35.594	35.605	35.264	35.601
NB(B)	31.303	31.300	30.555	30.839	31.300

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การ By-pass สายส่งสามารถลดปริมาณกระแสลัดวงจรได้มากที่สุดประมาณ 2 kA โดยบริเวณที่ส่งผลมากที่สุดจะอยู่ในบริเวณที่เกี่ยวข้อง ในส่วนของปริมาณกำลังที่ไหลในสายส่งบางวงจรมีค่ามากขึ้นแต่มีค่าน้อยกว่า การเปิดดวงจร

สรุปผลการทดสอบ

การเปิดดวงจร สามารถลดปริมาณของกระแสลัดวงจรได้มากกว่าวิธี By-pass แต่ผลกระทบในเรื่องกำลังที่ไหลในสายส่งจะมีค่ามากกว่า

การเปิดดวงจร เป็นวิธีการลดปริมาณกระแสลัดวงจรที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณที่อยู่ห่างออกไปเปรียบเทียบกับวิธีการ By-pass ที่จะสามารถลดเฉพาะในบริเวณที่ใกล้เคียงเท่านั้น

ถึงแม้ว่าการแก้ไขปัญหกระแสลัดวงจรโดยการเปิดดวงจร และการ By-pass สายส่งนั้น ถึงแม้จะสามารถลดปริมาณกระแสลัดวงจรได้ก็ตามแต่เป็นการแก้ไขเฉพาะหน้าในกรณีฉุกเฉินเท่านั้น อันเนื่องมาจากต้องสูญเสียวงจรมุ่งไปโดยเปล่าประโยชน์ไปในการเปิดดวงจร

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยกระบวนการหาคำตอบใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมเป็นเครื่องมือในการหาคำตอบที่ดีที่สุด หรือเป็นคำตอบที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด โดยเริ่มจากการทดสอบวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยวิธีติดตั้ง CLR โดยประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมเป็นเครื่องมือในการติดตั้ง และขนาดของ CLR โดยทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส จุดประสงค์เพื่อเป็นการทดสอบเครื่องมือการค้นหาคำตอบรวมไปถึงศึกษาผลกระทบต่อระบบที่ตามมาจากนั้นไปสู่การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยติดตั้ง CLR กับระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจคือสามารถที่จะแก้ไขปัญหาทั้งสองอย่างได้ในคราวเดียว จากนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการเพิ่มกรณีศึกษาการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการเลือกติดตั้ง CLR ในกรณีที่ระบบมีการละเมิดเงื่อนไขกระแสลัดวงจรเกิดขึ้น ซึ่งนำไปศึกษา และทดสอบกับระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สะท้อนผลกระทบที่ตามมาต่อระบบจริง และสามารถนำไปใช้ในการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกรุงเทพมหานคร นอกจากนั้นผลที่ได้สะท้อนถึงประโยชน์ของวิธีการวางแผนโดยวิธีที่นำเสนอนี้ว่ามีความรอบคอบ และมีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาทั้งสองอย่างได้อย่างเหมาะสม

จากผลการทดสอบการวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าร่วมกับการพิจารณาการจำกัดกระแสลัดวงจรกับระบบส่งบริเวณกรุงเทพมหานครพบว่าสามารถที่จะแก้ไขปัญหาการส่งกำลังไฟฟ้าไม่ให้มีค่ามากกว่าค่าพิกัดที่ตั้งไว้ อีกทั้งยังสามารถที่จะแก้ไขปัญหาของปริมาณของกระแสที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สามารถจำกัดค่ากระแสลัดวงจรให้ไม่เกินค่าพิกัดกระแสลัดวงจรที่กำหนดได้ ซึ่งคำตอบของแผนในการแก้ไขปัญหาการส่งกำลังไฟฟ้า และปัญหาปริมาณกระแสลัดวงจร นั้นเป็นแผนที่ได้มีการพิจารณาถึงเงื่อนไขบังคับของระบบไฟฟ้าซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับที่มีความจำเป็นในการพิจารณาการวางแผนระบบส่งไฟฟ้า เช่น โครงข่ายของระบบจะต้องไม่มีการแบ่งแยกออกเป็นหลายส่วน แรงดันไฟฟ้าในระบบ พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมไปถึงเงื่อนไขความมั่นคงของระบบที่ได้มีการพิจารณา การป้องกันความผิดพลาดของอุปกรณ์หรือสายส่งในระบบที่มีโอกาส

หลุดออก หรือไม่สามารถทำงานได้หนึ่งอุปกรณ์ (Contingency, N-1) เพื่อให้คำตอบที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ดี วิธีการดังกล่าวใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างนาน เนื่องจากระหว่างขั้นตอนวิธีทางพันธุศาสตร์แต่ละรุ่นการถ่ายทอดต้องผ่านขั้นตอนการตรวจสอบว่าระบบที่ได้จากระบบการค้นหาคำตอบต้องไม่มีการละเมิดเงื่อนไขบังคับของระบบ นอกจากนี้ในขั้นตอนการหาคำตอบที่ดีที่สุดจะต้องทำการคำนวณกำลังการไหลของไฟฟ้า ค่ากระแสลัดวงจร เงื่อนไขของระบบต่างๆ ทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก

7.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสายส่งที่เท่ากันทุกวงจร สำหรับการศึกษและพัฒนาต่อไปควรนำวิธีที่นำเสนอราคาค่าใช้จ่ายของสายส่งที่มีค่าแตกต่างกันไปแต่ละวงจร อีกทั้งค่าใช้จ่ายในติดตั้ง และขนาดของ CLR ควรพิจารณาค่าที่เหมาะสมกับในทางปฏิบัติ
- 2) สำหรับการศึกษและพัฒนาต่อไปอาจนำวิธีที่นำเสนอไปปรับปรุงแก้ไขให้สามารถหาแผนในการขยายระบบส่ง และแผนในการแก้ไขปัญหากระแสลัดวงจรในคราวเดียวกันได้อย่างเหมาะสมโดยพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการวางแผนจริง รวมไปถึงการนำเอาแผนการขยายตัวของระบบไฟฟ้าจริงมาประยุกต์ใช้ร่วมด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Latorre, G., Cruz, R. D., Areiza, J. M., and Villegas, A., Classification of publications and models on transmission expansion planning. IEEE Trans. Power Syst., vol. 18 (May 2003): 938-946.
- [2] Romero, R., Monticelli, A., Garcia, A., and Haffner, S., Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning. Proc. IEE-Gen. Trans. Dist., vol. 149 (Jan. 2002): 27-36.
- [3] Sánchez, I. G., Romero, R., Mantovani, J. R. S., and Rider, M. J., Transmission expansion planning using the DC model and nonlinear programming technique. Proc. IEE-Gen. Trans. Dist., vol. 152 (Nov. 2005): 763-769.
- [4] Bahiense, L. G., Oliveira, C., Pereira, M., and Granville, S., A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion. IEEE Trans. Power Syst., vol. 16 (Aug. 2001): 560-565.
- [5] Wang, X., and McDonald, J. R. Modern power system planning. London: McGraw - Hill, 1994
- [6] สมภพ อัครมณฑล, 2550, การวางแผนขยายระบบส่งไฟฟ้าโดยใช้วิธีทางฮิวริสติก, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] Lee, C.W., Zhong, J., and Wu, F.F., Transmission Expansion Planning From Past to Future. PSCE '06. IEEE PES, vol. (2006): 257-265.
- [8] Escobar, A. H., Gallego, R. A., and Romero, R., Multistage and coordinated planning of the expansion of transmission systems. IEEE Transactions on Power Systems., 19 (May 2004): 735-744.
- [9] Wu, F. F., Zheng, F. L., and Wen, F. S., Transmission investment and expansion planning in a restructured electricity market. Energy, vol. 31 (May-Jun. 2006): 954-966,
- [10] Garver, L. L., Transmission network estimation using linear programming. IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-89 (Sept.-Oct. 1970): 1688-1697.
- [11] Villasana, R., Garver, L. L., and Salon, S. J., Transmission network planning using linear programming. IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-104 (Feb.

- 1985): 349-356.
- [12] Al-Hamouz, Z. M., and Al-Faraj, A. S., Transmission expansion planning using nonlinear programming. Proc. 2002 IEEE Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf., vol. 1: 50-55.
- [13] Farrag, M. A., and El-Metwally, M. M., New method for transmission planning using mixed-integer programming. IEE Proc., vol. 135-C (Jul. 1988): 319-323.
- [14] Pereira, M. V. F., Pinto, L. M. V. G., Cunha, S. H. F., and Oliveira, G. C., A decomposition approach to automated generation/transmission expansion planning. IEEE Trans. Power Syst., vol. PAS-104 (Nov. 1985): 3074-3083.
- [15] Binato, S., Pereira, M. V. F., and Granville, S., A new benders decomposition approach to solve power transmission network design problems. IEEE Trans. Power Syst., vol. 16 (May 2001): 235-240.
- [16] Sánchez, I. G., Romero, R., Mantovani, J. R. S., and Garcia, A., Interior point algorithm for linear programming used in transmission network synthesis. Electric Power Systems Research., vol. 76 (Sept. 2005): 9-16.
- [17] Song, Y. H., and Irving, M. R., Optimisation techniques for electrical power systems part 2 heuristic optimisation methods. Power Engineering Journal, vol. 15 (Jun. 2001): 151-160.
- [18] Pereira, M. V. F., and Pinto, L. M. V. G., Application of sensitivity of load supplying capability to interactive transmission expansion planning. IEEE Trans. Power Syst., vol. PAS-104 (Feb.1985): 381-389.
- [19] Monticelli, A., Santos, A., Pereira, M. V. F., Cunha, S. H., Parker, B. J., and Praca, J. C. G., Interactive transmission network planning using a least effort criterion, IEEE Trans. Power Syst., vol. PAS-101 (Oct. 1982): 3919- 3925.
- [20] Da Silva, E. L., Gil, H. A., and Areiza, J. M., Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm. IEEE Trans. Power Syst., vol. 15 (Aug. 2000): 1168-1175.
- [21] Duan, G., and Yu, Y., Problem-specific genetic algorithm for power transmission system planning. Electric Power Systems Research, vol. 61 (Feb. 2002): 41-50.

- [22] Gallego, R. A., Monticelli, A., and Romero, R., Transmission expansion planning by an extended genetic algorithm. Proc. IEE-Gen. Transm. Dist., vol. 145 (May 1998): 329-335.
- [23] Gil, H. A., and Da Silva, E. L., A reliable approach for solving the transmission network expansion planning problem using genetic algorithms. Electric Power Systems Research, vol. 58 (May 2001): 45-51.
- [24] Jingdong, X., and Guoqing, T., The application of genetic algorithms in the multi-objective transmission network planning. Proc. 4th Int. Conf. on Advances in Power System Control, Operation and Management. (1997): 338-341.
- [25] Gallego, R. A., Alves, A. B., Monticelli, A., and Romero, R., Parallel simulated annealing applied to long term transmission network expansion planning. IEEE Trans. Power Syst, vol.12 (Feb.1997): 181-188.
- [26] Romero, R., Gallego, R. A., and Monticelli, A., Transmission system expansion planning by simulated annealing. IEEE Transactions on Power Systems, 11 (February 1996): 364-369.
- [27] Wen, F., and Chang, C. S. Transmission network optimal using the Tabu search method. Electric Power Systems Research 42 (August 1997): 153-163.
- [28] Gallego, R. A., Romero, R., and Monticelli, A. J., Tabu search algorithm for network synthesis. IEEE Trans. Power Syst., vol. 15 (May 2000): 490-495.
- [29] Da Silva, E. L., Ortiz, J. M. A., De Oliveira, G. C., and Binato, S., Transmission network expansion planning under a tabu search approach. IEEE Trans. Power Syst., vol. 16 (Feb. 2001): 62-68.
- [30] Gallego, R. A., Monticelli, A., and Romero, R., Comparative studies on non-convex optimization methods for transmission network expansion planning. IEEE Trans. Power Syst., vol. 13 (Aug. 1998): 822-828.
- [31] Adapa, R., Fault Current Management Guidebook, EPRI Solutions Inc., 2006.
- [32] Taylor, T., Hanson, A., Lubkeman, D., and Mousavi, M.. Fault Current Review Study, ABB Inc., 2005.
- [33] Sarmiento, H.G., Castellanos, R., Pampin, G., Tovar, C., and Naude, J., An example in controlling short circuit levels in a large metropolitan area. Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, vol.2, vol. 2666 (13-17

July 2003): 4.

- [34] 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 Trans. Applied Superconductivity, Vol. 15 (June 2005): 2130-2133.
- [35] Power, A.J., An Overview of Transmission Fault Current Limiters, UK: The National Grid Company plc, Leatherhead, 1995.
- [36] Neumann, A., Application of Fault Current Limiters, BERR Department for Business Enterprise & Regulatory Reform, 2007.
- [37] Wu, X., Mutale, J., Jenkins, N., and Strbac, G., An Investigation of Network Splitting for Fault Level Reduction. United Kingdom: Tyndall Centre for Climate Change Research Working, 2003.
- [38] 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.
- [39] 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), June 2005.
- [40] IEEE Guide for Protective Relay Applications to Distribution Lines. IEEE Std. C37.230-2007, Vol., no. (2008): 1-100.
- [41] Lee, S.H., Lee, K.W., Yoon, Y.B., and Hyun, O.B., FCL Application Issues in Korean Electric Power Grid. Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, (2006): 4.
- [42] Gilany, M., and Al-Hasawi, W., Reducing the Short Circuit Levels in Kuwait Transmission Network (A Case Study). World Academy of Science, Engineering and Technology 53, 2009.
- [43] Majid, P., Parviz, R., and Brij, S., Contingency Ranking for Voltage Stability Analysis of Large-Scale Power Systems. IEEE Conference, 2004.
- [44] Faustino Agreira, C. I., and Dias Pinto, J. A., Contingency Screening and Ranking

- Algorithm Using Two Different Sets of Security Performance Indices. IEEE Bologna PowerTech Conference, June 2003.
- [45] Ejebe, G.C., and Wollenberg, B.F., Automatic contingency selection. IEEE Trans., PAS-98 (1979): 92–104
- [46] Tarlochan, S., Sidhu, and Lan Cui, Contingency Screening for Steady-State Security Analysis By Using FFT and Artificial Neural Networks. IEEE Trans Power Syst., vol. 5 (1979).
- [47] Faustino Agreira, C. I., and Dias Pinto, J. A., The Performance Indices to Contingencies Screening. International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH, June 2006.
- [48] แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573 (PDP 2010), การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย: ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า, เมษายน 2553



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ในภาคผนวก ก ได้แสดงถึงข้อมูลของระบบทดสอบที่ได้นำมาใช้ในการทดสอบอันประกอบไปด้วย ระบบทดสอบ IEEE 30-bus ระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส และระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร โดยแต่ละระบบทดสอบจะแสดงถึงข้อมูลของค่ากำลังไฟฟ้าฐาน ข้อมูลสายส่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า รวมไปถึงข้อมูลรายละเอียดต่างๆ

1.1 ระบบทดสอบปรับปรุง IEEE-RTS 24 บัส

ระบบทดสอบปรับปรุง IEEE-RTS 24 บัส ปรับปรุงมาจากระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส ในโปรแกรม MATPOWER โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการเพิ่มเติมข้อมูลในส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องเพื่อใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรต่อไป โดยให้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 0.20 p.u. ทุกเครื่อง

ข้อมูลบัส กำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสายส่งในระบบไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ ก.1 ก.2 และ ก.3 ตามลำดับ โดยค่า per unit ของพารามิเตอร์ในตาราง คำนวณจากค่าแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของบัส และค่ากำลังไฟฟ้าฐานเท่ากับ 100 MVA

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่แรงดัน 1.0 p.u.)	
			P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
1	บัสแรงดัน	138	108	22	0	0
2	บัสแรงดัน	138	97	20	0	0
3	บัสโหลด	138	180	37	0	0
4	บัสโหลด	138	74	15	0	0
5	บัสโหลด	138	71	14	0	0
6	บัสโหลด	138	136	28	0	-100
7	บัสแรงดัน	138	125	25	0	0

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่แรงดัน 1.0 p.u.)	
			P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
8	บัสโหลด	138	171	35	0	0
9	บัสโหลด	138	175	36	0	0
10	บัสโหลด	138	195	40	0	0
11	บัสโหลด	230	0	0	0	0
12	บัสโหลด	230	0	0	0	0
13	บัสอ้างอิง	230	265	54	0	0
14	บัสแรงดัน	230	194	39	0	0
15	บัสแรงดัน	230	317	64	0	0
16	บัสแรงดัน	230	100	20	0	0
17	บัสโหลด	230	0	0	0	0
18	บัสแรงดัน	230	333	68	0	0
19	บัสโหลด	230	181	37	0	0
20	บัสโหลด	230	128	26	0	0
21	บัสแรงดัน	230	0	0	0	0
22	บัสแรงดัน	230	0	0	0	0
23	บัสแรงดัน	230	0	0	0	0
24	บัสโหลด	230	0	0	0	0

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลกำลังการผลิตของระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส

บัส	กำลังการผลิต		กำลังการผลิตสูงสุด		กำลังการผลิตต่ำสุด	
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	10	0	20	10	16	0
1	10	0	20	10	16	0
1	76	0	76	30	15.2	-25
1	76	0	76	30	15.2	-25
2	10	0	20	10	16	0
2	10	0	20	10	16	0
2	76	0	76	30	15.2	-25
2	76	0	76	30	15.2	-25
7	80	0	100	60	25	0
7	80	0	100	60	25	0
7	80	0	100	60	25	0
13	95.1	0	197	80	69	0
13	95.1	0	197	80	69	0
13	95.1	0	197	80	69	0
14	0	35.3	0	200	0	-50
15	12	0	12	6	2.4	0
15	12	0	12	6	2.4	0
15	12	0	12	6	2.4	0
15	12	0	12	6	2.4	0
15	12	0	12	6	2.4	0
15	155	0	155	80	54.3	-50
16	155	0	155	80	54.3	-50
18	400	0	400	200	100	-50
21	400	0	400	200	100	-50
22	50	0	50	16	10	-10
22	50	0	50	16	10	-10
22	50	0	50	16	10	-10

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ข้อมูลกำลังการผลิตของระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส

บัส	กำลังการผลิต		กำลังการผลิตสูงสุด		กำลังการผลิตต่ำสุด	
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
22	50	0	50	16	10	-10
22	50	0	50	16	10	-10
22	50	0	50	16	10	-10
23	155	0	155	80	54.3	-50
23	155	0	155	80	54.3	-50
23	350	0	350	150	140	-25

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งในระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส

จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.)	ตัวอัดประจุสายส่ง (p.u.)	ขีดจำกัดทางความร้อน (MVA)	อัตราส่วนหม้อแปลง (ratio)	สถานะ
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	175	0	1
1	3	0.0546	0.2112	0.0572	175	0	1
1	5	0.0218	0.0845	0.0229	175	0	1
2	4	0.0328	0.1267	0.0343	175	0	1
2	6	0.0497	0.192	0.052	175	0	1
3	9	0.0308	0.119	0.0322	175	0	1
3	24	0.0023	0.0839	0	400	1.03	1
4	9	0.0268	0.1037	0.0281	175	0	1
5	10	0.0228	0.0883	0.0239	175	0	1
6	10	0.0139	0.0605	2.459	175	0	1
7	8	0.0159	0.0614	0.0166	175	0	1
8	9	0.0427	0.1651	0.0447	175	0	1
8	10	0.0427	0.1651	0.0447	175	0	1

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส

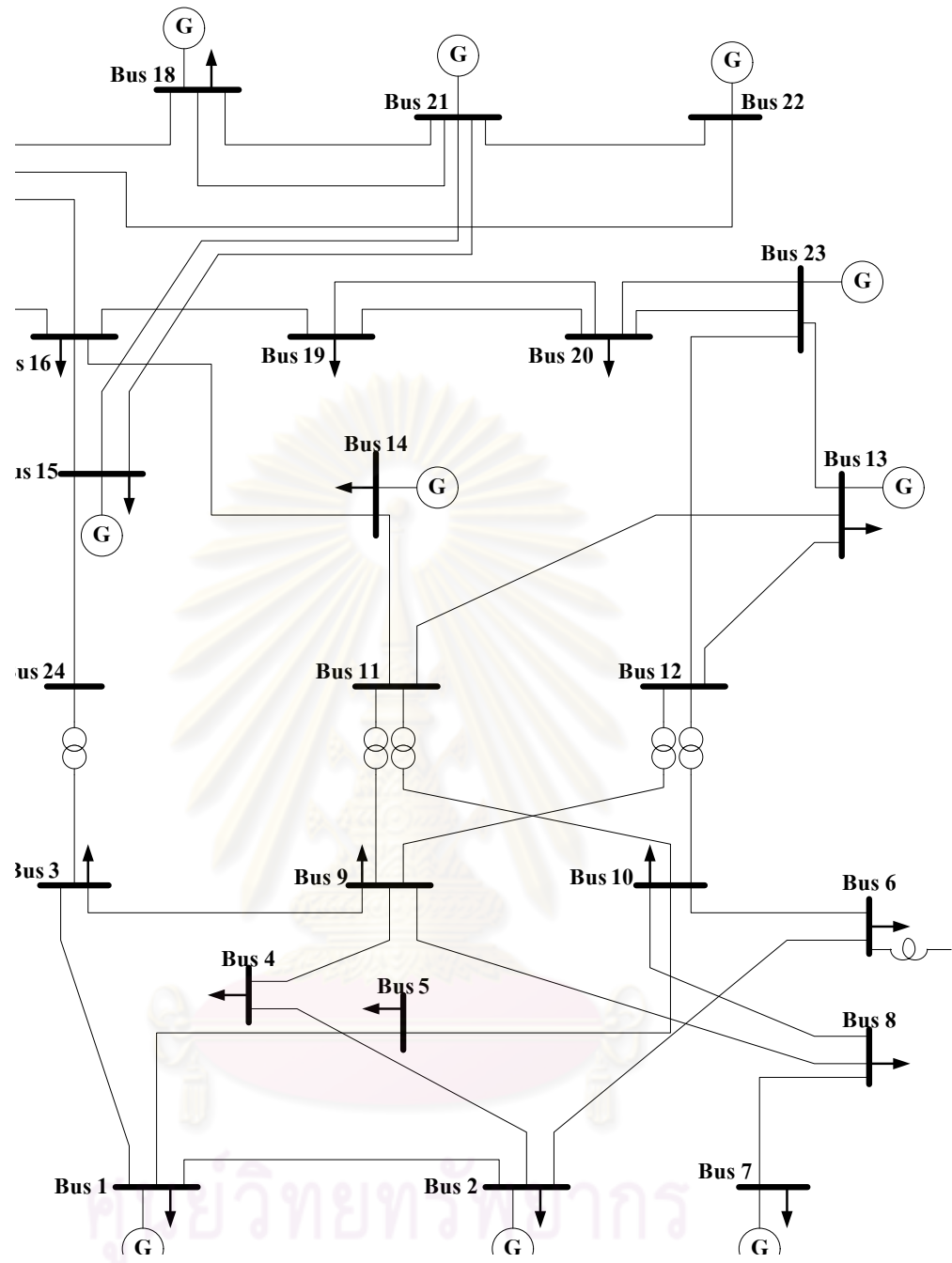
จากบัส	ถึงบัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อ แปลง (ratio)	สถานะ
9	11	0.0023	0.0839	0	400	1.03	1
9	12	0.0023	0.0839	0	400	1.03	1
10	11	0.0023	0.0839	0	400	1.02	1
10	12	0.0023	0.0839	0	400	1.02	1
11	13	0.0061	0.0476	0.0999	500	0	1
11	14	0.0054	0.0418	0.0879	500	0	1
12	13	0.0061	0.0476	0.0999	500	0	1
12	23	0.0124	0.0966	0.203	500	0	1
13	23	0.0111	0.0865	0.1818	500	0	1
14	16	0.005	0.0389	0.0818	500	0	1
15	16	0.0022	0.0173	0.0364	500	0	1
15	21	0.0063	0.049	0.103	500	0	1
15	21	0.0063	0.049	0.103	500	0	1
15	24	0.0067	0.0519	0.1091	500	0	1
16	17	0.0033	0.0259	0.0545	500	0	1
16	19	0.003	0.0231	0.0485	500	0	1
17	18	0.0018	0.0144	0.0303	500	0	1
17	22	0.0135	0.1053	0.2212	500	0	1
18	21	0.0033	0.0259	0.0545	500	0	1
18	21	0.0033	0.0259	0.0545	500	0	1
19	20	0.0051	0.0396	0.0833	500	0	1
19	20	0.0051	0.0396	0.0833	500	0	1
20	23	0.0028	0.0216	0.0455	500	0	1

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE-RTS 24 บัส

จากบัส	ถึงบัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อ แปลง (ratio)	สถานะ
20	23	0.0028	0.0216	0.0455	500	0	1
21	22	0.0087	0.0678	0.1424	500	0	1



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบแบบปรับปรุงระบบ IEEE-RTS 24 บัส
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 ระบบส่งไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

ระบบทดสอบนี้เป็นส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้าในประเทศไทยที่ได้มีการนำมาพิจารณาใน ส่วนของบริเวณกรุงเทพมหานคร โดยมีจำนวนบัส 254 บัส จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 108 เครื่อง จำนวนจุดโหลดทั้งหมด 108 จุดโหลด มีกำลังการผลิตทั้งหมด 25,547.7 MW ความต้องการไฟฟ้า รวม 17,519.6 MW

ข้อมูลบัส กำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสายส่งในระบบไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ ก.4 ก.5 และ ก.6 ตามลำดับ โดยค่า per unit ของพารามิเตอร์ในตาราง คำนวณจาก ค่าแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของบัส และค่ากำลังไฟฟ้าฐานเท่ากับ 100 MVA ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่แรงดัน 1.0 p.u.)		โซน
			P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	
11011	2	11.5	2	1.239	0	0	1
11012	2	11.5	2	1.239	0	0	1
11013	2	11.5	5	3.099	0	0	1
11014	2	15	4	2.479	0	0	1
11015	2	15	4	2.479	0	0	1
11016	2	15	10	6.197	0	0	1
11017	2	21	0	0	0	0	1
11018	2	21	0	0	0	0	1
11019	2	21	0	0	0	0	1
11031	2	15.75	0	0	0	0	1
11032	2	15.75	0	0	0	0	1
11033	2	18	0	0	0	0	1
11601	1	69	365.741	177.136	0	145	1
11602	1	69	240.268	116.367	0	205	1
11603	1	69	175.285	84.894	0	106	1
11606	1	69	227.392	110.131	0	137	1
11608	1	69	276.109	133.726	0	126	1

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่ แรงดัน 1.0 p.u.)		โชน
			P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	
11610	1	69	148.814	73.74	0	317	1
11611	1	69	433.278	209.846	0	0	1
11613	1	69	320.909	155.423	0	105	1
11614	1	69	286.068	138.549	0	132	1
11615	1	69	201.788	97.731	0	79	1
11631	1	69	365.741	177.136	0	212	1
11633	1	69	175.285	84.894	0	99	1
11636	1	69	227.392	110.131	0	126	1
11638	1	69	276.109	133.726	0	122	1
11643	1	69	320.909	155.423	0	126	1
11644	1	69	286.068	138.549	0	159	1
11702	1	115	570.794	276.448	0	209	1
11703	1	115	314.636	152.385	0	0	1
11704	1	115	461.922	223.719	0	176	1
11707	1	115	426.858	206.737	0	271	1
11709	1	115	299.35	144.982	0	117	1
11710	1	115	116.505	56.426	0	99	1
11711	1	115	113.346	54.896	0	66	1
11712	1	115	716.966	371.421	0	209	1
11713	1	115	403.033	195.198	0	136	1
11715	1	115	231.909	112.319	0	132	1
11719	1	115	285.054	157.716	0	91	1
11720	1	115	379.137	209.77	0	81	1
11737	1	115	284.572	137.824	0	0	1
11740	1	115	420.952	232.906	0	176	1
11801	1	230	505.435	244.793	0	195	1

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่ แรงดัน 1.0 p.u.)		โชน
			P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	
11802	1	230	0	0	0	72	1
11803	1	230	0	0	0	72	1
11804	1	230	0	0	0	65	1
11806	1	230	512.665	248.295	0	0	1
11807	1	230	0	0	0	120	1
11808	1	230	0	0	0	65	1
11809	1	230	0	0	0	0	1
11810	1	230	0	0	0	130	1
11811	1	230	0	0	0	0	1
11812	1	230	0	0	0	65	1
11813	1	230	0	0	0	260	1
11814	1	230	630.136	305.189	0	0	1
11815	1	230	0	0	0	0	1
11816	1	230	310.37	150.319	0	0	1
11819	1	230	0	0	0	0	1
11820	1	230	0	0	0	0	1
11838	1	230	0	0	0	0	1
11839	1	230	0	0	0	0	1
11843	1	230	0	0	0	0	1
11907	1	500	0	0	0	0	1
11909	1	500	0	0	0	0	1
11912	1	500	0	0	0	0	1
11942	1	500	0	0	0	0	1
15001	2	11.5	0	0	0	0	2
15002	2	11.5	0	0	0	0	2
15003	2	11.5	0	0	0	0	2

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่ แรงดัน 1.0 p.u.)		โชน
			P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	
15004	2	11.5	0	0	0	0	2
15005	2	11.5	0	0	0	0	2
15006	2	11.5	0	0	0	0	2
15803	1	230	0	0	0	0	1
15804	1	230	0	0	0	0	1
15805	1	230	0	0	0	0	1
15806	1	230	0	0	0	0	1
15902	1	500	0	0	0	0	1
15903	1	500	0	0	0	0	1
16805	1	230	0	0	0	0	1
16806	1	230	0	0	0	0	1
16807	1	230	0	0	0	0	1
16808	1	230	0	0	0	0	1
16811	1	230	0	0	0	0	5
16812	1	230	0	0	0	0	5
16813	1	230	0	0	0	0	5
16814	1	230	0	0	0	0	5
16901	1	500	0	0	0	0	1
16902	1	500	0	0	0	0	1
17801	1	230	0	0	0	0	1
17802	1	230	0	0	0	0	1
17803	1	230	0	0	0	0	1
17804	1	230	0	0	0	0	1
17902	1	500	0	0	0	0	1
17903	1	500	0	0	0	0	5
17904	1	500	0	0	0	0	1

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่ แรงดัน 1.0 p.u.)		โชน
			P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	
17905	1	500	0	0	0	0	1
19801	1	230	0	0	0	0	1
19802	1	230	0	0	0	0	1
19803	1	230	0	0	0	0	1
19804	1	230	0	0	0	0	1
19902	1	500	0	0	0	0	1
19904	1	500	0	0	0	0	1
19905	1	500	0	0	0	0	1
19906	1	500	0	0	0	0	1
19907	1	500	0	0	0	0	1
19908	1	500	0	0	0	0	1
19915	1	500	0	0	0	0	5
19917	1	500	0	0	0	0	5
19918	1	500	0	0	0	0	5
19919	1	500	0	0	0	0	5
19920	1	500	0	0	0	0	5
19921	1	500	0	0	0	0	5
19922	1	500	0	0	0	0	5
51001	2	15	4	2.479	0	0	1
51002	2	15	4	2.479	0	0	1
51003	2	15	10	6.197	0	0	1
51004	2	15	4	2.479	0	0	1
51005	2	15	4	2.479	0	0	1
51006	2	15	10	6.197	0	0	1
51007	2	15	4	2.479	0	0	1
51008	2	15	4	2.479	0	0	1

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่ แรงดัน 1.0 p.u.)		โชน
			P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	
51009	2	15	10	6.197	0	0	1
51010	2	15	0	0	0	0	1
51011	2	15	0	0	0	0	1
51012	2	15	0	0	0	0	1
51604	1	69	0	0	0	20	1
51613	1	69	0.8	0.496	0	0	1
51701	2	115	227.54	60.326	0	0	1
51702	2	115	256.703	85.018	0	61	1
51703	1	115	43.831	24.251	0	13	1
51704	1	115	40.881	22.619	0	0	1
51705	1	115	171.212	94.729	0	11	1
51706	1	115	581.706	321.848	0	88	1
51708	1	115	84.564	46.788	0	27	1
51720	1	115	41.649	23.044	0	17	1
51722	1	115	88.57	49.004	0	28	1
51728	1	115	184.171	101.899	0	0	1
51801	2	230	115.996	-60.169	0	130	1
51802	2	230	196.914	-16.918	0	130	1
51806	1	230	0	0	0	0	1
51826	1	230	0	0	0	0	1
51828	2	230	-191.83	-30.438	0	0	1
51856	1	230	0	0	0	0	1
51926	1	500	0	0	0	0	1
51940	2	500	587.75	-256.09	0	0	1
54011	2	21	0	0	0	0	4
54012	2	21	0	0	0	0	4

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่ แรงดัน 1.0 p.u.)		โชน
			P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	
54013	2	16.5	0	0	0	0	4
54014	2	21	0	0	0	0	4
54015	2	21	0	0	0	0	4
54016	2	16.5	0	0	0	0	4
55001	2	11.5	0	0	0	0	2
55004	2	11.5	0	0	0	0	2
55005	2	11.5	0	0	0	0	2
55006	2	11.5	0	0	0	0	2
55011	2	11.5	0	0	0	0	2
55012	2	11.5	0	0	0	0	2
55013	2	11.5	0	0	0	0	2
55901	1	500	0	0	0	0	5
55902	1	500	0	0	0	0	5
55903	1	500	0	0	0	0	5
55904	1	500	0	0	0	0	5
55905	1	500	0	0	0	0	5
55906	1	500	0	0	0	0	5
61001	2	22	25	15.494	0	0	1
61002	2	22	25	15.494	0	0	1
61003	2	23	30	18.592	0	0	1
61004	2	23	30	18.592	0	0	1
61021	2	11.5	2	1.239	0	0	1
61022	2	11.5	2	1.239	0	0	1
61023	2	13.8	5	3.099	0	0	1
61024	2	11.5	2	1.239	0	0	1
61025	2	11.5	2	1.239	0	0	1

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่ แรงดัน 1.0 p.u.)		โชน
			P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	
61026	2	13.8	5	3.099	0	0	1
61027	2	20	0	0	0	0	1
61028	2	20	0	0	0	0	1
61029	2	20	0	0	0	0	1
61716	1	115	723.82	400.477	0	198	1
61727	1	115	501.407	277.42	0	0	1
61807	1	230	0	0	0	0	1
61808	2	230	886.054	433.763	0	0	1
61816	1	230	0	0	0	0	1
61827	2	230	-1489.6	277.587	0	0	1
61927	1	500	0	0	0	0	1
64027	2	21	0	0	0	0	4
64031	2	24	0	0	0	0	4
64032	2	24	0	0	0	0	4
64061	2	21	0	0	0	0	4
64062	2	21	0	0	0	0	4
64063	2	16.5	0	0	0	0	4
64805	1	230	0	0	0	0	4
64901	1	500	0	0	0	0	4
65038	2	11.5	0	0	0	0	2
65039	2	11.5	0	0	0	0	2
65040	2	11.5	0	0	0	0	2
65041	2	11.5	0	0	0	0	2
65042	2	11.5	0	0	0	0	2
66901	1	500	0	0	0	-100	1
66902	1	500	0	0	0	-100	1

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่ แรงดัน 1.0 p.u.)		โชน
			P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	
69901	1	500	0	0	0	-100	1
69902	1	500	0	0	0	-100	1
71001	2	16	0	0	0	0	1
71021	2	11	0.2	0.124	0	0	1
71031	3	23	35	21.691	0	0	1
71032	2	23	35	21.691	0	0	1
71041	2	11.5	4	2.479	0	0	1
71042	2	11.5	4	2.479	0	0	1
71043	2	11.5	0.21	0.13	0	0	1
71044	2	11.5	4	2.479	0	0	1
71045	2	11.5	4	2.479	0	0	1
71046	2	11.5	0.21	0.13	0	0	1
71047	2	11.5	4	2.479	0	0	1
71048	2	11.5	4	2.479	0	0	1
71049	2	11.5	0.21	0.13	0	0	1
71702	2	115	392.987	163.681	0	0	1
71703	1	115	99.537	55.072	0	0	1
71705	1	115	22.198	12.282	0	4	1
71707	1	115	128.155	70.906	0	0	1
71708	1	115	8.042	4.449	0	0	1
71709	1	115	66.358	36.714	0	7	1
71716	1	115	72.262	39.982	0	13	1
71717	1	115	45.074	24.939	0	0	1
71718	1	115	37.911	20.975	0	0	1
71721	2	115	427.745	177.095	0	55	1
71724	1	115	545.055	301.57	0	6	1

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่ แรงดัน 1.0 p.u.)		โชน
			P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	
71802	2	230	-278.12	28.199	0	0	1
71803	2	230	398.721	-44.231	0	0	1
71804	1	230	0	0	0	0	1
71807	1	230	0	0	0	0	1
71817	1	230	0	0	0	0	1
71821	1	230	0	0	0	0	1
71823	2	230	368.94	223.298	0	0	1
71824	2	230	381.59	136.764	0	0	1
71853	1	230	0	0	0	0	1
71904	1	500	0	0	0	0	1
71906	1	500	0	0	0	0	1
71923	1	500	0	0	0	0	1
74001	2	15.8	4	2.479	0	0	4
74002	2	15.8	4	2.479	0	0	4
74003	2	15.8	10	6.197	0	0	4
74011	2	21	0	0	0	0	4
74012	2	21	0	0	0	0	4
74013	2	21	0	0	0	0	4
74014	2	21	0	0	0	0	4
74015	2	21	0	0	0	0	4
74016	2	21	0	0	0	0	4
74802	1	230	0	0	0	0	4
75001	2	11.5	0	0	0	0	2
75002	2	11.5	0	0	0	0	2
75003	2	11.5	0	0	0	0	2
77901	1	500	0	0	0	-100	1

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่ แรงดัน 1.0 p.u.)		โชน
			P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	
77902	1	500	0	0	0	-100	1
77903	1	500	0	0	0	-100	1
77904	1	500	0	0	0	-100	1

หมายเหตุ : ประเภทของบัสมีความหมายดังนี้

- 1 คือ บัสโหลด
- 2 คือ บัสแรงดัน
- 3 คือ บัสอ้างอิง

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

บัส	กำลังการผลิต		กำลังการผลิตสูงสุด		กำลังการผลิตต่ำสุด	
	P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)
11011	110	38.066	116.46	68	0	-34
11012	110	38.066	116.46	68	0	-34
11013	115	39.862	121.77	70	0	-35
11014	202	116.353	262.125	125	0	-62
11015	202	116.353	262.125	125	0	-62
11016	219	126.409	231.885	135	0	-67
11017	230	79.724	288	167.92	0	-83.96
11018	230	79.724	288	167.92	0	-83.96
11019	240	83.315	306	178.86	0	-89.43
11031	230	161.1	276.3	161.1	0	-80.55
11032	230	161.1	276.3	161.1	0	-80.55
11033	240	173.59	297	173.59	0	-86.8
15001	10	1.529	42.39	6.2	0	-3
15002	90	50.688	135.54	55	0	-27

ตารางที่ ก.5 (ต่อ) ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าบริเวณ กรุงเทพมหานคร

บัส	กำลังการผลิต		กำลังการผลิตสูงสุด		กำลังการผลิตต่ำสุด	
	P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)
15003	40	15.42	47.646	27.5	0	-13.5
15004	90	8.089	126	55	0	-27
15005	90	8.073	118.584	55	0	-27
15006	90	4.845	125.46	25	0	-12
51001	220	138	236.484	138	0	-69
51002	220	138	236.484	138	0	-69
51003	205	127	217.512	127	0	-63
51004	220	26.914	236.484	138	0	-69
51005	220	26.914	236.484	138	0	-69
51006	205	25.087	217.512	127	0	-63
51007	230	28.077	249.885	146	0	-73
51008	230	28.077	249.885	146	0	-73
51009	255	31.234	272.115	159	0	-79
51010	265	133.717	280.593	163.94	0	-81.97
51011	265	133.717	280.593	163.94	0	-81.97
51012	270	136.545	285.885	167.05	0	-83
51701	0	0	90	0	0	0
51702	0	0	90	0	0	0
51801	0	0	90	0	0	0
51802	0	0	90	0	0	0
51828	0	0	90	0	0	0
51940	0	0	90	0	0	0
54011	270	24.184	333	194.16	0	-97.08
54012	270	24.184	333	194.16	0	-97.08
54013	260	23.114	325.8	190.43	0	-95.21
54014	270	24.184	333	194.16	0	-97.08

ตารางที่ ก.5 (ต่อ) ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าบริเวณ กรุงเทพมหานคร

ปี	กำลังการผลิต		กำลังการผลิตสูงสุด		กำลังการผลิตต่ำสุด	
	P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)
54015	270	24.184	333	194.16	0	-97.08
54016	260	23.114	325.8	190.43	0	-95.21
55001	27	3.813	50.184	22	0	-11
55004	90	41.028	127.08	55	0	-27
55005	90	14.938	127.08	55	0	-27
55006	90	14.955	112.239	55	0	-27
55011	90	3.087	112.239	55	0	-27
55012	90	2.75	119.646	55	0	-27
55013	90	2.938	151.65	51.45	0	-25.03
61001	550	165.597	612	341	0	-170
61002	550	165.597	612	341	0	-170
61003	600	315.698	635.4	371	0	-186
61004	600	315.698	635.4	371	0	-186
61021	100	53.09	115.74	62	0	-40
61022	100	53.09	115.74	62	0	-40
61023	100	53.09	130.5	62	0	-40
61024	100	53.09	115.74	62	0	-40
61025	100	53.09	115.74	62	0	-40
61026	100	53.09	130.5	62	0	-40
61027	230	69.269	263.7	153.75	0	-76.88
61028	230	69.269	263.7	153.75	0	-76.88
61029	240	71.975	288	168.33	0	-84.17
61808	0	0	90	0	0	0
61827	0	0	90	0	0	0
64027	350	71.865	450	260	0	-130
64031	673	349.634	759.6	440	0	-220

ตารางที่ ก.5 (ต่อ) ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าบริเวณ กรุงเทพมหานคร

ปี	กำลังการผลิต		กำลังการผลิตสูงสุด		กำลังการผลิตต่ำสุด	
	P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)
64032	673	349.634	759.6	440	0	-220
64061	270	24.184	333	194.16	0	-97.08
64062	270	24.184	333	194.16	0	-97.08
64063	260	23.114	325.8	190.43	0	-95.21
65038	90	-4.255	114.354	55	0	-27
65039	90	-10.193	114.354	55	0	-27
65040	90	10.635	175.77	55	0	-27
65041	90	9.338	175.77	55	0	-27
65042	90	9.285	106.92	55	0	-27
71001	0	51.855	90	300	0	-50
71021	13	6.484	19.08	9	0	-4
71031	57.54	193.09	891	455	0	-227
71032	0	0	891	455	0	-227
71041	138	69.26	243.54	142	0	-71
71042	138	69.26	243.54	142	0	-71
71043	159	79.714	280.584	164	0	-82
71044	138	69.26	243.54	142	0	-71
71045	138	69.26	243.54	142	0	-71
71046	159	79.714	280.584	164	0	-82
71047	138	-1.616	243.54	142	0	-71
71048	138	-1.616	243.54	142	0	-71
71049	159	-1.868	280.584	164	0	-82
71702	0	0	90	0	0	0
71702	0	0	90	0	0	0
71721	0	0	90	0	0	0
71802	0	0	90	0	0	0

ตารางที่ ก.5 (ต่อ) ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าบริเวณ กรุงเทพมหานคร

ปี	กำลังการผลิต		กำลังการผลิตสูงสุด		กำลังการผลิตต่ำสุด	
	P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)
71802	0	0	90	0	0	0
71803	0	0	90	0	0	0
71823	0	0	90	0	0	0
71824	0	0	90	0	0	0
74001	237	51.695	289.8	168.76	0	-82.83
74002	237	51.695	289.8	168.76	0	-82.83
74003	244	53.262	289.8	169	0	-82
74011	138	-1.616	278.1	162.15	0	-81.07
74012	138	-1.616	278.1	162.15	0	-81.07
74013	159	-1.868	311.4	182.01	0	-91.01
74014	138	-1.616	278.1	162.15	0	-81.07
74015	138	-1.616	278.1	162.15	0	-81.07
74016	159	-1.868	311.4	182.01	0	-91.01
75001	90	0	135	0	0	0
75002	90	0	135	0	0	0
75003	90	0	135	0	0	0

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก ปี	ถึง ปี	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวขัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
11801	11809	0.00044	0.00467	0.01904	858.89	1	1
11801	11809	0.00045	0.00474	0.01935	858.89	1	1
11801	11809	0.00045	0.00474	0.01935	858.89	1	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
11801	11811	0.00024	0.0028	0.00866	858.89	1	1
11801	11811	0.00024	0.0028	0.00866	858.89	1	1
11801	11809	0.00044	0.00467	0.01904	858.89	1	1
11802	11839	0.00115	0.00829	0.01831	429.44	1	1
11802	11815	0.0002	0.00204	0.00865	858.89	1	1
11802	11815	0.0002	0.00204	0.00865	858.89	1	1
11802	11816	0.00112	0.01174	0.04365	858.89	1	1
11802	11816	0.00112	0.01174	0.04365	858.89	1	1
11802	11816	0.00112	0.01174	0.04365	858.89	1	1
11802	11816	0.00112	0.01174	0.04365	858.89	1	1
11802	11839	0.00115	0.00829	0.01831	429.44	1	1
11803	11808	0.00092	0.01075	0.03545	858.89	1	1
11803	11808	0.00092	0.01075	0.03545	858.89	1	1
11803	11812	0.00074	0.01379	0.06997	1717.78	1	1
11803	11812	0.00074	0.01379	0.06997	1717.78	1	1
11803	11814	0.00037	0.00385	0.01689	858.89	1	1
11803	11814	0.00037	0.00385	0.01689	858.89	1	1
11803	11814	0.00038	0.00389	0.01709	858.89	1	1
11803	17801	0.00037	0.00378	0.01597	858.89	1	1
11803	17802	0.00037	0.00378	0.01597	858.89	1	1
11804	11806	0.00024	0.00398	0.02587	1717.78	1	1
11804	11806	0.00024	0.00398	0.02587	1717.78	1	1
11804	11806	0.00024	0.00398	0.02587	1717.78	1	1
11804	11810	0.00019	0.00348	0.01763	1717.78	1	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
11804	11810	0.00019	0.00348	0.01763	1717.78	1	1
11804	11838	0.0003	0.00505	0.03284	1717.78	1	1
11806	11811	0.00035	0.00404	0.01249	858.89	1	1
11806	11811	0.00035	0.00404	0.01249	858.89	1	1
11806	11838	0.00016	0.00272	0.01766	1717.78	1	1
11807	16805	0.00065	0.00685	0.02816	858.89	1	1
11807	16806	0.00065	0.00685	0.02816	858.89	1	1
11807	16807	0.00121	0.01272	0.05224	858.89	1	1
11807	16808	0.00121	0.01272	0.05224	858.89	1	1
11808	11838	0	0.0001	0	0	1	1
11809	11839	0	0.0001	0	0	1	0
11810	11819	0.0009	0.00945	0.03856	858.89	1	1
11810	11819	0.0009	0.00945	0.03856	858.89	1	1
11810	11819	0.0009	0.00945	0.03856	858.89	1	1
11810	11819	0.0009	0.00945	0.03856	858.89	1	1
11810	11820	0.00149	0.01574	0.06429	858.89	1	1
11810	11820	0.00149	0.01574	0.06429	858.89	1	1
11810	17803	0.00074	0.01212	0.07934	1717.78	1	1
11810	17804	0.00074	0.01212	0.07934	1717.78	1	1
11812	15803	0.00156	0.01121	0.02478	429.44	1	1
11812	15804	0.00156	0.01121	0.02478	429.44	1	1
11813	11814	0.00079	0.00764	0.03704	858.89	1	1
11813	11814	0.00079	0.00802	0.03524	858.89	1	1
11813	11814	0.00079	0.00802	0.03524	858.89	1	1
11813	11843	0	0.0001	0	0	1	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
11815	11843	0.00058	0.00596	0.0252	858.89	1	1
11815	11843	0.00058	0.00596	0.0252	858.89	1	1
11816	16811	0.00067	0.00697	0.02591	858.89	1	1
11816	16812	0.00067	0.00697	0.02591	858.89	1	1
11816	16813	0.00067	0.00727	0.02488	858.89	1	1
11816	16814	0.00067	0.00727	0.02488	858.89	1	1
11819	15805	0.00006	0.00066	0.0027	858.89	1	1
11819	15806	0.00006	0.00066	0.0027	858.89	1	1
11819	19801	0.00006	0.00066	0.0027	858.89	1	1
11819	19802	0.00006	0.00066	0.0027	858.89	1	1
11820	19803	0.00111	0.01171	0.04783	858.89	1	1
11820	19804	0.00111	0.01171	0.04783	858.89	1	1
11907	11909	0.00011	0.00201	0.19479	3734.3	1	1
11907	11909	0.00011	0.00201	0.19479	3734.3	1	1
11907	19902	0.00015	0.00189	0.17763	2833.64	1	1
11907	19905	0.00015	0.00189	0.17763	2833.64	1	1
11907	19919	0.00038	0.00495	0.4683	2833.64	1	1
11907	55901	0.00041	0.00508	0.47817	2833.64	1	1
11907	55902	0.00041	0.00508	0.47817	2833.64	1	1
11912	11942	0	0.00001	0	3734.3	1	1
11912	11942	0	0.00001	0	3734.3	1	1
11912	15902	0.00029	0.00361	0.33965	2833.64	1	1
11912	15903	0.00029	0.00361	0.33965	2833.64	1	1
11942	17902	0.00006	0.00111	0.10804	3734.3	1	1
11942	17903	0.00008	0.00148	0.14327	3734.3	1	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
11942	17905	0.00006	0.00111	0.10804	3734.3	1	1
11942	19918	0.00008	0.00148	0.14327	3734.3	1	1
15803	51802	0.0055	0.03957	0.08751	429.44	1	1
15804	51802	0.0055	0.03957	0.08751	429.44	1	1
15805	51856	0.00141	0.01492	0.06087	858.89	1	1
15806	51856	0.00141	0.01492	0.06087	858.89	1	1
15902	51926	0.00026	0.00319	0.30079	2833.64	1	1
15903	51926	0.00026	0.00319	0.30079	2833.64	1	1
16805	61808	0.00146	0.01531	0.06291	858.89	1	1
16806	61808	0.00146	0.01531	0.06291	858.89	1	1
16807	61808	0.00135	0.01418	0.05826	858.89	1	1
16808	61808	0.00135	0.01418	0.05826	858.89	1	1
16811	61807	0.00056	0.00589	0.02189	858.89	1	1
16812	61807	0.00056	0.00589	0.02189	858.89	1	1
16813	61807	0.00056	0.00589	0.02189	858.89	1	1
16814	61807	0.00056	0.00589	0.02189	858.89	1	1
16901	19902	0.00003	0.00053	0.05113	3734.3	1	1
16901	66901	0.00073	0.01385	1.342	3734.3	1	1
16902	19904	0.00003	0.00055	0.05293	3734.3	1	1
16902	66902	0.00086	0.01639	1.58794	3734.3	1	1
17801	71824	0.00022	0.00229	0.00966	858.89	1	1
17802	71824	0.00022	0.00229	0.00966	858.89	1	1
17803	71802	0.00123	0.02015	0.13193	1717.78	1	1
17804	71802	0.00123	0.02015	0.13193	1717.78	1	1
17902	71906	0.00049	0.00927	1.0542	3734.3	1	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
17903	17904	0.00002	0.00034	0.03293	3734.3	1	1
17904	71906	0.00061	0.01162	1.1257	3734.3	1	1
17905	71906	0.00049	0.00926	1.05467	3734.3	1	1
19801	51856	0.00141	0.01492	0.06087	858.89	1	1
19802	51856	0.00141	0.01492	0.06087	858.89	1	1
19803	61816	0.00103	0.01089	0.04448	858.89	1	1
19804	61816	0.00103	0.01089	0.04448	858.89	1	1
19904	51926	0.00036	0.00444	0.41848	2833.64	1	1
19905	19906	0.00003	0.00053	0.05113	3734.3	1	1
19906	69901	0.00073	0.01385	1.342	3734.3	1	1
19907	51926	0.00036	0.00444	0.41848	2833.64	1	1
19907	19908	0.00003	0.00055	0.05293	3734.3	1	1
19908	69902	0.00086	0.01639	1.58794	3734.3	1	1
19915	51926	0.00004	0.00084	0.08151	3734.3	1	1
19915	19919	0.00006	0.00084	0.07976	2833.64	1	1
19917	19922	0.00002	0.00034	0.03293	3734.3	1	1
19917	19920	0.00005	0.00098	0.09528	3734.3	1	1
19918	19921	0.00005	0.00098	0.09528	3734.3	1	1
19920	55903	0.00032	0.00612	0.59283	3734.3	1	1
19921	55905	0.00032	0.00612	0.59283	3734.3	1	1
19922	71906	0.00061	0.01162	1.1257	3734.3	1	1
51604	51613	0.14206	0.19104	0.00246	43.38	1	1
51801	51701	0	0.06135	0	200	0.95652	1
51701	51802	0.12097	0.54603	0	100	1	1
51701	51702	2.46861	8.32223	0	100	1	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
51701	51703	0.01833	0.08137	0.01069	162.93	1	1
51701	51722	0.03332	0.09589	0.01288	117.52	1	1
51701	51722	0.03393	0.09948	0.01287	117.52	1	1
51701	51722	0.03332	0.09589	0.01288	117.52	1	1
51701	51828	0.11669	0.68072	0	100	1	1
51701	51940	0.02426	0.45258	0	100	1	1
51702	51708	0.03757	0.11047	0.01409	119.51	1	1
51702	51720	0.07987	0.10779	0.01064	72.3	1	1
51702	51801	0.72428	3.75613	0	100	1	1
51802	51702	0	0.055	0	300	0.95	1
51702	51703	0.03858	0.10824	0.01519	119.51	1	1
51702	51703	0.03858	0.10824	0.01519	119.51	1	1
51702	51722	0.13037	0.17204	0.01786	72.3	1	1
51702	51828	0.44879	4.55978	0	100	1	1
51702	51940	0.02671	0.88495	0	100	1	1
51703	51704	0.00099	0.00435	0.00065	162.93	1	1
51703	51704	0.00099	0.00435	0.00065	162.93	1	1
51703	51705	0.02105	0.05906	0.00828	119.51	1	1
51703	51705	0.02105	0.05906	0.00828	119.51	1	1
51705	51706	0.00108	0.00722	0.00186	325.87	1	1
51705	51706	0.00108	0.00722	0.00186	325.87	1	1
51801	51806	0.00493	0.03542	0.0783	429.44	1	1
51801	51806	0.00493	0.03542	0.0783	429.44	1	1
51801	51802	0.04524	0.3025	0	100	1	1
51801	51828	0.03655	0.51886	0	100	1	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
51801	51940	0.00253	0.09411	0	100	1	1
51802	51828	0.00486	0.04667	0	100	1	1
51802	51940	-0.00086	0.06723	0	100	1	1
51806	51826	0.00112	0.01176	0.04795	858.89	1	1
51806	51826	0.00112	0.01176	0.04795	858.89	1	1
51826	51828	0.00145	0.01523	0.06213	858.89	1	1
51826	51828	0.00145	0.01523	0.06213	858.89	1	1
51828	51940	0.00394	0.114	0	100	1	1
51940	55904	0.00003	0.00055	0.05293	3734.3	1	1
51940	55906	0.00003	0.00055	0.05293	3734.3	1	1
51940	55901	0.00014	0.00272	0.26344	3734.3	1	1
51940	55902	0.00014	0.00272	0.26344	3734.3	1	1
55903	55904	0.00009	0.00175	0.16938	3734.3	1	1
55905	55906	0.00009	0.00175	0.16938	3734.3	1	1
61807	61816	0.0004	0.00423	0.01726	858.89	1	1
61807	61816	0.0004	0.00423	0.01726	858.89	1	1
61816	64805	0.0022	0.01582	0.03484	429.44	1	1
61816	64805	0.0022	0.01582	0.03484	429.44	1	1
61927	64901	0.0004	0.00486	0.51586	2833.64	1	1
61927	64901	0.0004	0.00486	0.51586	2833.64	1	1
61927	66901	0	0.0001	0	3464.1	1	1
61927	69901	0	0.0001	0	3464.1	1	1
61927	66902	0	0.0001	0	3464.1	1	1
61927	69902	0	0.0001	0	3464.1	1	1
71802	71702	0	0.06845	0	200	0.92666	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
71702	71709	0.02213	0.06515	0.00829	119.51	1	1
71702	71721	0.08494	0.21806	0	100	1	1
71802	71702	0	0.06864	0	200	0.92666	1
71702	71823	0.10006	1.21826	0	100	1	1
71702	71824	0.04951	0.47682	0	100	1	1
71703	71717	0.05909	0.16586	0.02328	119.51	1	1
71703	71717	0.05909	0.16586	0.02328	119.51	1	1
71705	71716	0.03208	0.09627	0.01187	117.52	1	1
71705	71707	0.02912	0.08554	0.01092	119.51	1	1
71705	71708	0.05807	0.12473	0.01484	96.41	1	1
71707	71718	0.02587	0.076	0.00971	119.51	1	1
71716	71721	0.01664	0.10395	0.03043	325.87	1	1
71716	71721	0.01664	0.10395	0.03043	325.87	1	1
71717	71718	0.06332	0.1795	0.02469	119.51	1	1
71721	71802	0.05076	0.67162	0	100	1	1
71721	71823	0.03983	0.26849	0	100	1	1
71721	71824	0.09852	0.4695	0	100	1	1
71802	71821	0.00104	0.0173	0.11252	1717.78	1	1
71802	71821	0.00104	0.0173	0.11252	1717.78	1	1
71802	71823	-0.03599	0.3846	0	100	1	1
71802	71824	-0.00562	0.13462	0	100	1	1
71803	71817	0.00586	0.04251	0.09271	429.44	1	1
71803	71817	0.00586	0.04251	0.09271	429.44	1	1
71803	71804	0.00005	0.00083	0.00538	1717.78	1	1
71807	71817	0.00976	0.07055	0.15527	429.44	1	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
71807	71817	0.00976	0.07055	0.15527	429.44	1	1
71807	71821	0.01206	0.08728	0.19233	429.44	1	1
71807	71821	0.01206	0.08728	0.19233	429.44	1	1
71821	74802	0.00034	0.00356	0.01449	858.89	1	1
71821	74802	0.00034	0.00356	0.01449	858.89	1	1
71821	71853	0.00058	0.00959	0.06235	1717.78	1	1
71821	71853	0.00058	0.00959	0.06235	1717.78	1	1
71823	71824	0.0027	0.01634	0	100	1	1
71823	71853	0	0.0001	0	0	1	0
71904	77901	0	0.0001	0	3464.1	1	1
71904	77903	0	0.0001	0	3464.1	1	1
71906	77902	0	0.0001	0	3464.1	1	1
71906	77904	0	0.0001	0	3464.1	1	1
71906	71923	0.00015	0.00264	0.29944	3734.3	1	1
71906	71923	0.00015	0.00264	0.29944	3734.3	1	1
77901	77902	0.00142	0.02679	3.09692	3734.3	1	1
77903	77904	0.00142	0.02679	3.09692	3734.3	1	1
11813	11011	0	0.06993	0	140	1.05	1
11813	11012	0	0.07143	0	140	1.05	1
11813	11013	0	0.06957	0	140	1.05	1
11843	11014	0	0.03009	0	327	1.025	1
11843	11015	0	0.03009	0	327	1.025	1
11843	11016	0	0.03009	0	327	1.025	1
11813	11017	0	0.04063	0	320	1.05	1
11813	11018	0	0.04063	0	320	1.05	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
11813	11019	0	0.03824	0	340	1.05	1
11808	11031	0	0.0456	0	307	1.05	1
11808	11032	0	0.0456	0	307	1.05	1
11808	11033	0	0.04242	0	330	1.05	1
11801	11601	0	0.06256	0	300	0.96363	1
11801	11601	0	0.06175	0	300	0.96363	1
11802	11602	0	0.04625	0	200	0.98043	1
11802	11602	0	0.04835	0	200	1.025	1
11802	11602	0	0.065	0	200	0.98043	1
11802	11602	0	0.065	0	200	1.025	1
11803	11603	0	0.07314	0	200	0.98742	1
11803	11603	0	0.07314	0	200	0.98742	1
11806	11606	0	0.06635	0	200	0.98043	1
11806	11606	0	0.066	0	200	0.98043	1
11808	11608	0	0.055	0	300	1	1
11808	11608	0	0.055	0	300	1	1
11810	11610	0	0.07176	0	200	1.02311	1
11810	11610	0	0.07176	0	200	1.02311	1
11810	11610	0	0.07176	0	200	1.02311	1
11810	11610	0	0.07231	0	200	1.02311	1
11811	11611	0	0.04784	0	300	0.95173	1
11811	11611	0	0.04784	0	300	0.95173	1
11843	11613	0	0.06252	0	300	0.97552	1
11843	11613	0	0.06241	0	300	0.97552	1
11814	11614	0	0.07176	0	200	0.98742	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
11814	11614	0	0.07176	0	200	0.98742	1
11815	11615	0	0.06679	0	200	1.01121	1
11815	11615	0	0.06679	0	200	1.01121	1
11801	11631	0	0.06378	0	300	0.99931	1
11801	11631	0	0.06389	0	300	0.99931	1
11803	11633	0	0.07314	0	200	0.97552	1
11803	11633	0	0.064	0	200	0.98043	1
11806	11636	0	0.04635	0	200	0.98043	1
11806	11636	0	0.04685	0	200	0.98043	1
11838	11638	0	0.055	0	300	0.9875	1
11838	11638	0	0.055	0	300	0.9875	1
11813	11643	0	0.06201	0	300	0.99931	1
11813	11643	0	0.0623	0	300	0.99931	1
11814	11644	0	0.07176	0	200	0.99931	1
11814	11644	0	0.07231	0	200	0.99931	1
11802	11702	0	0.055	0	300	1	1
11802	11702	0	0.055	0	300	1	1
11802	11702	0	0.055	0	300	1	1
11803	11703	0	0.055	0	300	0.975	1
11803	11703	0	0.055	0	300	0.975	1
11804	11704	0	0.05277	0	300	0.97418	1
11804	11704	0	0.0535	0	300	0.97418	1
11804	11704	0	0.0535	0	300	0.9623	1
11707	15003	0	0.24556	0	52.94	1.05	1
11807	11707	0	0.055	0	300	1.0125	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวตัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
11807	11707	0	0.055	0	300	1.0125	1
11839	11709	0	0.05942	0	300	0.99794	1
11839	11709	0	0.05942	0	300	0.99794	1
11810	11710	0	0.04373	0	300	0.99794	1
11811	11711	0	0.055	0	300	0.975	1
11812	11712	0	0.05867	0	300	0.99794	1
11812	11712	0	0.05867	0	300	0.99794	1
11812	11712	0	0.05867	0	300	0.97418	1
11713	15002	0	0.07027	0	185	1.05	1
11843	11713	0	0.05942	0	300	1.00744	1
11843	11713	0	0.05942	0	300	1.00744	1
11815	11715	0	0.05904	0	300	1.00982	1
11815	11715	0	0.06717	0	300	1.00982	1
11719	15006	0	0.09325	0	139.41	1.025	1
11819	11719	0	0.055	0	300	0.9875	1
11819	11719	0	0.055	0	300	0.9875	1
11819	11719	0	0.055	0	300	0.9875	1
11820	11720	0	0.05942	0	300	0.95042	1
11820	11720	0	0.05942	0	300	0.95042	1
11820	11720	0	0.05942	0	300	0.95042	1
11807	11737	0	0.06692	0	200	0.99604	1
11807	11737	0	0.06692	0	200	0.96182	1
11740	15005	0	0.09866	0	131.76	1.025	1
11740	15001	0	0.28889	0	45	1.025	1
11740	15004	0	0.09286	0	140	1.025	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวตัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
11810	11740	0	0.05942	0	300	0.98606	1
11810	11740	0	0.05942	0	300	0.98606	1
11907	11807	0	0.02599	0	600	1.01042	1
11907	11807	0	0.02607	0	600	1.01042	1
11907	11807	0	0.02599	0	600	1.04783	1
11909	11809	0	0.018	0	1000	0.95	1
11909	11809	0	0.018	0	1000	0.95	1
11909	11809	0	0.018	0	1000	0.95	1
11912	11812	0	0.03174	0	750	0.96052	1
11912	11812	0	0.03174	0	750	0.96052	1
11912	11812	0	0.03174	0	750	0.96052	1
11909	11839	0	0.018	0	1000	0.95	1
51826	51001	0	0.03846	0	312	1.05	1
51826	51002	0	0.03846	0	312	1.05	1
51826	51003	0	0.04959	0	242	1.05	1
51856	51004	0	0.03846	0	312	1.025	1
51856	51005	0	0.03846	0	312	1.025	1
51856	51006	0	0.04959	0	242	1.025	1
51856	51007	0	0.03846	0	312	1.05	1
51856	51008	0	0.03846	0	312	1.05	1
51856	51009	0	0.03846	0	312	1.05	1
51926	51010	0	0.03846	0	312	1.05	1
51926	51011	0	0.03846	0	312	1.05	1
51926	51012	0	0.03846	0	312	1.05	1
51704	51604	0	0.2996	0	25	1.0375	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
51801	51701	0	0.0615	0	200	0.95652	1
51801	51701	0	0.065	0	200	1	1
51702	55001	0	0.26	0	50	1.05	1
51802	51702	0	0.055	0	300	0.95	1
51802	51702	0	0.055	0	300	0.95	1
51705	55006	0	0.10424	0	124.71	1	1
51706	55004	0	0.09286	0	140	1.025	1
51706	55005	0	0.09286	0	140	1	1
51806	51706	0	0.06698	0	200	0.98606	1
51806	51706	0	0.06698	0	200	0.98606	1
51806	51706	0	0.06919	0	200	0.98606	1
51806	51706	0	0.06919	0	200	0.98606	1
51728	55013	0	0.10137	0	128.24	1	1
51728	55012	0	0.09779	0	132.94	1	1
51728	55011	0	0.10424	0	124.71	1	1
51828	51728	0	0.055	0	300	1	1
51828	51728	0	0.055	0	300	1	1
51828	51728	0	0.055	0	300	1	1
51926	51826	0	0.03174	0	750	1.01042	1
51926	51856	0	0.03174	0	750	0.98547	1
51940	54013	0	0.03867	0	362	1	1
51940	54016	0	0.03867	0	362	1	1
51940	64063	0	0.03867	0	362	1	1
51940	54011	0	0.03784	0	370	1	1
51940	54012	0	0.03784	0	370	1	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
51940	54014	0	0.03784	0	370	1	1
51940	54015	0	0.03784	0	370	1	1
51940	64061	0	0.03784	0	370	1	1
51940	64062	0	0.03784	0	370	1	1
61807	61001	0	0.0174	0	680	1.025	1
61807	61002	0	0.0174	0	680	1.025	1
61808	61003	0	0.0175	0	706	1.05	1
61808	61004	0	0.0175	0	706	1.05	1
61808	61021	0	0.1333	0	125	1.05	1
61808	61022	0	0.1333	0	125	1.05	1
61808	61023	0	0.125	0	125	1.05	1
61808	61024	0	0.1333	0	125	1.05	1
61808	61025	0	0.1333	0	125	1.05	1
61808	61026	0	0.125	0	125	1.05	1
61807	61027	0	0.05461	0	293	1.05	1
61807	61028	0	0.05461	0	293	1.05	1
61807	61029	0	0.05016	0	319	1.05	1
61716	65039	0	0.06656	0	195.3	1	1
61716	65038	0	0.10231	0	127.06	1	1
61816	61716	0	0.06698	0	200	0.97418	1
61816	61716	0	0.06698	0	200	0.97418	1
61816	61716	0	0.06698	0	200	0.97418	1
61816	61716	0	0.06698	0	200	0.97418	1
61727	65040	0	0.06656	0	195.3	1	1
61727	65041	0	0.1014	0	128.2	1	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

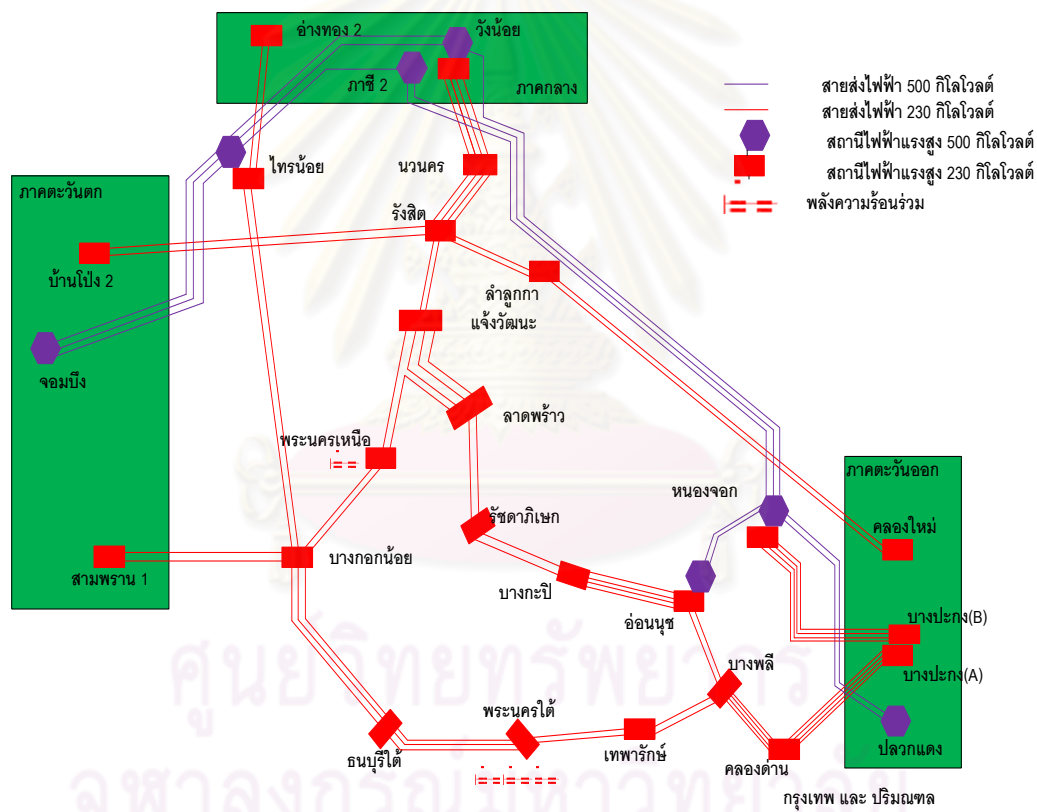
จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
61727	65042	0	0.10943	0	118.8	1	1
61827	61727	0	0.055	0	300	0.9875	1
61827	61727	0	0.055	0	300	0.9875	1
61827	61727	0	0.055	0	300	0.9875	1
61927	61827	0	0.01867	0	1000	0.94804	1
61927	61827	0	0.01874	0	1000	0.94804	1
61927	61827	0	0.01874	0	1000	0.94804	1
64805	64027	0	0.024	0	500	1.025	1
64901	64031	0	0.01605	0	810	1.05	1
64901	64032	0	0.01605	0	810	1.05	1
71803	71001	0	0.04	0	300	1.05	1
71708	71021	0	0.4108	0	21	1.05	1
71923	71031	0	0.0151	0	860	1.025	1
71923	71032	0	0.0151	0	860	1.025	1
71823	71041	0	0.0444	0	270	1.025	1
71823	71042	0	0.0444	0	270	1.025	1
71823	71043	0	0.0387	0	310	1.025	1
71823	71044	0	0.0444	0	270	1.025	1
71823	71045	0	0.0444	0	270	1.025	1
71823	71046	0	0.0387	0	310	1.025	1
71923	71047	0	0.0444	0	270	1.025	1
71923	71048	0	0.0444	0	270	1.025	1
71923	71049	0	0.0387	0	310	1.025	1
71802	71702	0	0.06958	0	200	0.92666	1
71803	71703	0	0.062	0	200	0.9875	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
71803	71703	0	0.062	0	200	0.9875	1
71807	71707	0	0.065	0	200	0.925	1
71807	71707	0	0.065	0	200	0.925	1
71817	71717	0	0.123	0	100	0.9875	1
71817	71717	0	0.123	0	100	0.9875	1
71821	71721	0	0.06191	0	200	0.975	1
71821	71721	0	0.0652	0	200	0.975	1
71821	71721	0	0.06191	0	200	0.975	1
71721	75001	0	0.06667	0	150	1	1
71721	75002	0	0.06667	0	150	1	1
71721	75003	0	0.06667	0	150	1	1
71824	71724	0	0.06587	0	200	0.92666	1
71824	71724	0	0.06421	0	200	0.92666	1
71824	71724	0	0.06587	0	200	0.92666	1
71824	71724	0	0.06476	0	200	0.92666	1
71904	71804	0	0.01666	0	1000	1	1
71923	71853	0	0.02867	0	750	0.95	1
71923	71853	0	0.02867	0	750	0.95	1
71923	74013	0	0.04332	0	346	1.0395	1
71923	74016	0	0.04332	0	346	1.0395	1
71923	74011	0	0.04696	0	309	1.0395	1
71923	74012	0	0.04696	0	309	1.0395	1
71923	74014	0	0.04696	0	309	1.0395	1
71923	74015	0	0.04696	0	309	1.0395	1
74802	74001	0	0.03292	0	322	1.05	1

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในไฟฟ้าบริเวณกรุงเทพมหานคร

จาก บัส	ถึง บัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)	สถานะ
74802	74002	0	0.03292	0	322	1.05	1
74802	74003	0	0.03264	0	322	1.05	1



1.3 ระบบทดสอบปรับปรุง IEEE 30-บัส

ระบบทดสอบปรับปรุง IEEE 30 บัส ปรับปรุงมาจากระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ในโปรแกรม MATPOWER โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการเพิ่มเติมข้อมูลในส่วนของคุณค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องเพื่อใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรต่อไป โดยให้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 0.25 p.u. ทุกเครื่อง

ข้อมูลบัส กำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสายส่งในระบบไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ ก.7 ก.8 และ ก.9 ตามลำดับ โดยค่า per unit ของพารามิเตอร์ในตาราง คำนวณจากค่าแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของบัส และค่ากำลังไฟฟ้าฐานเท่ากับ 100 MVA

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่แรงดัน 1.0 p.u.)	
			P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	บัสอ้างอิง	132	0	0	0	0
2	บัสแรงดัน	132	21.7	12.7	0	0
3	บัสโหลด	132	2.4	1.2	0	0
4	บัสโหลด	132	7.6	1.6	0	0
5	บัสแรงดัน	132	94.2	19	0	0
6	บัสโหลด	132	0	0	0	0
7	บัสโหลด	132	22.8	10.9	0	0
8	บัสแรงดัน	132	30	30	0	0
9	บัสโหลด	1	0	0	0	0
10	บัสโหลด	33	5.8	2	0	19
11	บัสแรงดัน	11	0	0	0	0
12	บัสโหลด	33	11.2	7.5	0	0
13	บัสแรงดัน	11	0	0	0	0
14	บัสโหลด	33	6.2	1.6	0	0
15	บัสโหลด	33	8.2	2.5	0	0
16	บัสโหลด	33	3.5	1.8	0	0
17	บัสโหลด	33	9	5.8	0	0

ตารางที่ ก.7 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

บัส	ประเภท	แรงดัน (kV)	ความต้องการใช้ไฟฟ้า		ตัวต่อขนาน (กำลังที่แรงดัน 1.0 p.u.)	
			P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
18	บัสโหลด	33	3.2	0.9	0	0
19	บัสโหลด	33	9.5	3.4	0	0
20	บัสโหลด	33	2.2	0.7	0	0
21	บัสโหลด	33	17.5	11.2	0	0
22	บัสโหลด	33	0	0	0	0
23	บัสโหลด	33	3.2	1.6	0	0
24	บัสโหลด	33	8.7	6.7	0	4.3
25	บัสโหลด	33	0	0	0	0
26	บัสโหลด	33	3.5	2.3	0	0
27	บัสโหลด	33	0	0	0	0
28	บัสโหลด	132	0	0	0	0
29	บัสโหลด	33	2.4	0.9	0	0
30	บัสโหลด	33	10.6	1.9	0	0

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

บัส	กำลังการผลิต		กำลังการผลิตสูงสุด		กำลังการผลิตต่ำสุด	
	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	260.2	-16.1	360.2	10	0	0
2	40	50	140	50	0	-40
5	0	37	100	40	0	-40
8	0	37.3	100	40	0	-10
11	0	16.2	100	24	0	-6
13	0	10.6	100	24	0	-6

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลสายส่งในระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

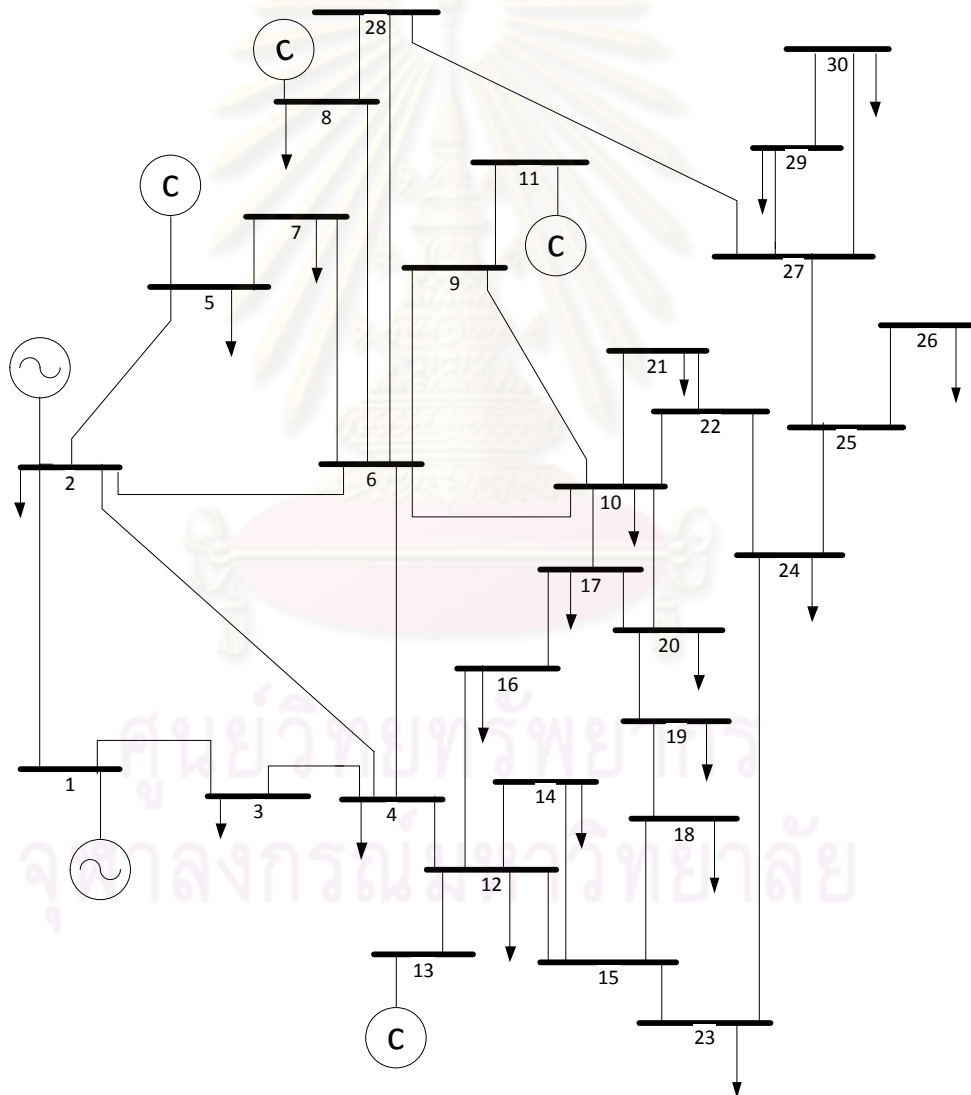
จากบัส	ถึงบัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)
1	2	0.0192	0.0575	0.0528	180	0
1	3	0.0452	0.1652	0.0408	180	0
2	4	0.057	0.1737	0.0368	180	0
3	4	0.0132	0.0379	0.0084	180	0
2	5	0.0472	0.1983	0.0418	180	0
2	6	0.0581	0.1763	0.0374	180	0
4	6	0.0119	0.0414	0.009	180	0
5	7	0.046	0.116	0.0204	180	0
6	7	0.0267	0.082	0.017	180	0
6	8	0.012	0.042	0.009	180	0
6	9	0	0.208	0	180	0.978
6	10	0	0.556	0	180	0.969
9	11	0	0.208	0	180	0
9	10	0	0.11	0	180	0
4	12	0	0.256	0	180	0.932
12	13	0	0.14	0	180	0
12	14	0.1231	0.2559	0	180	0
12	15	0.0662	0.1304	0	180	0
12	16	0.0945	0.1987	0	180	0
14	15	0.221	0.1997	0	180	0
16	17	0.0524	0.1923	0	180	0
15	18	0.1073	0.2185	0	180	0
18	19	0.0639	0.1292	0	180	0
19	20	0.034	0.068	0	180	0
10	20	0.0936	0.209	0	180	0

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

จากบัส	ถึงบัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุสาย ส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง (ratio)
12	13	0	0.14	0	180	0
12	14	0.1231	0.2559	0	180	0
12	15	0.0662	0.1304	0	180	0
12	16	0.0945	0.1987	0	180	0
14	15	0.221	0.1997	0	180	0
16	17	0.0524	0.1923	0	180	0
15	18	0.1073	0.2185	0	180	0
18	19	0.0639	0.1292	0	180	0
19	20	0.034	0.068	0	180	0
10	20	0.0936	0.209	0	180	0
10	17	0.0324	0.0845	0	180	0
10	21	0.0348	0.0749	0	180	0
10	22	0.0727	0.1499	0	180	0
21	22	0.0116	0.0236	0	180	0
15	23	0.1	0.202	0	180	0
22	24	0.115	0.179	0	180	0
23	24	0.132	0.27	0	180	0
24	25	0.1885	0.3292	0	180	0
25	26	0.2544	0.38	0	180	0
25	27	0.1093	0.2087	0	180	0
28	27	0	0.396	0	180	0.968
27	29	0.2198	0.4153	0	180	0
27	30	0.3202	0.6027	0	180	0
29	30	0.2399	0.4533	0	180	0
8	28	0.0636	0.2	0.0428	180	0

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งในระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.)	ตัวอัดประจุสายส่ง (p.u.)	ขีดจำกัดทางความร้อน (MVA)	อัตราส่วนหม้อแปลง (ratio)
6	28	0.0169	0.0599	0.013	180	0



รูปที่ ก.3 ระบบทดสอบแบบปรับปรุงระบบ IEEE 30 บัส

ภาคผนวก ข

แผนการขยายระบบส่ง

ในภาคผนวก ข ได้แสดงถึงข้อมูลตำแหน่ง และรูปร่างของระบบส่งไฟฟ้าในบริเวณกรุงเทพมหานครที่ได้จากกรณีศึกษาการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการแก้ไขปัญหาการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลังกับระบบไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานครโดยวิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมในบทที่ 5 เมื่อมีการพิจารณาการวางแผนขยายระบบส่งในแบบต่างๆ คือ ระบบที่ได้ที่ได้จากแผนที่พิจารณาการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งเพียงอย่างเดียว และระบบที่ได้จากแผนที่มีการพิจารณาระบบที่ได้มีการขยายตัว และมีการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยวิธีที่นำเสนอ (การติดตั้ง CLR)

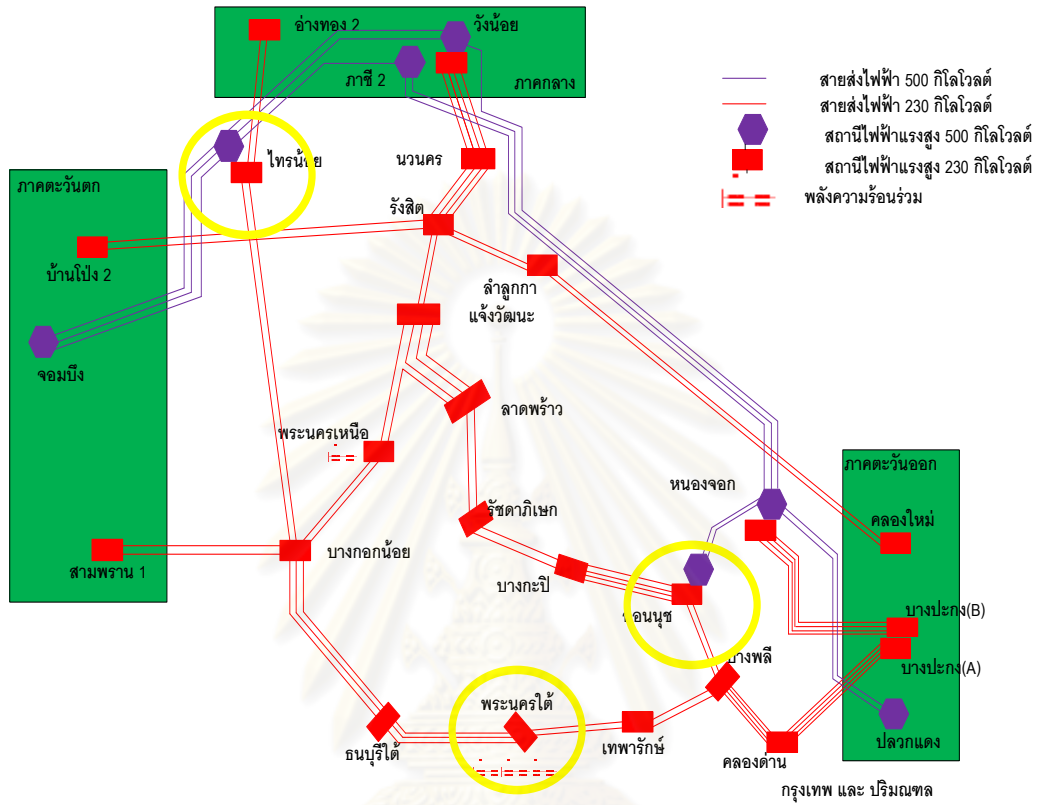
ข.1 แผนการขยายระบบส่งที่พิจารณาการแก้ไขปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งเพียงอย่างเดียว (การทดลองกรณีที่ 2 ในกรณีศึกษา 5.3)

จากการคำนวณหาค่าตอบที่ดีที่สุดในการแก้ไขปัญหาการขยายระบบส่งเพียงอย่างเดียวสามารถหาค่าแผนการก่อสร้างสายส่งเพิ่ม 5 วงจร ได้ดังตารางที่ ข.1 และรูปที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลสายส่งในแผนก่อสร้างเพิ่ม 5 วงจร

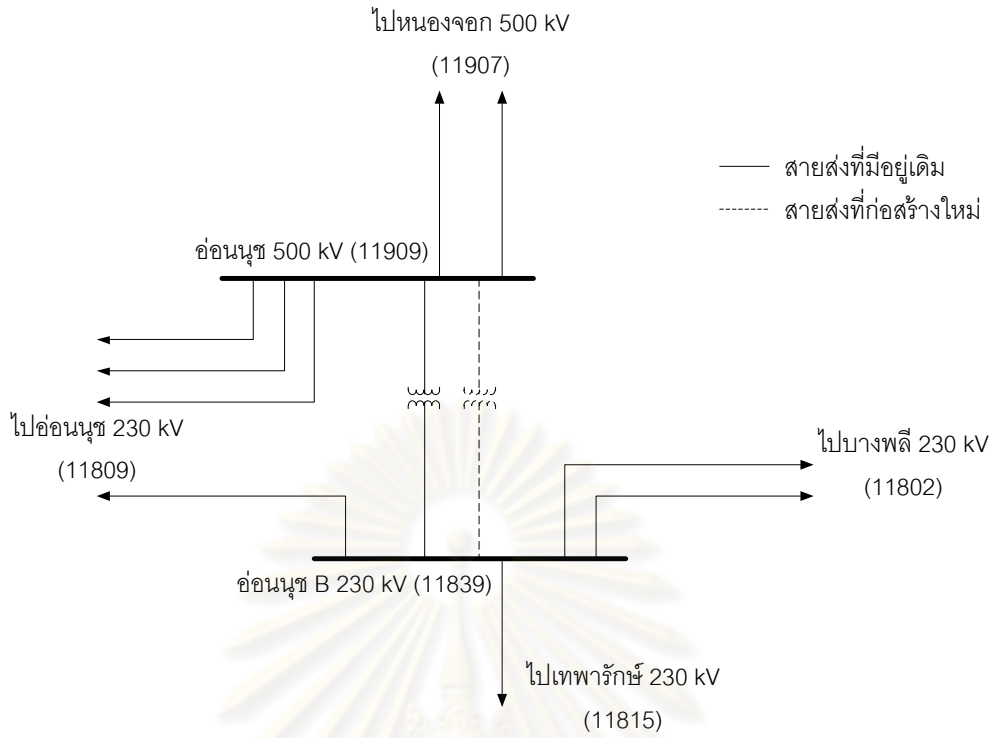
วงจรที่	จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.)	ตัวอัดประจุสายส่ง (p.u.)	ขีดจำกัดทางความร้อน (MVA)	อัตราส่วนหม้อแปลง (ratio)	มุมของหม้อแปลง
1	11909	11839	0	0.018	0	1000	0.95	0
2	11813	11011	0	0.06993	0	140	1.05	30
3	11813	11012	0	0.07143	0	140	1.05	30
4	11813	11013	0	0.06957	0	140	1.05	30
5	11812	11712	0	0.05867	0	300	0.99794	0

โดยตำแหน่งของสายส่งที่อยู่ในแผนการก่อสร้างเพิ่มนั้นสามารถแสดงตำแหน่งบนแผนที่ระบบส่งในกรุงเทพมหานครได้ในรูปที่ รูปที่ ข.1

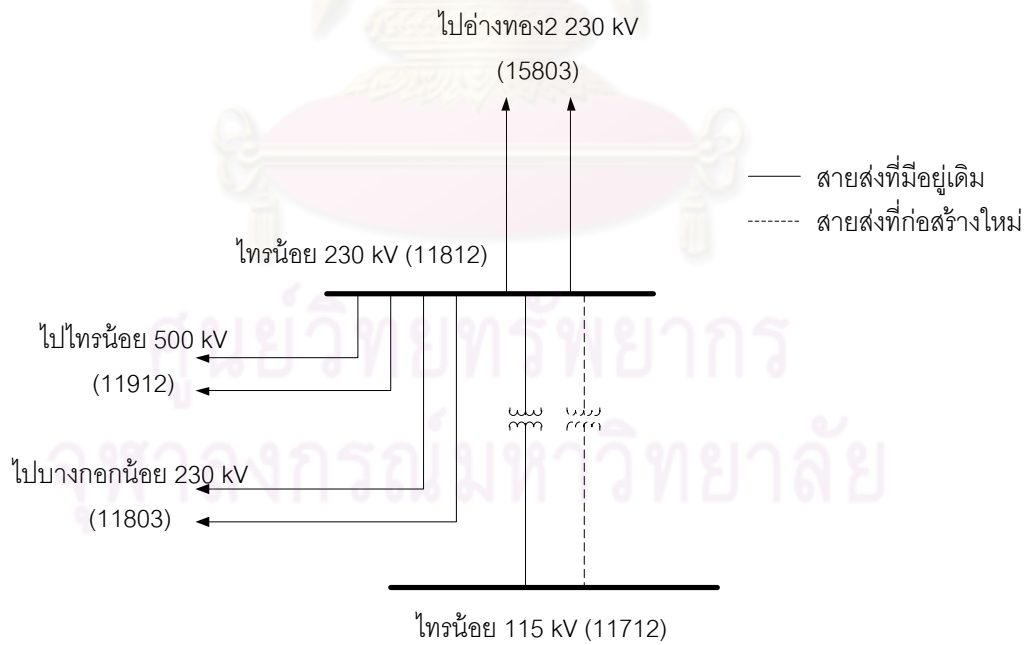


รูปที่ ข.1 ตำแหน่งการก่อสร้างสายส่งเพิ่มในกรณีนี้ที่ 2

จากตำแหน่งการก่อสร้างสายส่งเพิ่มในรูปที่ ข.1 สามารถแสดงรายละเอียดการเชื่อมต่อของสายส่งวงจรที่ก่อสร้างเพิ่มวงจรที่ 1 และวงจรที่ 5 ดังรูปที่ ข.2 และ รูปที่ ข.3 ตามลำดับ



รูปที่ ข.2 สายส่งที่ก่อสร้างเพิ่มวงจรที่ 1



รูปที่ ข.3 สายส่งที่ก่อสร้างเพิ่มวงจรที่ 5

ข.2 แผนการขยายระบบส่งที่มีการพิจารณาระบบที่ได้มีการขยายตัว และมีการแก้ไข ปัญหาการวางแผนขยายระบบส่งร่วมกับการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยวิธีที่นำเสนอ

แผนการขยายระบบส่งรวมไปถึงการแก้ไขปัญหาระแสลัดวงจรสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนประกอบไปด้วย

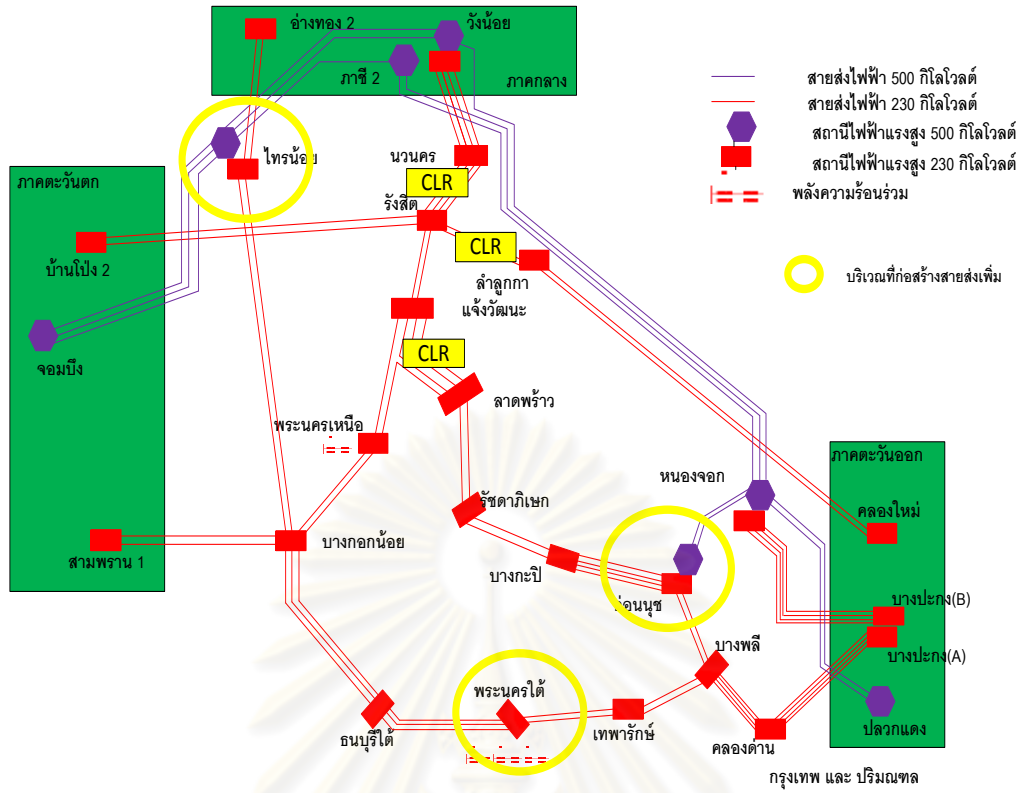
- การก่อสร้างสายส่งใหม่
- การติดตั้ง CLR

การก่อสร้างสายส่งใหม่

จากการคำนวณหาค่าตอบที่ดีที่สุดที่สามารถหาค่าแผนการก่อสร้างสายส่งเพิ่ม 6 วงจร ได้ดังตารางที่ ข.2 โดยตำแหน่งของสายส่งที่อยู่ในแผนการก่อสร้างเพิ่มนั้นสามารถแสดงตำแหน่งบนแผนที่ระบบส่งในกรุงเทพมหานครได้ในรูปที่ รูปที่ ข. 4

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลสายส่งในแผนก่อสร้างเพิ่มในการทดสอบกรณีที่ 3 การทดสอบ 5.3

วงจร ที่	จาก บัส	ถึงบัส	ความ ต้านทาน (p.u.)	ค่ารีแอก แตนซ์ (p.u.)	ตัวอัด ประจุ สายส่ง (p.u.)	ขีดจำกัด ทางความ ร้อน (MVA)	อัตราส่วน หม้อ แปลง (ratio)	มุม ของ หม้อ แปลง
1	11909	11839	0	0.018	0	1000	0.95	0
2	11813	11011	0	0.06993	0	140	1.05	30
3	11813	11012	0	0.07143	0	140	1.05	30
4	11813	11013	0	0.06957	0	140	1.05	30
5	11812	11712	0	0.05867	0	300	0.99794	0



รูปที่ ข.4 ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของระบบสำหรับแผนในกรณี 3

นอกจากการก่อสร้างสายส่งเพิ่มแล้วจากคำตอบโดยวิธีที่นำเสนอ มีการพิจารณาติดตั้ง CLR ดังต่อไปนี้

การติดตั้ง CLR

ผลการหาตำแหน่ง และขนาด CLR ประกอบไปด้วยการติดตั้ง 3 ตำแหน่งดังรูปที่ ข.4 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. ติดตั้งระหว่างบัสแจ้จวนนะ (11804) และบัสลาดพร้าว (11806) ขนาด CLR 0.05 p.u.
2. ติดตั้งระหว่างบัสรังสิต(11810) และบัสนวนคร (11819) ขนาด CLR 0.05 p.u.
3. ติดตั้งระหว่างบัสรังสิต(11810) และบัสลำลูกกา (11820) ขนาด CLR 0.05 p.u.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสัญญาพงศ์ จิรถาวรีย์ เกิดวันที่ 21 กรกฎาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดสมุทรสาครสำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย