

การหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อ
การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม



นางสาวสิริภา จุลกาญจน์

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

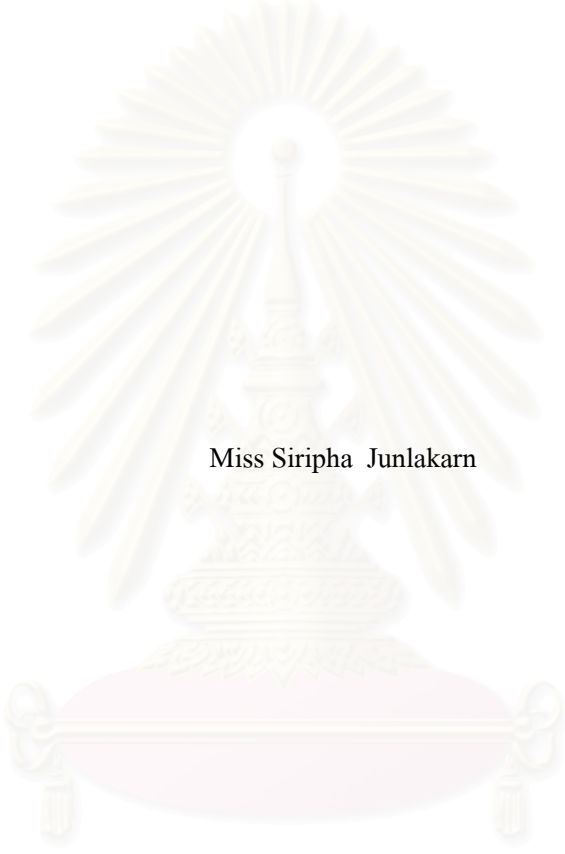
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMAL SIZING OF DISTRIBUTED GENERATORS IN CONSIDERATION OF IMPACTS
ON PROTECTION COORDINATION USING GENETIC ALGORITHMS



Miss Siripha Junlakarn

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก
โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันด้วย
ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

โดย

นางสาวสิริภา จุลกาญจน์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

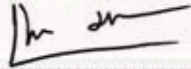
อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิตศึกษา


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.คิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี)

สิริภา จุลกาญจน์ : การหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (OPTIMAL SIZING OF DISTRIBUTED GENERATORS IN CONSIDERATION OF IMPACTS ON PROTECTION COORDINATION USING GENETIC ALGORITHMS) อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร.แนบบุญ หุนเจริญ, 161 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ในกรณีที่มีการระบุจำนวน และตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะทำการติดตั้ง เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้มีค่าต่ำสุด โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ประยุกต์ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ โครงสร้างของวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกอธิบายถึงการลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่ออุปกรณ์ป้องกัน ส่วนที่สองเป็นการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน และส่วนที่สามนำเสนอผลการทดสอบโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นกับระบบทดสอบรอยบิลลิตัน บัส 2 (Roy Billinton Test System Bus 2) และระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่นำเสนอสามารถกำหนดขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้อย่างเหมาะสม ทำให้กำลังสูญเสียในระบบลดลงได้ดีกว่าการใช้วิธีกำหนดการเชิงกำลังสองสืบเนื่อง (Sequential Quadratic Programming, SQP) เมื่อพิจารณาที่จำนวนและตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบทดสอบเดียวกัน สามารถประยุกต์กับเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันได้ ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกำลังสูญเสียในกรณีที่คำนึงถึงผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน และกำลังสูญเสียในกรณีที่ผ่อนปรนผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน จะได้ว่ากำลังสูญเสียในกรณีที่คำนึงถึงผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันจะมีค่ามากกว่ากำลังสูญเสียในกรณีที่ผ่อนปรนผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันไม่เกิน 10 %

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....*Nisan*
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*Lu Su*
 ปีการศึกษา.....2549.....

4870521021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : DISTRIBUTED GENERATION / DISTRIBUTION LOSS / PROTECTION
COORDINATION / GENETIC ALGORITHM APPLICATION

SIRIPHA JUNLAKARN : OPTIMAL SIZING OF DISTRIBUTED GENERATORS IN
CONSIDERATION OF IMPACTS ON PROTECTION COORDINATION USING
GENETIC ALGORITHMS. THESIS ADVISOR : DR. NAEBOON HOONCHAREON,
Ph.D. 161 pp.

This thesis presents a method to determine optimal sizing of distributed generation (DG) in the case when the total number and the locations of units to be installed are specified for minimizing distribution loss. It takes into account the impact of DG on coordination with protection devices within the radial distribution system. Genetic algorithms are applied to solve the mathematical problem formulated. The contents are divided into three parts. Firstly, distribution loss reduction by using distributed generation and the effects of distributed generators on protection devices have been elaborated. Secondly, the approach based on genetic algorithms has been proposed to solve the loss minimization problem in radial distribution system taking into account the existing protection coordination. And last, test results using the two test systems, that are Roy Billinton Test System Bus 2 (RBTS BUS 2) and a modified Provincial Electricity Authority (PEA) test system have been presented and discussed. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed algorithm which can appropriately determine the optimal generated power of the distributed generators, resulting in a decrease of distribution losses more than that in the case when solving the same problem using sequential quadratic programming, and produced no impact on protection coordination. Additionally, when comparing loss reduction performance between the case concerning the protection coordination constraints and that when the protection coordination constraints are relaxed, it is found that the distribution loss in the former case is higher than that of the later case by approximately no more than 10 %.

Department..... Electrical Engineering..... Student's signature..... *Siripha*
Field of study..... Electrical Engineering..... Advisor's signature..... *Naeboon*
Academic year..... 2006.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.แนบบุญ หนูเจริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์ มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล และอาจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรีที่ได้ เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ โครงการทุนศึกษากันกุฎิ ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนการศึกษาตลอดระยะเวลา การศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อน พี่น้อง ทุก ๆ คนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 การลดกำลังกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	6
2.1 รูปแบบของปัญหา.....	6
2.2 วิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสม.....	7
2.3 ปัจจัยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในการลดกำลังกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย.....	8
2.3.1 ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	9
2.3.2 ตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	10
บทที่ 3 ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อระดับกระแสลัดวงจรและอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	13
3.1 ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อระดับกระแสลัดวงจรและอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล.....	13
3.2 ลำดับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน.....	15
3.3 รูปแบบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่อาจมีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน.....	17
3.4 การกำหนดเงื่อนไขจำกัดทางคณิตศาสตร์เพื่อป้องกันผลกระทบของขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อการทำงานร่วมกันของระบบป้องกัน.....	20

	หน้า
บทที่ 4 การแก้ปัญหาค่าเหมาะสม โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	27
4.1 พื้นฐานขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	27
4.2 กระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	28
4.2.1 การแทนผลเฉลยด้วยโครโมโซม.....	28
4.2.2 การกำหนดประชากรเริ่มต้น.....	29
4.2.3 การประเมินความเหมาะสม.....	29
4.2.4 การคัดเลือกประชากร.....	30
4.2.5 การดำเนินการทางพันธุศาสตร์.....	31
4.2.6 เงื่อนไขการหยุด.....	35
4.3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	37
บทที่ 5 รูปแบบปัญหาของวิทยานิพนธ์.....	39
5.1 นิยามตัวแปร.....	39
5.2 ฟังก์ชันจุดประสงค์ และเงื่อนไขจำกัด.....	40
5.3 ขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหา.....	43
5.4 การพัฒนาโปรแกรม และการทดสอบพื้นฐาน.....	45
บทที่ 6 การทดสอบสมรรถนะของโปรแกรมและการวิเคราะห์ผล.....	47
6.1 ระบบทดสอบ.....	47
6.1.1 ระบบทดสอบ RBTS BUS2.....	47
6.1.2 ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	50
6.2 ขั้นตอนในการทดสอบ.....	53
6.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์.....	53
6.3.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ของระบบ RBTS BUS2.....	54
6.3.1.1 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1-3 เครื่อง.....	54
6.3.1.2 ผลกระทบจากเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน.....	57
6.3.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของ กฟภ.....	61
6.3.2.1 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1-3 เครื่อง.....	61
6.3.2.2 ผลกระทบจากเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน.....	63

6.4	วิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึม.....	66
6.5	การประยุกต์ใช้โปรแกรมในการวางแผนใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อรองรับ การเจริญเติบโตของความต้องการไฟฟ้า.....	67
บทที่ 7	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	70
7.1	สรุป.....	70
7.2	ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไปในอนาคต.....	72
	รายการอ้างอิง.....	73
	ภาคผนวก.....	76
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลป้อนเข้าของระบบทดสอบ.....	77
	ก.1 ระบบทดสอบ RBTS BUS 2.....	78
	ก.2 ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.).....	82
	ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบของระบบทดสอบ RBTS BUS2.....	89
	ข.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	89
	ข.2 ผลการคำนวณกระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกัน.....	101
	ข.3 ตัวอย่างลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน.....	115
	ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบโปรแกรมของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของ กฟภ.....	117
	ค.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	117
	ค.2 ผลการคำนวณกระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกัน.....	138
	ค.3 ตัวอย่างลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน.....	159
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	161

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	รูปแบบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและตำแหน่งความผิดพลาด พร้อมรายละเอียดของกระแสที่อุปกรณ์ป้องกันตรวจจับได้ทั้ง 5 กรณี.....	21
ตารางที่ 5.1	ผลการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายระหว่างวิธีกำหนดการเชิงกำลังสองสลับเนื่องกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	46
ตารางที่ 6.1	ข้อมูลความยาวสายป้อนของระบบทดสอบ RBTS BUS 2.....	49
ตารางที่ 6.2	ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทดสอบ RBTS BUS 2.....	49
ตารางที่ 6.3	ประเภท และปริมาณความต้องการไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า ณ ตำแหน่งโหลดของระบบทดสอบ RBTS BUS 2.....	49
ตารางที่ 6.4	ปริมาณความต้องการไฟฟ้าแบ่งตามสายป้อนของระบบทดสอบ RBTS BUS 2....	50
ตารางที่ 6.5	ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ.....	51
ตารางที่ 6.6	ประเภท และปริมาณความต้องการไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า ณ จุดโหลดของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ.....	52
ตารางที่ 6.7	ปริมาณความต้องการไฟฟ้าแบ่งตามสายป้อนของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ.....	52
ตารางที่ 6.8	ผลการทดสอบ โปรแกรมกับระบบ RBTS BUS2	55
ตารางที่ 6.9	เปรียบเทียบกำลังสูญเสียในระบบทดสอบ RBTS BUS 2 เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันกรณีต่างๆ.....	58
ตารางที่ 6.10	ผลการทดสอบ โปรแกรมกับระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ.....	62
ตารางที่ 6.11	เปรียบเทียบกำลังสูญเสียในระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันกรณีต่างๆ.....	64
ตารางที่ 6.12	ผลการทดสอบ โปรแกรมกับระบบทดสอบ RBTS BUS 2 เมื่อพิจารณาการเติบโตของความต้องการไฟฟ้า กรณีติดตั้ง DG ที่ตำแหน่ง D.....	68
ตารางที่ 6.13	ผลการทดสอบ โปรแกรมระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. เมื่อพิจารณาการเติบโตของความต้องการไฟฟ้า กรณีติดตั้ง DG ที่ตำแหน่ง E.....	68
ตารางที่ ก.1	ข้อมูลบัส ระบบทดสอบ RBTS BUS 2.....	78
ตารางที่ ก.2	ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบทดสอบ RBTS BUS 2.....	80
ตารางที่ ก.3	ข้อมูลสายส่ง ระบบทดสอบ RBTS BUS 2.....	81

ตารางที่ ค.9	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 8.....	134
ตารางที่ ค.10	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 9.....	136
ตารางที่ ค.11	กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณีฐาน.....	138
ตารางที่ ค.12	กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณี 1.....	140
ตารางที่ ค.13	กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณี 2.....	142
ตารางที่ ค.14	กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณี 3.....	144
ตารางที่ ค.15	กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณี 4.....	146
ตารางที่ ค.16	กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณี 5.....	149
ตารางที่ ค.17	กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณี 6.....	151
ตารางที่ ค.18	กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณี 7.....	153
ตารางที่ ค.19	กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณี 8.....	155
ตารางที่ ค.20	กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณี 9.....	157

สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกำลังการผลิตของ DG กับกำลังสูญเสียรวม (เทียบกับกรณีไม่มี DG) ในระบบจำหน่าย.....	9
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งติดตั้งของ DG กับเปอร์เซ็นต์กำลังสูญเสียที่ลดลง.....	11
รูปที่ 2.3	เปรียบเทียบกำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่ายระหว่างการติดตั้ง DG แบบกระจายและการติดตั้ง DG ตำแหน่งเดียว [2].....	12
รูปที่ 3.1	การเพิ่มระดับกระแสลัดวงจรเนื่องจากกระแสผิดพลาดจาก DG ยูนิตที่ 1 2 และ 3 ทำให้การประสานงานระหว่างฟิวส์และเบรกเกอร์ผิดพลาด.....	14
รูปที่ 3.2	ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล.....	15
รูปที่ 3.3	กราฟคุณสมบัติการทำงานร่วมกันระหว่างเบรกเกอร์ รีโคสเซอร์และฟิวส์.....	16
รูปที่ 3.4	ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ปลายทางหลังรีโคสเซอร์ และเกิดความผิดพลาดที่โหลดปลายสายป้อนหลังฟิวส์.....	17
รูปที่ 3.5	ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต้นทางหน้ารีโคสเซอร์ และเกิดความผิดพลาดที่โหลดปลายสายป้อนหลังฟิวส์.....	18
รูปที่ 3.6	ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต้นทางหน้ารีโคสเซอร์ และเกิดความผิดพลาดที่โหลดต้นสายป้อนหลังฟิวส์.....	18
รูปที่ 3.7	ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ปลายทางหลังรีโคสเซอร์ และเกิดความผิดพลาดที่โหลดต้นสายป้อนหลังฟิวส์.....	19
รูปที่ 3.8	การเกิดความผิดพลาดที่สายส่งคนละเส้นกับสายส่งที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก..	20
รูปที่ 3.9	ตัวอย่างจุดทำงานร่วมกันระหว่างรีโคสเซอร์และฟิวส์ของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	22
รูปที่ 3.10	ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล กรณีมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลายเครื่อง.....	25
รูปที่ 4.1	ตัวอย่างการแทนผลเฉลยด้วยโครโมโซมเลขฐานสอง.....	29
รูปที่ 4.2	ตัวอย่างการแทนผลเฉลยด้วยโครโมโซมเลขทศนิยม.....	29
รูปที่ 4.3	การครอสโอเวอร์.....	32
รูปที่ 4.4	การมิวเทชัน.....	34
รูปที่ 4.5	ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	36
รูปที่ 4.6	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	38
รูปที่ 5.1	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาของวิทยานิพนธ์.....	44
รูปที่ 5.2	แผนภาพเส้นเดียวของระบบจำหน่าย.....	45

	หน้า
รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบ RBTS BUS2.....	48
รูปที่ 6.2 กราฟคุณลักษณะของลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับระบบทดสอบ RBTS BUS 2.....	48
รูปที่ 6.3 ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	50
รูปที่ 6.4 กราฟคุณลักษณะของลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	51
รูปที่ 6.5 ระบบทดสอบ RBTS BUS2 และตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	54
รูปที่ 6.6 ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. และตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	61
รูปที่ ข.1 ระบบทดสอบ RBTS BUS 2 กรณีติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ตำแหน่ง D (กรณีที่ 2).....	115
รูปที่ ข.2 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่งโหลดที่ 2 (บัสที่ 4).....	115
รูปที่ ข.3 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่งโหลดที่ 6 (บัสที่ 10).....	116
รูปที่ ข.4 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่งโหลดที่ 14 (บัสที่ 24).....	116
รูปที่ ค.1 ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกรณีติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ตำแหน่ง C และ F (กรณีที่ 6).....	159
รูปที่ ค.2 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่งโหลดที่ 5 (บัสที่ 11).....	159
รูปที่ ค.3 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่งโหลดที่ 10 (บัสที่ 20).....	160
รูปที่ ค.4 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่งโหลดที่ 21 (บัสที่ 40).....	160

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Distributed Generation, DG) ตามมาตรฐาน IEEE1547-2003 [1] ได้ให้คำจำกัดความไว้ว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหมายถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเข้ากับพื้นที่ของระบบไฟฟ้ากำลังผ่านจุดต่อร่วม (Point of Common Coupling, PCC) อย่างไรก็ตามสำหรับงานวิจัยอื่น [2]-[4] สามารถสรุปได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ แหล่งผลิตไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับบริเวณของผู้ใช้ไฟฟ้า อาจเชื่อมโยงเข้ากับระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าหรือไม่ก็ได้ แต่เพื่อประโยชน์สูงสุดในการใช้งานควรเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้ากับระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กนั้นสามารถส่งไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้เมื่อไฟฟ้าเหลือใช้ และสามารถดึงไฟฟ้าจากระบบมาใช้เมื่อความต้องการไฟฟ้ามากกว่าที่ผลิตได้ โดยปกติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก แต่ไม่มีข้อจำกัดชัดเจนว่าต้องมีขนาดไม่เกินเท่าใด อาจมีขนาดเป็นกิโลวัตต์ (kW) จนถึงหลายเมกกะวัตต์ (MW) ได้

ปัจจุบันการก่อสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อตอบสนองความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีแนวโน้มสูงขึ้นในทุกๆ ปีมีความเป็นไปได้ยากมากขึ้น เนื่องจากปัญหาทางด้านสถานที่ก่อสร้าง ผลกระทบทางสังคม รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจึงมีแนวโน้มที่จะถูกนำไปเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวมากขึ้น ประกอบกับตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่อยู่ใกล้กับจุดโหลดสามารถช่วยลดระยะทางในการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นผลให้กำลังสูญเสียของระบบจำหน่ายลดลงได้

ปัจจัยสำคัญในการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมาเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเพื่อลดกำลังสูญเสีย ได้แก่ ขนาดและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก [2], [5] อย่างไรก็ตาม ปัจจัยดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน เนื่องจากปริมาณกระแสไหลพร่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เพิ่มให้กับระบบ อาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาดได้ รวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบ [6] จึงควรพิจารณาถึงผลกระทบดังกล่าวนี้ด้วย นอกจากนี้ การตั้งค่าหรือการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันให้เหมาะสมเมื่อมีการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้าสู่ระบบจำหน่ายเพิ่มมากขึ้น มีความยุ่งยากซับซ้อนในทางปฏิบัติ และมีความค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมจะสามารถลดความยุ่งยาก และค่าใช้จ่ายสำหรับการเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวได้

สำหรับการกำหนดตำแหน่งสำหรับติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กให้มีความเหมาะสมนั้น ในทางปฏิบัติอาจไม่สามารถกระทำได้โดยอิสระ เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องแหล่งพลังงานที่ใช้ผลิตไฟฟ้า พื้นที่ตั้ง และความพร้อมของผู้ผลิต ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงพิจารณาเฉพาะขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมเท่านั้น โดยได้มีการกำหนดตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไว้ล่วงหน้าก่อนแล้ว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ประยุกต์ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms, GA) สำหรับการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย เมื่อมีการระบุจำนวน และตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่าของอุปกรณ์ป้องกันที่มีอยู่เดิม
2. พัฒนาโปรแกรมการคำนวณขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กตามวิธีการที่ได้กำหนดไว้ เพื่อให้วิศวกรระบบจำหน่ายสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และวางแผนการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้โดยสะดวก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีขอบเขตดังนี้

1. พิจารณาระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างแบบเรเดียล
2. อุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายที่พิจารณา ได้แก่ เบรกเกอร์ รีโคลสเซอร์ และฟิวส์ โดยการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเป็นไปตามหลักการทั่วไปของระบบป้องกันสำหรับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล
3. อุปกรณ์ป้องกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 1547 กล่าวคือ ต้องปลดตัวเองออกจากระบบเมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติขึ้น เพื่อไม่ให้เกิดกรณีการแยกตัวเป็นเกาะ (Islanding)
4. หาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันที่มีอยู่เดิม โดยการประยุกต์ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

5. ศึกษาปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของความต้องการไฟฟ้าที่มีผลต่อขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และกำลังสูญเสีย
6. ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดจำนวนและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะติดตั้งในระบบจำหน่าย

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 1.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมาใช้เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย รวมถึงแนวทางในการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขจำกัดที่เกี่ยวข้องกับการลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย พร้อมทั้งข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีการที่นำมาใช้ในการหาคำตอบ
 - 1.2 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบต่อลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่าย
 - 1.3 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่เกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ระบุปัญหาที่จะทำการศึกษาในรูปแบบของปัญหาการหาค่าเหมาะสมภายใต้เงื่อนไขจำกัด โดยฟังก์ชันจุดประสงค์คือการลดกำลังสูญเสีย เงื่อนไขจำกัด คือ ทั่วไปเกี่ยวกับกำลังการผลิตของไฟฟ้าที่เหมาะสม รวมถึงลำดับการทำงานของระบบป้องกัน
3. ศึกษาการประยุกต์ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในการหาคำตอบของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่ทำการกำหนด
4. พัฒนาโปรแกรมที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียโดยคำนึงถึงลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่ถูกต้อง
5. ทดสอบสมรรถนะ และความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับระบบทดสอบรอยบิลลินตัน บัส 2 (Roy Billinton Test System Bus 2 : RBTS BUS 2) และระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากฟังก์ชันจุดประสงค์ว่าเป็นไปตามเงื่อนไขจำกัดหรือไม่ และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับกรณีที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก
6. ศึกษาปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของความต้องการไฟฟ้าแต่ละจุดโหลดที่มีผลต่อผลเฉลยที่ได้

7. ศึกษาพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีผลต่อคุณภาพของผลเฉลย และทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมรรถนะของโปรแกรม
8. เรียบเรียง พิมพ์ผลงานการวิจัย และจัดเข้ารูปเล่มเพื่อนำเสนอต่อคณะกรรมการพิจารณาต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. โปรแกรมคำนวณขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียโดยไม่ส่งผลกระทบต่อลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่มีอยู่เดิม ที่วิศวกรระบบจำหน่ายสามารถนำไปใช้งานได้จริง
2. ใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ความสามารถในการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไปใช้ในการลดกำลังสูญเสีย
3. ใช้วิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสม โดยพิจารณาผลต่อการกำลังสูญเสีย และอุปกรณ์ป้องกัน
4. ใช้ในการวางแผนเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เมื่อความต้องการไฟฟ้าในอนาคตมีแนวโน้มเจริญเติบโตมากขึ้น

1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบด้วย

บทที่ 2 เป็นการสรุปผลการศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการลดกำลังกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ประกอบด้วยหัวข้อรูปแบบปัญหาของงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการลดกำลังกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย วิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสม และปัจจัยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในการลดกำลังกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย

บทที่ 3 กล่าวถึงงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อระดับกระแสลัดวงจรและอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่าย โดยอธิบายถึงลำดับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันที่ถูกต้องสำหรับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล จากนั้นจึงแสดงรูปแบบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน พร้อมทั้งเงื่อนไขทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีผลต่อระบบป้องกัน โดย

เงื่อนไขดังกล่าวจะถูกเพิ่มเข้ามาในการแก้ปัญหาการลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

บทที่ 4 กล่าวถึงการแก้ปัญหาค่าเหมาะสม โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดของกระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม

บทที่ 5 แสดงถึงวิธีการกำหนดรูปแบบของปัญหาการหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายที่จะใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ และแสดงถึงการประยุกต์ใช้แนวทางการแก้ปัญหาที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 กับปัญหาที่กำหนดขึ้น

บทที่ 6 เป็นการอธิบายถึงการทดสอบโปรแกรมการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย โดยคำนึงถึงผลกระทบต่ออุปกรณ์ป้องกัน โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้มาจากอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงโครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของระบบทดสอบ ตามด้วยขั้นตอนในการทดลอง และในหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ โปรแกรมกับระบบทดสอบ พร้อมทั้งการวิเคราะห์ผลลัพธ์ในแต่ละกรณี

บทที่ 7 เป็นการสรุปผลการทำวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาทั้งหมด รวมทั้งเสนอแนะแนวทางการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การลดกำลังกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

ในบทนี้นำเสนอผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดกำลังกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ประกอบด้วยหัวข้อรูปแบบปัญหาของงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการลดกำลังกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย วิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะสม และปัจจัยสำคัญในการลดกำลังกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

2.1 รูปแบบของปัญหา

การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่าย ทำให้แหล่งผลิตไฟฟ้าอยู่ใกล้กับผู้ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น เป็นผลให้ระยะทางในการไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้ามายังผู้ใช้ไฟฟ้ามีระยะทางที่สั้นลง ซึ่งช่วยลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีงานวิจัยจำนวนมาก [2] - [13] เกี่ยวกับการลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

ในการกำหนดรูปแบบปัญหางานวิจัย ส่วนใหญ่ศึกษาทางด้านขนาดกำลังการผลิต และตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีผลต่อการลดกำลังสูญเสีย ทั้งนี้ ผลการวิจัยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ หากสามารถกำหนดขนาดกำลังการผลิต และตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้อย่างเหมาะสม จะทำให้ประสิทธิภาพในการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าสูง ในทางกลับกัน หากขนาดกำลังการผลิต และตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีความไม่เหมาะสม จะทำให้ประสิทธิภาพในการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าลดลง นอกจากนี้ อาจส่งผลกระทบต่อระบบถึงขั้นทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าสูงขึ้นได้

การกำหนดรูปแบบของปัญหาและข้อจำกัด เป็นการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ และเงื่อนไขจำกัดของระบบให้อยู่ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยเงื่อนไขจำกัดที่มักใช้กัน คือเงื่อนไขจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม (Optimal Power Flow Constraints) ร่วมกับเงื่อนไขจำกัดอื่นๆ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและการกำหนดขอบเขตของงานวิจัย ส่วนการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์นั้นจะแตกต่างกันไปตามจุดประสงค์ของผู้วิจัย ตัวอย่างการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ และเงื่อนไขจำกัด เช่น

- งานวิจัย [7]-[8] ใช้การหาค่าต่ำสุดของราคารวม ซึ่งเกิดจากการรวมกันระหว่างราคาของพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลา 1 ปีกับราคาในการลงทุนสร้างสายส่ง และใช้เงื่อนไขจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม ทั้งนี้ ในงานวิจัย [7] ได้คิดผลของความไม่แน่นอนของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลมรวมอยู่ในเงื่อนไขจำกัดด้วย
- งานวิจัย [9] นำแนวคิดการซื้อขายไฟฟ้ามาใช้ เพื่อหาค่าต่ำสุดของราคากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ส่งมาจากระบบผลิต กำลังไฟฟ้าที่ถูกส่งมามีค่าลดลง เนื่องจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งช่วยให้กำลังสูญเสียในระบบลดลง
- งานวิจัย [5], [10]-[13] ใช้วิธีการหาค่าต่ำสุดของกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย แต่จะต่างกันที่วิธีการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียและการกำหนดเงื่อนไขจำกัดเพิ่มเติม เช่น [10] ใช้วิธีการหาค่าต่ำสุดของกำลังสูญเสียที่คำนวณได้ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งโดยตรง และมีเงื่อนไขจำกัดเพิ่มในเรื่องของกำลังการผลิตรวมสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่อนุญาตให้จ่ายเข้าสู่ระบบ ในขณะที่งานวิจัย [11] จะใช้วิธีการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งแต่ละเส้นและนำค่ากำลังสูญเสียของสายส่งทุกเส้นคิดรวมกัน ส่วนงานวิจัย [5], [12]-[13] คำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยคิดจากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่บัสลบกับความต้องการพลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งระบบจำหน่าย โดยมีเงื่อนไขจำกัดเรื่องกำลังการผลิตสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแต่ละตัวสามารถจ่ายได้

2.2 วิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะสม

สำหรับแนวทางในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมสำหรับคำนวณหาขนาดกำลังการผลิต และตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กนี้ แบ่งออกเป็น 2 แนวทางด้วยกัน ได้แก่ แนวทางเชิงกำหนด (Deterministic Approach) และแนวทางเชิงสโตคาสติก (Stochastic Approach)

สำหรับแนวทางทั้ง 2 แนวทางนี้มีแนวคิดในการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน โดยแนวคิดสำหรับแนวทางเชิงกำหนดนั้น ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดคือค่าประมาณที่มีความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ภายในจำนวนรอบการคำนวณที่จำกัด ในขณะที่แนวคิดสำหรับแนวทางเชิงสโตคาสติก คือ เมื่อไม่มีการจำกัดเวลา ความพยายามในการค้นหาคำตอบจะทำให้สามารถเข้าถึงผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้ ซึ่งมองโดยนัยของความน่าจะเป็น (Probabilistic Sense)

แนวทางของการแก้ปัญหาที่เหมาะสมทั้ง 2 แนวทางนี้ต่างมีจุดเด่นและจุดด้อยที่ต่างกัน โดยจุดเด่นของวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมตามแนวทางเชิงกำหนด คือ วิธีการนี้รับประกันในทางทฤษฎีได้ว่า ผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดโดยรวม (Global optimum) เมื่อปัญหานั้นเป็นปัญหาคอนเวกซ์ (Convex Problem) ในขณะที่วิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมตามแนวทางเชิงสโตคาสติกจะรับประกันผลเฉลยได้เพียงแก่ความน่าจะเป็นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม จุดเด่นของวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมตามแนวทางเชิงสโตคาสติก คือ สามารถใช้กับรูปแบบของปัญหาได้หลากหลาย

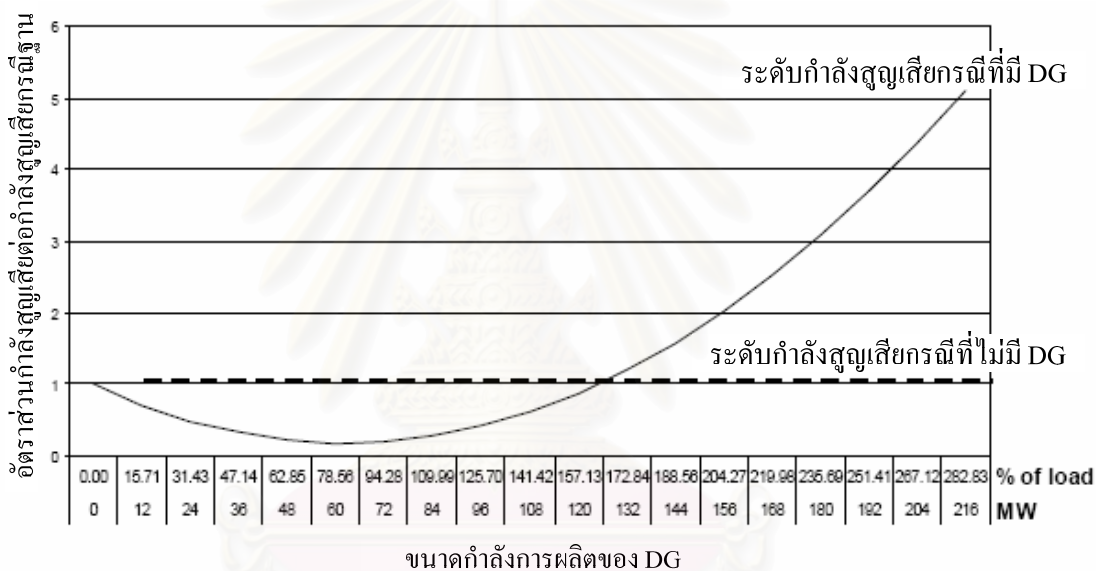
ตัวอย่างของแนวทางสโตคาสติกที่ถูกนำมาใช้ในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งและขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ได้แก่ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) [7]-[9] วิธีการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search Method) [10] เฮียร์ฟอร์ดแรนช์อัลกอริทึม (Hereford Ranch Algorithm) [12] ส่วนตัวอย่างของวิธีแก้ปัญหาคงแนวทางเชิงกำหนด ได้แก่ วิธีบรานช์แอนด์บาวด์ (Branch and Bound) ร่วมกับวิธีกำหนดการเชิงเส้น (Sequential Quadratic Programming) [5] วิธีเจเนรัลไลซ์รีดิวซ์เกรเดียนท์ (Generalized Reduced Gradient Method) [13] เป็นต้น

2.3 ปัจจัยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในการลดกำลังกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย

ในทางทฤษฎี แหล่งผลิตไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับโหลดจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียต่ำกว่าในกรณีที่แหล่งผลิตไฟฟ้าอยู่ห่างไกลจากโหลด เนื่องจากระยะทางในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งสั้นกว่า ดังนั้น เมื่อพิจารณาภาพรวมของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กติดตั้งอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงศูนย์กลางโหลดมากกว่า ย่อมส่งผลดีต่อระบบ กล่าวคือ กำลังสูญเสียโดยรวมทั้งในระบบส่งและระบบจำหน่ายมีปริมาณลดลง อย่างไรก็ตาม ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากการจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้าสู่ระบบจำหน่ายในแต่ละระบบอาจแตกต่างกันไป ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับขนาดและตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เชื่อมโยงเข้ากับระบบจำหน่าย ดังนั้น ก่อนที่จะมีการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้ากับระบบจำหน่ายจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กดังนี้

2.3.1 ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายเพื่อลดกำลังสูญเสียนั้น ควรเหมาะสมกับปริมาณความต้องการไฟฟ้าในบริเวณที่ต้องการเชื่อมต่อ แต่หากกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีค่ามากกว่าความต้องการไฟฟ้าในปริมาณมาก อาจส่งผลให้กำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับเข้ามาในระบบส่ง และทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีปริมาณสูงขึ้นจากเดิม จากผลการศึกษาถึงผลกระทบเนื่องจากขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [2] แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกำลังการผลิตของ DG กับกำลังสูญเสียรวม (เทียบกับกรณีไม่มี DG) ในระบบจำหน่าย [2]

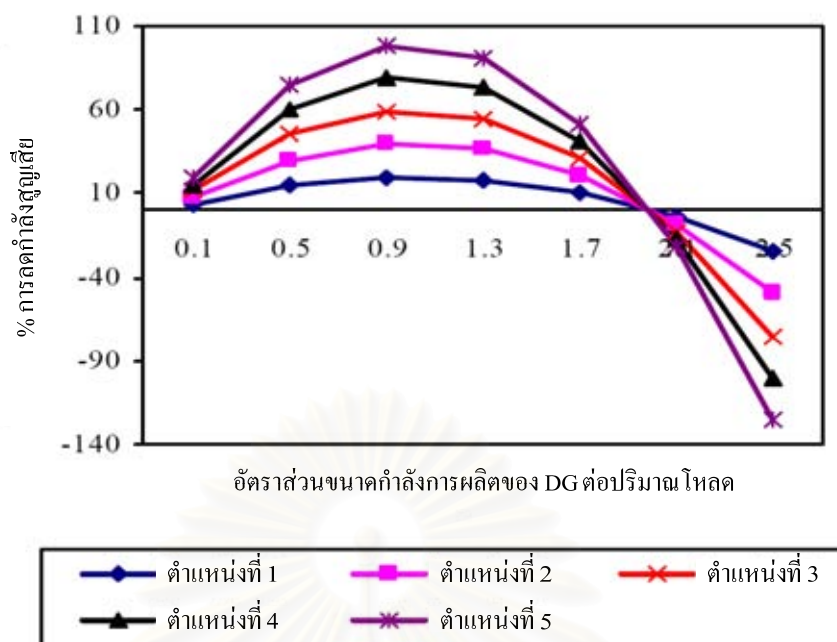
จากกราฟรูปที่ 2.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกับกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย จะเห็นว่าเมื่อขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีค่ามากกว่าขนาดของโหลดในปริมาณมาก จะทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าสูงขึ้นกว่าในกรณีฐาน

จะเห็นว่า ขนาดของความต้องการใช้ไฟฟ้าและขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กนั้น มีความสัมพันธ์กันอย่างมาก กล่าวคือ ในกรณีที่ขนาดโหลดในระบบจำหน่ายมีการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้กำลังสูญเสียของระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้น การวางแผนเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้าระบบจำหน่าย ควรพิจารณาถึงปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าในบริเวณที่ต้องการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วย

2.3.2 ตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

จากที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากขนาดกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลดกำลังสูญเสียแล้ว ยังมีอีกปัจจัยหนึ่ง กล่าวคือ เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าประกอบด้วยจุดโหลดหลายจุดด้วยกัน รวมทั้งความแตกต่างของลักษณะการกระจายตัวของโหลดในแต่ละพื้นที่ ดังนั้น การเลือกตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลในการลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเช่นกัน

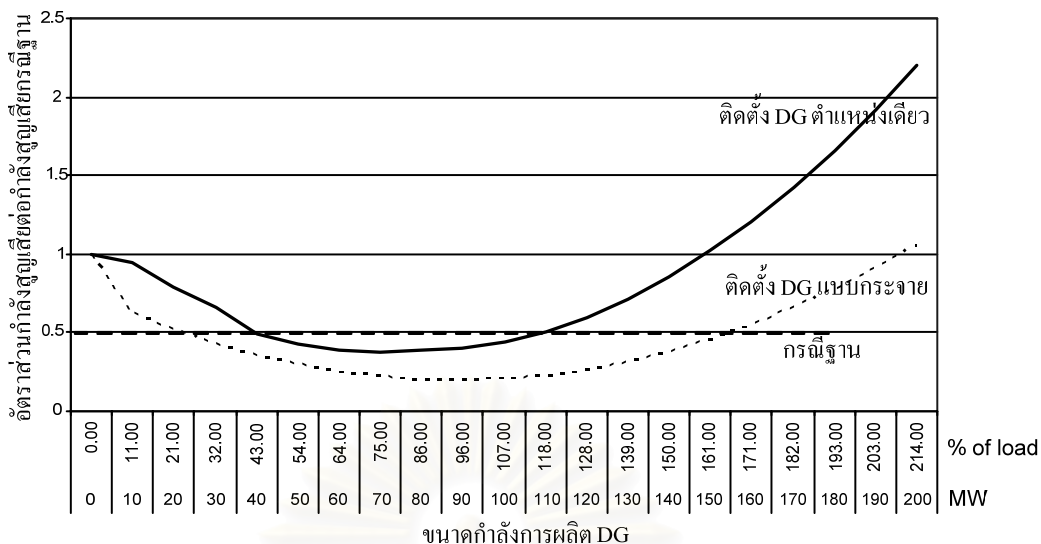
ในการพิจารณาเลือกตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก [2], [14] จะทำโดยการแบ่งพื้นที่ของระบบจำหน่ายตามลักษณะการกระจายตัวของโหลด ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ พื้นที่ที่มีการกระจุกตัวของโหลดอย่างหนาแน่น (ศูนย์กลางโหลด) และพื้นที่ที่มีการกระจายตัวของโหลดอย่างเบาบาง พบว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายจะแปรตามระยะห่างระหว่างตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก กับตำแหน่งของศูนย์กลางโหลด นั่นคือ ยิ่งตำแหน่งการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอยู่ใกล้ศูนย์กลางโหลดมากเท่าไร ยิ่งสามารถลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายได้มากเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกับเปอร์เซ็นต์กำลังสูญเสียที่ลดลง โดยตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 เป็นตำแหน่งการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เริ่มจากตำแหน่งไกลจากศูนย์กลางโหลดมากที่สุดมายังตำแหน่งใกล้ศูนย์กลางโหลดมากที่สุด ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งติดตั้งของ DG กับเปอร์เซ็นต์กำลังสูญเสียที่ลดลง [14]

จากกราฟจะเห็นว่า เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กใกล้กับจุดโหลด (ตำแหน่งที่ 5) จะสามารถลดกำลังสูญเสียในระบบได้มากกว่าติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไกลจากจุดโหลด (ตำแหน่งที่ 1) ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าในกรณีที่ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีขนาดเท่ากัน ตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะเป็นปัจจัยที่กำหนดขนาดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ดี ในทุกตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เมื่อกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีขนาดใหญ่เกินความต้องการไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้การลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีประสิทธิภาพลดลง โดยเฉพาะตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใกล้จุดโหลด (ตำแหน่งที่ 5) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดกลับทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่ามากที่สุด เมื่อกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีขนาดใหญ่เกินไป

นอกจากนี้ จากงานวิจัยในอดีต [2] ยังพบว่าที่ขนาดกำลังการผลิตโดยรวมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เท่ากัน ลักษณะการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแบบกระจายจะช่วยลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายได้ดีกว่าในกรณีติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ตำแหน่งเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทั้งนี้เนื่องมาจากจุดโหลดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าประกอบด้วยหลายจุดด้วยกัน การกระจายติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไปยังจุดโหลดต่างๆ จะช่วยลดการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยรวมในระบบจำหน่ายได้



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบกำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่ายระหว่างการติดตั้ง DG แบบกระจาย และการติดตั้ง DG ตำแหน่งเดียว [2]

การกำหนดขนาดและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมสามารถทำให้ประสิทธิภาพในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นได้อย่างมาก อันจะเป็นประโยชน์ต่อระบบส่งจ่ายพลังงานหลักของประเทศ และช่วยลดภาระค่าไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าลงได้ อีกทั้งยังเป็นการช่วยสนับสนุนโครงการส่งเสริมผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กของรัฐบาล ด้านการทดแทนการลงทุนก่อสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ และการส่งเสริมให้มีการใช้ต้นพลังงานนอกแบบอย่างคุ้มค่า

อย่างไรก็ตาม การกำหนดตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น ในทางปฏิบัติแล้วอาจไม่สามารถกระทำได้โดยอิสระ เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องต้นพลังงานที่ใช้ผลิตไฟฟ้า พื้นที่ตั้ง และความพร้อมของผู้ผลิตไฟฟ้าอาจไม่อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ดังนั้น ปัจจัยที่มีแนวโน้มว่าจะสามารถกำหนดได้คือขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมเป็นหลัก

บทที่ 3

ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อระดับกระแสลัดวงจร และอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อระดับกระแสลัดวงจรและอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่าย โดยอธิบายถึงลำดับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันที่ถูกต้องสำหรับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล จากนั้นจึงแสดงรูปแบบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน พร้อมทั้งเงื่อนไขทางคณิตศาสตร์ที่จำเป็นในการจำกัดผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อระบบป้องกัน โดยเงื่อนไขดังกล่าวจะถูกเพิ่มเข้ามาในการแก้ปัญหาค่ากำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

3.1 ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อระดับกระแสลัดวงจรและอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

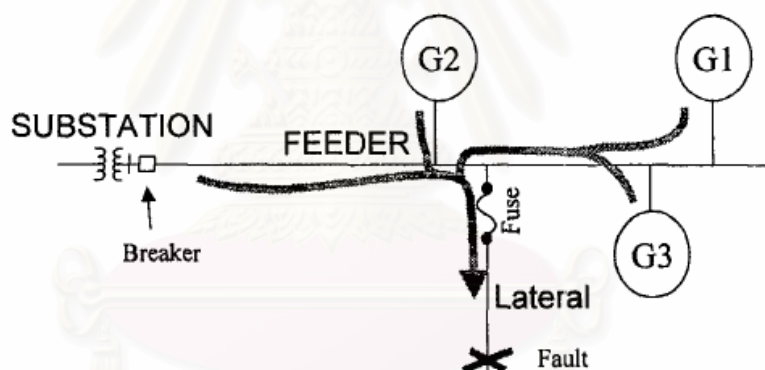
ระบบจำหน่ายไฟฟ้าส่วนใหญ่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเรเดียล ดังนั้น เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ กระแสผิดปกติที่เกิดขึ้นจะไหลจากสถานีไฟฟ้าย่อยมายังตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติขึ้น ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันโดยทั่วไปถูกออกแบบให้ทำงานเมื่อมีกระแสที่สูงเกินปกติ

อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเชื่อมต่ออยู่ การเกิดการลัดวงจรจะก่อให้เกิดกระแสผิดปกติร่วม (Fault Contribution) ที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ส่งผลทำให้ระดับกระแสลัดวงจรของระบบจำหน่ายเปลี่ยนไปจากเดิม โดยขนาดของกระแสผิดปกติร่วมที่เกิดขึ้นนั้นจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย [15] เช่น ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก โหมดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ระยะห่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกับจุดที่เกิดการลัดวงจร เป็นต้น

นอกจากกระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนแปลงไป การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กยังส่งผลต่อทิศทางการไหลของกระแสผิดปกติอีกด้วย [16] จากเดิมที่กระแสผิดปกติจะไหลเพียงทิศทางเดียว คือ จากสถานีไฟฟ้าย่อยมายังตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติเท่านั้น แต่เมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้ากับระบบจำหน่าย จะทำให้ทิศทางการไหลของกระแสผิดปกติมาจากหลายทิศทาง อาจส่งผลให้ระบบป้องกันเดิมทำงานผิดพลาด เนื่องจากระบบป้องกันเดิมนั้นไม่สามารถตรวจวัดทิศทางของกระแสผิดปกติได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าว มาตรฐาน IEEE 1547 จึงได้กำหนดว่า เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีปัญหา จำเป็นต้องปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กออก โดยทันที เพื่อไม่ให้มีกระแสผิดปกติที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่าย แต่อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติอาจไม่สามารถปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้ทันเวลา ทำให้เกิดกระแสผิดปกติไหลมายังจุดที่เกิดความผิดปกติ ซึ่งส่งผลให้ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันผิดพลาดได้

นอกจากนี้ หากพิจารณากระแสผิดปกติที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพียงตัวเดียวอาจมีค่าไม่สูงมากนัก แต่หากพิจารณากระแสผิดปกติที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลายๆ ตัวรวมกันอาจมีค่ามากจนทำให้ระดับกระแสลัดวงจรเปลี่ยนแปลงไป [15] ส่งผลให้เกิดการประสานงานระหว่างฟิวส์และเบรกเกอร์ผิดพลาดได้ ยกตัวอย่างเช่นในรูปที่ 3.1 ถ้าเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้ามาในระบบ กระแสผิดปกติอาจมีค่ามากพอที่จะทำให้ฟิวส์ที่สายป้อนย่อยและเบรกเกอร์ที่สายป้อนหลักประสานงานผิดพลาดได้ เนื่องจากกระแสไหลมาจากหลายทิศทางในระหว่างที่เกิดความผิดปกติในระบบจำหน่าย



รูปที่ 3.1 การเพิ่มระดับกระแสลัดวงจรเนื่องจากกระแสผิดปกติจาก DG ยูนิตที่ 1 2 และ 3 ทำให้การประสานงานระหว่างฟิวส์และเบรกเกอร์ผิดพลาด [15]

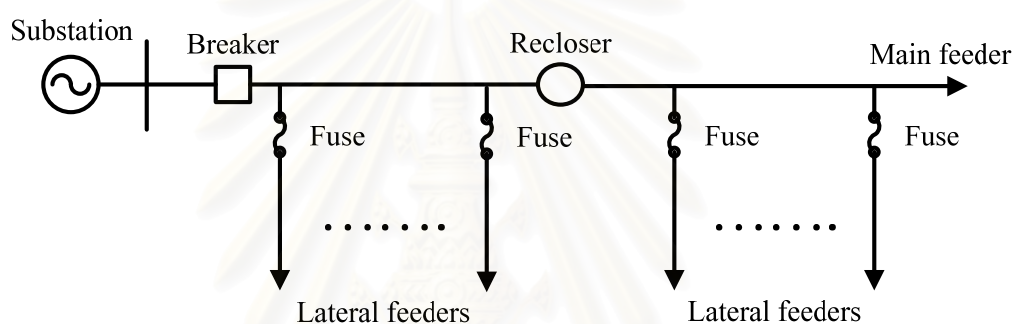
วิธีการแก้ปัญหาในกรณีนี้ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเชื่อมต่ออยู่ โดยใช้โปรแกรมจำลองเหตุการณ์เพื่อศึกษาการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน ซึ่งหากพบปัญหาที่เกิดจากการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันก็อาจจะต้องมีการเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันใหม่ หรือปรับตั้งค่าของอุปกรณ์ป้องกันในส่วนใหม่

อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยน หรือการปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันใหม่ในทางปฏิบัติอาจเป็นไปได้ยาก หรือต้องใช้เงินลงทุนสูง ซึ่งไม่คุ้มกับมูลค่าเพิ่มที่ได้จากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด

เล็ก ดังนั้น ในงานวิจัย [17] ได้นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการแก้ปัญหาอีกทางหนึ่งนั่นคือ การจำกัดกระแส ผิดพร้อมสมทบ ซึ่งจะช่วยให้ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาดน้อยลง

3.2 ลำดับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน (Protection Co-ordination)

โครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่นำมาพิจารณา คือ โครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบจำหน่าย เนื่องจากใช้เงินลงทุนต่ำ และง่ายต่อการปฏิบัติงานระบบ สำหรับอุปกรณ์ป้องกันที่พิจารณา ประกอบด้วย เบรกเกอร์ รีโคลสเซอร์ และฟิวส์ ที่สายป้อนย่อย ดังแสดงในรูปที่ 3.2



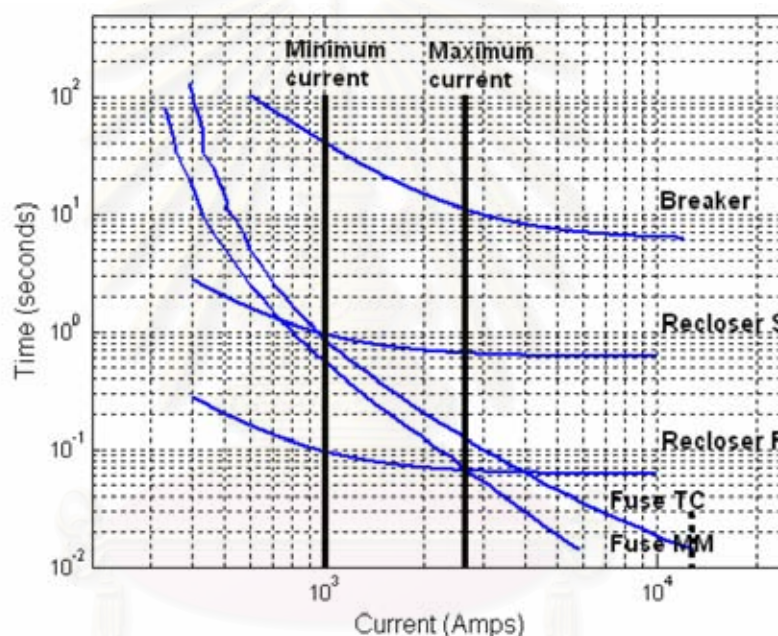
รูปที่ 3.2 ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

ระบบป้องกัน ตามรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยโดยเบรกเกอร์ที่ต้นทางใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่ป้องกันสายป้อนหลักในส่วนต้นทางและทำหน้าที่สำรองป้องกันสายป้อนหลักและสายป้อนย่อยในกรณีที่รีโคลสเซอร์และฟิวส์ไม่ทำงาน รีโคลสเซอร์ติดตั้งอยู่ตรงกลางทางของสายส่งหลัก ทำหน้าที่ตรวจจับและแยกความผิดปกติแบบชั่วคราวและถาวรและทำหน้าที่สำรองป้องกันสายป้อนย่อยในกรณีที่ฟิวส์ไม่ทำงาน และฟิวส์ติดตั้งที่สายป้อนย่อยทำหน้าที่ป้องกันโหลดในกิ่งย่อยของระบบ

การจัดลำดับการทำงาน of อุปกรณ์ป้องกันนั้น ใช้การจัดความสัมพันธ์โดยพิจารณาทั้งกระแสผิดพลาดและเวลาตามคุณลักษณะของกระแสเกินผกผันกับเวลา (Inverse Time Overcurrent Characteristic) คือ กระแสผิดพลาดยิ่งมาก เวลาในการทำงานของอุปกรณ์ยิ่งสั้น การออกแบบระบบป้องกัน โดยใช้คุณลักษณะของกระแสเกินผกผันกับเวลาช่วยให้ระบบป้องกันมีความยืดหยุ่นมากขึ้น

กรณีก่อนติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก อุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิดมีลำดับการทำงานร่วมกัน ดังนี้ คือ ระบบเริ่มขั้นตอนการป้องกันที่รีโคลสเซอร์ซึ่งจะทำงาน 2 จังหวะ คือ จังหวะแรกเป็นช่วง

การทำงานแบบเร็ว (Recloser Fast) และจังหวะที่สองเป็นช่วงการทำงานแบบช้า (Recloser Slow) เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ รีโคลสเซอร์จะทำการตัดวงจรครั้งแรกโดยใช้เวลาในช่วงการทำงานแบบเร็ว เพื่อตรวจสอบว่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั่วคราวหรือถาวร ถ้าความผิดปกติที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั่วคราว ระบบจะกลับคืนสู่สภาวะปกติโดยไม่มีการตัดวงจร แต่ถ้าความพร่องนั้นยังคงอยู่ หรือเป็นความผิดปกติแบบถาวร ฟิวส์ที่สายป้อนย่อยจะทำงานตัดความผิดปกติ นั้น แต่หากฟิวส์ไม่สามารถตัดความผิดปกติดังกล่าวได้ รีโคลสเซอร์จังหวะที่สองจะทำหน้าที่ตัดวงจรออก ส่วนเบรกเกอร์จะทำงานเป็นลำดับสุดท้ายในกรณีที่ฟิวส์และรีโคลสเซอร์ไม่สามารถกำจัดความผิดปกติได้ ดังแสดงในกราฟคุณสมบัติการทำงานร่วมกันระหว่างเบรกเกอร์ รีโคลสเซอร์และฟิวส์เป็นดังรูปที่ 3.3



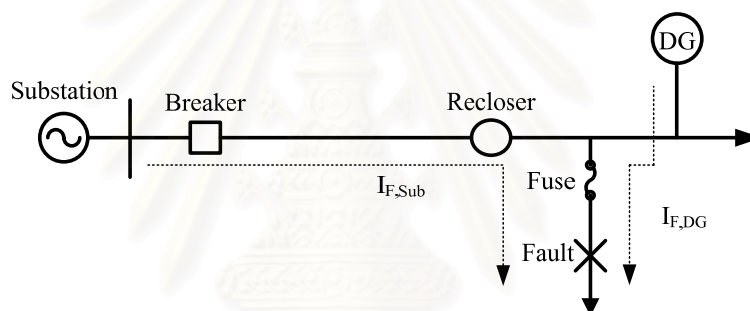
รูปที่ 3.3 กราฟคุณสมบัติการทำงานร่วมกันระหว่างเบรกเกอร์ รีโคลสเซอร์และฟิวส์ [17]

จากกราฟคุณสมบัติการทำงานร่วมกันระหว่างเบรกเกอร์ รีโคลสเซอร์และฟิวส์ จะสังเกตเห็นว่าลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันทั้ง 3 จะทำงานได้ถูกต้องในช่วงกระแสผิดปกติ ค่าหนึ่งเท่านั้น คือ กระแสต่ำสุด (Minimum Current) และกระแสสูงสุด (Maximum Current) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ในกรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกับระบบจำหน่ายอาจทำให้กระแสผิดปกติที่เกิดขึ้นมีค่ามากเกินช่วงกระแสผิดปกติดังกล่าว ดังนั้น เพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันมีลำดับการทำงานที่ถูกต้อง ควรพิจารณาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสม และไม่ทำให้กระแสผิดปกติเกินช่วงการทำงาน

3.3 รูปแบบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่อาจมีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน [18]-[20]

ผลกระทบของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่ออุปกรณ์ป้องกันมีอยู่ด้วยกันหลายประการ ขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่สัมพันธ์กับตำแหน่งการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และตำแหน่งการเกิดความผิดปกติเป็นผลให้อุปกรณ์ป้องกันแต่ละตัวตรวจจับขนาดกระแสผิดปกติในปริมาณที่ต่างกัน ทั้งนี้ รูปแบบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันสามารถสรุปได้ 5 รูปแบบ ดังนี้

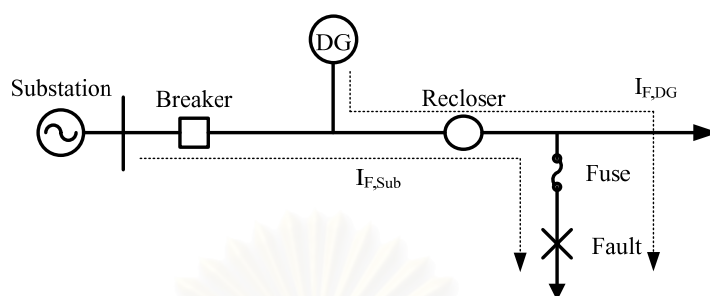
- 1) รูปแบบที่ 1 คือ ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทางด้านหลังรีโกลสเซอร์และเกิดความผิดปกติที่โหลดปลายสายป้อนหลังฟิวส์



รูปที่ 3.4 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ปลายทางหลังรีโกลสเซอร์ และเกิดความผิดปกติที่โหลดปลายสายป้อนหลังฟิวส์

จากรูปที่ 3.4 ระบบมีการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไว้ที่ปลายทางหลังรีโกลสเซอร์ และเกิดความผิดปกติที่โหลดปลายทางทำให้ กรณีเช่นนี้รีโกลสเซอร์และฟิวส์จะตรวจจับขนาดของกระแสผิดปกติได้คนละค่า โดยที่ฟิวส์จะตรวจจับขนาดกระแสได้มากกว่ารีโกลสเซอร์ คือ กระแสผิดปกติรวมที่ไหลมาจากสถานีไฟฟ้าย่อย และจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทำให้มีโอกาสที่ฟิวส์จะทำงานก่อนรีโกลสเซอร์ในจังหวะแรก ความผิดพลาดของลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวจะมีผลในกรณีที่ความผิดปกติที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั่วคราว ทำให้โหลดบริเวณนั้นถูกตัดออกจากระบบ

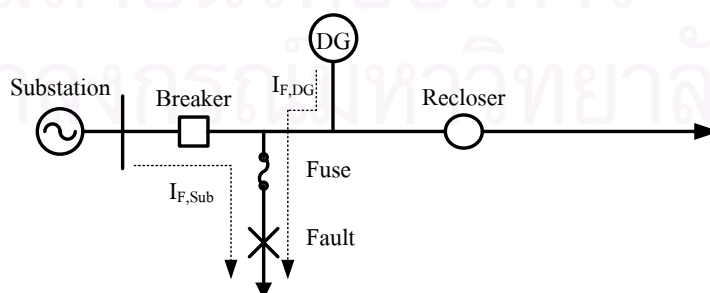
- 2) รูปแบบที่ 2 คือ ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอยู่ที่ต้นทางหน้ารีโคลสเซอร์และเกิดความผิดพลาดที่โหลดปลายสายป้อนหลังฟิวส์



รูปที่ 3.5 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต้นทางหน้ารีโคลสเซอร์และเกิดความผิดพลาดที่โหลดปลายสายป้อนหลังฟิวส์

จากรูปที่ 3.5 ระบบมีการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไว้ที่ต้นทางก่อนถึงรีโคลสเซอร์ ในกรณีเกิดความผิดพลาดที่โหลดปลายทาง ขนาดกระแสที่ไหลผ่านรีโคลสเซอร์และฟิวส์เป็นค่าเดียวกัน แต่มีขนาดที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบ ซึ่งทำให้อุปกรณ์ป้องกันทั้งคู่มีความไวมากขึ้น แต่อย่างไรก็ดี อาจทำให้ช่วงเวลาในการทำงานร่วมกัน (Coordination Time interval : CTI) ระหว่างรีโคลสเซอร์และฟิวส์นี้แคบลง หากผลดังกล่าวรุนแรงก็อาจเกิดกรณีที่ฟิวส์ทำหน้าที่กำจัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อนที่รีโคลสเซอร์จะทำงานในจังหวะแรก ซึ่งถือว่าเป็นลำดับการทำงานที่ผิดพลาด

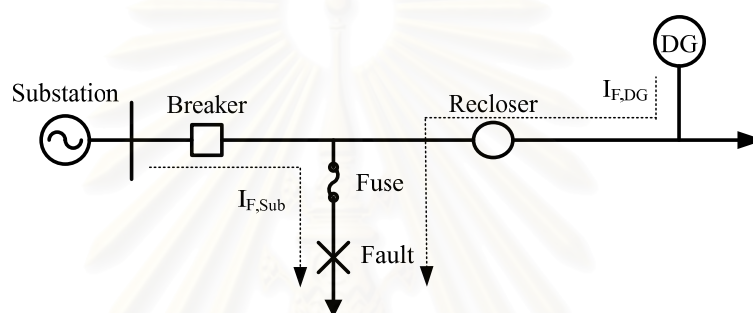
- 3) รูปแบบที่ 3 คือ ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต้นทางหน้ารีโคลสเซอร์และเกิดความผิดพลาดที่โหลดต้นสายป้อนหลังฟิวส์



รูปที่ 3.6 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต้นทางหน้ารีโคลสเซอร์และเกิดความผิดพลาดที่โหลดต้นสายป้อนหลังฟิวส์

จากรูปที่ 3.6 ระบบมีการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไว้ที่ต้นทางหน้ารีโกลสเซอร์และเกิดความผิดปกติที่โหลดต้นสายป้อนหลังฟิวส์ กรณีเช่นนี้จะไม่มีกระแสผิดปกติผ่านรีโกลสเซอร์ อุปกรณ์ป้องกันสามารถทำงานได้ถูกต้อง เพียงแต่กระแสผิดปกติที่โหลดผ่านฟิวส์จะมีขนาดมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มี การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบอย่างไรก็ดี กระแสผิดปกติที่โหลดผ่านฟิวส์จะต้องมีค่าไม่เกินค่าพิคคของฟิวส์

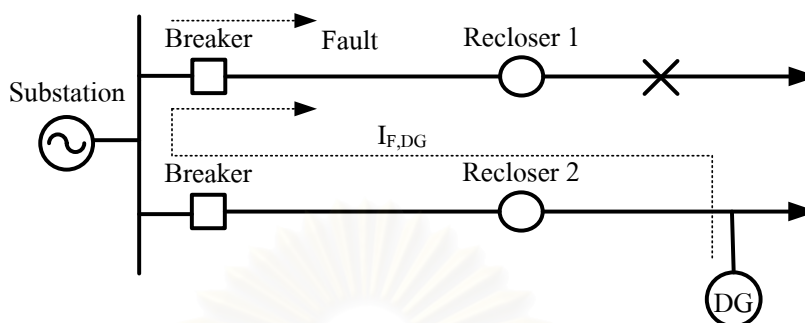
- 4) รูปแบบที่ 4 คือ ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอยู่หลังเบรกเกอร์และเกิดความผิดปกติที่โหลดต้นสายป้อนหลังฟิวส์



รูปที่ 3.7 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ปลายทางหลังรีโกลสเซอร์และเกิดความผิดปกติที่โหลดต้นสายป้อนหลังฟิวส์

จากรูปที่ 3.7 ระบบมีการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไว้ที่ปลายทางหลังรีโกลสเซอร์และเกิดความผิดปกติที่บริเวณต้นทาง กรณีเช่นนี้จะทำให้กระแสผิดปกติจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไหลย้อนผ่านรีโกลสเซอร์ไปยังจุดที่เกิดการผิดปกติ ซึ่งหากกระแสผิดปกตินี้มีค่ามากพอที่จะทำให้รีโกลสเซอร์ทำงาน เป็นผลให้โหลดบริเวณที่อยู่หลังรีโกลสเซอร์ถูกตัดออกจากระบบและเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในบริเวณที่ไม่เหมาะสม ในกรณีนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำเป็นต้องถูกปลดออกจากระบบตามมาตรฐาน IEEE 1547 เพื่อให้รีโกลสเซอร์สามารถปิดวงจรและจ่ายโหลดได้เหมือนเดิม มิฉะนั้นอาจเกิดปัญหาาระบบทำงานไม่ตรงจังหวะกันได้ หากไม่ต้องการให้เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นในกรณีนี้อาจจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนรีโกลสเซอร์ให้สามารถตรวจวัดทิศทางของกระแสผิดปกติได้

- 5) รูปแบบที่ 5 คือ การเกิดความผิดพลาดที่สายป้อนคนละเส้นกับสายป้อนที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก



รูปที่ 3.8 การเกิดความผิดพลาดที่สายส่งคนละเส้นกับสายส่งที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

จากรูปที่ 3.8 ระบบมีการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไว้ที่สายส่งด้านล่าง และเกิดความผิดพลาดที่สายส่งด้านบน การเกิดความผิดพลาดที่สายส่งคนละเส้นเช่นนี้จะทำให้มีกระแสไหลย้อนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กผ่านอุปกรณ์ป้องกันในสายส่งด้านล่างมายังจุดที่เกิดความผิดพลาด ถ้าขนาดของกระแสผิดพลาดที่ไหลย้อนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กนี้มีค่ามากพอ อุปกรณ์ป้องกันในสายส่งด้านล่างจะทำงาน ทำให้โหลดที่ต่ออยู่ในสายส่งด้านล่างถูกตัดวงจร ซึ่งเป็นการทำงานที่ผิดพลาด ส่งผลให้โหลดปริมาณมากถูกตัดออกจากระบบอย่างไม่จำเป็น ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ได้โดยการเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันให้สามารถตรวจวัดทิศทางของกระแสผิดพลาดได้ หรือมิฉะนั้นจะต้องตั้งค่าการทำงานของรีโคลสเซอร์ในสายบน (Recloser 1) ให้สามารถกำจัดความผิดพลาดได้ก่อนที่รีโคลสเซอร์ในสายล่าง (Recloser 2) จะทำงาน

รูปแบบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 5 รูปแบบนี้ จะถูกนำไปใช้พิจารณาเพื่อหาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม ด้วยวิธีการจำกัดกระแสผิดพลาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ยังคงทำให้ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่พิจารณาทำงานได้อย่างถูกต้อง โดยไม่จำเป็นต้องตั้งค่าการทำงาน หรือเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันใหม่

3.4 การกำหนดเงื่อนไขจำกัดทางคณิตศาสตร์เพื่อป้องกันผลกระทบของขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อการทำงานร่วมกันของระบบป้องกัน

การกำหนดหาขอบเขตของกระแสผิดพลาดสมทบจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ยังคงทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานได้ถูกต้องนั้น จะทำการพิจารณาตามการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กรูปแบบที่ 1-5 ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.1 โดยที่ I_{CB} , $I_{recloser}$ และ I_{fuse} คือ กระแสผิดพลาด

ที่เบรกเกอร์ รีโคสเซอร์ และฟิวส์ตรวจจับได้ ตามลำดับ ส่วน $I_{F,S}$ และ $I_{F,DG}$ คือ กระแสผิดพลาดที่ไหลมาจากสถานีไฟฟ้าย่อย และกระแสผิดพลาดที่ไหลมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 รูปแบบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และตำแหน่งความผิดพลาด พร้อมรายละเอียดของกระแสที่อุปกรณ์ป้องกันตรวจจับได้ทั้ง 5 กรณี

รูปแบบ	ตำแหน่ง DG	ตำแหน่งความผิดพลาด	กระแสผิดพลาด
1	หลังรีโคสเซอร์	หลังรีโคสเซอร์	$I_{\text{recloser}} = I_{F,S}$ และ $I_{\text{fuse}} = I_{F,S} + I_{F,DG}$
2	หน้ารีโคสเซอร์	หลังรีโคสเซอร์	$I_{\text{recloser}} = I_{\text{fuse}} = I_{F,S} + I_{F,DG}$
3	หน้ารีโคสเซอร์	หน้ารีโคสเซอร์	$I_{\text{recloser}} = 0$ และ $I_{\text{fuse}} = I_{F,S} + I_{F,DG}$
4	หลังรีโคสเซอร์	หน้ารีโคสเซอร์	$I_{\text{recloser}} = I_{F,DG}$ และ $I_{\text{fuse}} = I_{F,S} + I_{F,DG}$
5	สายส่งด้านล่าง	สายส่งด้านบน	$I_{\text{CB, ล่าง}} = I_{\text{recloser, ล่าง}} = I_{F,DG}$ และ $I_{\text{CB, บน}} = I_{F,S} + I_{F,DG}$

รูปแบบที่ 1 จะเห็นว่า กระแสผิดพลาดที่รีโคสเซอร์ตรวจจับได้มีปริมาณเท่ากับกระแสผิดพลาดที่ไหลมาจากสถานีไฟฟ้าย่อยเท่านั้น ในขณะที่กระแสผิดพลาดที่ฟิวส์ตรวจจับได้จะเป็นกระแสผิดพลาดที่มาจากสถานีไฟฟ้าย่อยร่วมกับกระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่หลังรีโคสเซอร์ ซึ่งอาจเกิดปัญหาฟิวส์ทำงานก่อนรีโคสเซอร์ ดังนั้นจึงต้องจำกัดกระแสผิดพลาดที่ฟิวส์ตรวจจับได้ไม่ให้เกินช่วงการทำงานที่ถูกต้องของอุปกรณ์ป้องกัน

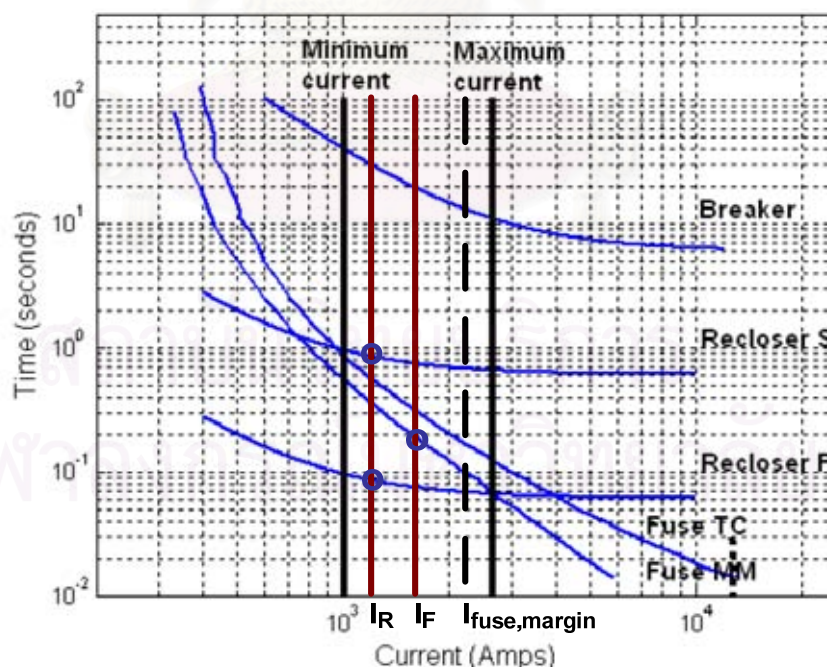
รูปแบบที่ 2 กระแสผิดพลาดที่รีโคสเซอร์ และฟิวส์ตรวจจับได้มีค่าเท่ากัน จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาฟิวส์ทำงานก่อนรีโคสเซอร์ แต่อย่างไรก็ตาม กระแสผิดพลาดสมทบที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กนั้น อาจทำให้กระแสผิดพลาดเกินช่วงการทำงานที่ถูกต้องของอุปกรณ์ป้องกันได้

รูปแบบที่ 3 ไม่ก่อให้เกิดปัญหาฟิวส์ทำงานก่อนรีโคสเซอร์แต่อย่างใด เนื่องจากกระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะไหลผ่านฟิวส์เท่านั้น ไม่ผ่านรีโคสเซอร์ อย่างไรก็ตาม กระแสผิดพลาดที่ฟิวส์ตรวจจับได้อาจมีขนาดเกินค่าพิคคของฟิวส์ได้

รูปแบบที่ 4 จะมีกระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไหลย้อนผ่านรีโคสเซอร์ เป็นผลให้รีโคสเซอร์ตัดโหลดออกโดยไม่จำเป็น โดยรูปแบบนี้สามารถใช้วิธีจำกัดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กให้มีปริมาณอยู่นอกช่วงการทำงานที่ถูกต้องของอุปกรณ์ป้องกัน หรือใช้กราฟคุณลักษณะการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อตรวจสอบว่าเวลาในการตัดวงจรของฟิวส์ในกรณีนี้จะต้องทำงานเร็วกว่ารีโคสเซอร์

รูปแบบที่ 5 การเกิดความผิดพลาดที่สายส่งคนละเส้นเช่นนี้จะทำให้มีกระแสไหลย้อนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กผ่านอุปกรณ์ป้องกันในสายส่งด้านล่างมายังจุดที่เกิดความผิดพลาดในสายส่งเส้นบน อาจเป็นผลให้อุปกรณ์ป้องกันในสายส่งด้านล่างทำงานโดยไม่จำเป็น ทั้งนี้ เนื่องจากรีโคลสเซอร์ในสายส่งที่เกิดความผิดพลาด (สายส่งเส้นบน) จะสามารถกำจัดความผิดพลาดได้นั้น ต้องรอถึงจังหวะการทำงานซ้ำ (Recloser S) ทำให้การแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำได้โดยใช้กราฟคุณลักษณะการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อตรวจสอบเวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์ในสายส่งที่เกิดความผิดพลาด (สายส่งเส้นบน) ต้องเร็วกว่าเวลาการทำงานของเบรกเกอร์ และรีโคลสเซอร์ในสายส่งเส้นล่างทำงาน

จากการวิเคราะห์รูปแบบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทั้ง 5 รูปแบบ พบว่ากระแสผิดพลาดใหม่ที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กของรูปแบบที่ 1 - 3 ต้องอยู่ในขอบเขตของกระแสผิดพลาดต่ำที่สุด (Minimum current) และกระแสผิดพลาดมากที่สุด (Maximum current) ดังรูปที่ 3.9 เพื่อให้ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเป็นไปอย่างถูกต้อง ส่วน การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กของรูปแบบที่ 4 และ 5 นั้น ต้องใช้กราฟคุณลักษณะการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อตรวจสอบเวลาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันว่าเป็นไปตามที่นำเสนอไว้ข้างต้นหรือไม่



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างจุดทำงานร่วมกันระหว่างรีโคลสเซอร์และฟิวส์ของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก [17]

การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กของรูปแบบที่ 1 – 3 สามารถพิจารณาจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในรูปแบบที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีที่มีปัญหามากที่สุดใน 3 รูปแบบ เนื่องจากกระแสผิดพลาดที่ไหลผ่านฟิวส์มีค่ามากกว่ากระแสผิดพลาดที่ไหลผ่านรีโคลสเซอร์ ($I_{recloser} = I_{F,S}$ และ $I_{fuse} = I_{F,S} + I_{F,DG}$) อาจทำให้เกิดปัญหาฟิวส์ทำงานก่อนรีโคลสเซอร์ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงใช้วิธีจำกัดกระแสผิดพลาดที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไม่ให้มีขนาดเกินช่วงที่อุปกรณ์ป้องกันยังสามารถทำงานได้ตามลำดับที่ถูกต้อง

จากรูปที่ 3.9 เมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบ กระแสผิดพลาดที่มาจากสถานไฟฟ้าย่อยรวมกับกระแสผิดพลาดที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต้องมีค่าน้อยกว่ากระแสผิดพลาดที่ฟิวส์สามารถรองรับได้ และมีค่าช่วงเพื่อที่เหมาะสม แทนด้วยสัญลักษณ์ $I_{fuse,margin}$ จากข้อความดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$I_{fuse,margin} = I_{F,S} + I_{F,DG}^{max} \quad (3.1)$$

$$I_{F,DG}^{max} = I_{fuse,margin} - I_{F,S} \quad (3.2)$$

เนื่องจาก $I_{F,DG}^{max}$ เป็นกระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีค่ามากที่สุด ดังนั้น เพื่อจำกัดกระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก จะใช้เงื่อนไข

$$I_{F,DG} < I_{F,DG}^{max} \quad (3.3)$$

แทนสมการที่ (3.2) ลงในสมการที่ (3.3) ได้ว่า

$$I_{F,DG} < I_{fuse,margin} - I_{F,S} \quad (3.4)$$

และเพื่อให้ฟิวส์ที่สายป้อนย่อยหลังรีโคลสเซอร์ทุกตัวทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวในทุกๆ ตำแหน่งของการเกิดความผิดพลาดหลังรีโคลสเซอร์ จะต้องทดสอบการเกิดความผิดพลาดในทุกสายป้อนย่อยที่อยู่หลังรีโคลสเซอร์แล้ว ดังสมการที่ (3.5)

$$I_{F,DG}^i < I_{fuse,margin} - I_{F,S}^i, \quad \text{ทุกตำแหน่ง } i \text{ หลังรีโคลสเซอร์} \quad (3.5)$$

เงื่อนไขดังสมการที่ (3.5) สามารถนำมาใช้กับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในรูปแบบที่ 2 และ 3 เพื่อจำกัดกระแสผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้เช่นกัน โดยพิจารณาในกรณีที่ความผิดพลาดเกิดขึ้นที่สายป้อนย่อยที่อยู่หน้ารีโกลสเซอร์ด้วย ทั้งนี้ โดยมีสมมุติฐานว่า $I_{fuse,margin}$ มีค่าไม่ต่างจาก I_{max} มากนัก

สำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กตามรูปแบบที่ 4 และ 5 นั้น ต้องใช้กราฟคุณลักษณะการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อตรวจสอบเวลาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

เงื่อนไขสำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กของรูปแบบที่ 4 เพื่อแก้ไขปัญหารีโกลสเซอร์ทำงานโดยไม่จำเป็น เนื่องจากอาจมีกระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไหลย้อนผ่านรีโกลสเซอร์ จึงต้องกำหนดให้เวลาการทำงานของรีโกลสเซอร์นั้นช้ากว่าเวลาการทำงานของฟิวส์ ดังสมการที่ (3.6)

$$T_{Fuse}(I_{fuse}^i) < T_{Recloser-F}(I_{Recloser-}^i), \text{ ทุกตำแหน่ง } i \text{ หน้ารีโกลสเซอร์} \quad (3.6)$$

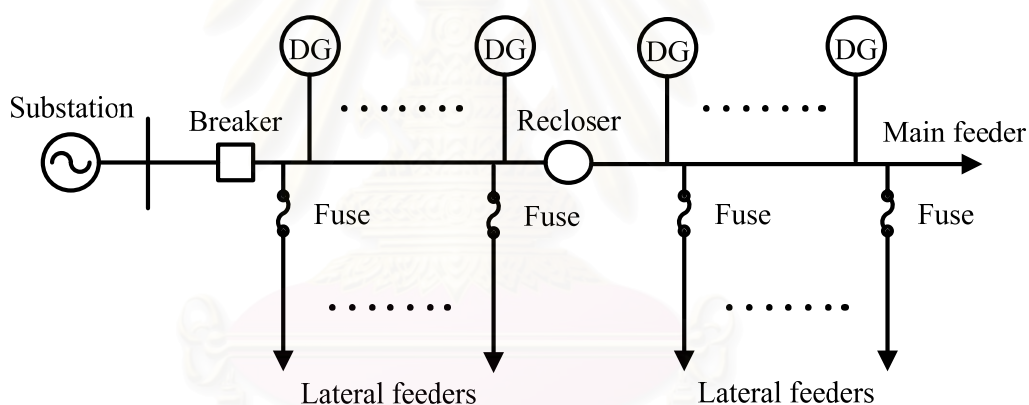
โดย I_{fuse}^i คือ กระแสผิดพลาดผ่านฟิวส์เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สายป้อน i
 $I_{Recloser-}^i$ คือ กระแสผิดพลาดไหลย้อนผ่านรีโกลสเซอร์เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สายป้อน i
 T_{Fuse} คือ เวลาการทำงานของฟิวส์โดยใช้กราฟคุณลักษณะของฟิวส์ TC
 $T_{Recloser-F}$ คือ เวลาการทำงานของรีโกลสเซอร์โดยใช้กราฟคุณลักษณะของรีโกลสเซอร์จังหวะเร็ว

เงื่อนไขสำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กตามรูปแบบที่ 5 เพื่อแก้ไขปัญหารีโกลสเซอร์ในสายป้อนที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทำงานโดยไม่จำเป็น เนื่องจากอาจมีกระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไหลย้อนผ่านรีโกลสเซอร์ จึงต้องกำหนดให้เวลาการทำงานของรีโกลสเซอร์ในสายป้อนที่เกิดความผิดพลาดทำงานเร็วกว่าเวลาการทำงานของรีโกลสเซอร์ในสายป้อนที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ดังสมการที่ (3.7)

$$T_{\text{Recloser } S}(I_{\text{Recloser}+}^i) < T_{\text{Recloser } F}(I_{\text{Recloser}-}^i), \text{ ทุกตำแหน่ง } i \text{ ในสายป้อน (3.7)}$$

- โดย $I_{\text{Recloser}+}^i$ คือ กระแสผิดพลาดผ่านรีโคลสเซอร์เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สายป้อน i
 $I_{\text{Recloser}-}^i$ คือ กระแสผิดพลาดไหลย้อนผ่านรีโคลสเซอร์เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สายป้อน i
 $T_{\text{Recloser } S}$ คือ เวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์โดยใช้กราฟคุณลักษณะของรีโคลสเซอร์จังหวะช้า
 $T_{\text{Recloser } F}$ คือ เวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์โดยใช้กราฟคุณลักษณะของรีโคลสเซอร์จังหวะเร็ว

จากนั้น หากขยายการพิจารณาในกรณีที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากกว่า 1 เครื่องในระบบจำหน่าย ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล กรณีมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลายเครื่อง

เงื่อนไขการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กตามรูปแบบที่ 1 – 3 สามารถดัดแปลงโดยคิดผลรวมของกระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทุกเครื่องในระบบ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.8)

$$\sum_{m=1}^{nDG} I_{F,DG_m}^i < I_{fuse,margin} - I_{F,s}^i, \quad \text{ทุกตำแหน่ง } i \text{ ในสายป้อน} \quad (3.8)$$

โดย I_{F,DG_m}^i คือ กระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กตัวที่ m เมื่อเกิดความผิดพลาด ณ ตำแหน่ง i

nDG คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่กำหนดติดตั้งในระบบ

ในขณะที่เงื่อนไขการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กตามรูปแบบที่ 4 และ 5 สามารถใช้สมการที่ (3.6) และ (3.7) ได้ตามลำดับ โดยในกรณีคิดผลรวมของกระแสผิดพลาดจากทุกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งในระบบ

เงื่อนไขการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันตามสมการที่ (3.6)-(3.8) จะถูกนำไปใช้เป็นเงื่อนไขจำกัดเพื่อแก้ปัญหาการลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การแก้ปัญหาค่าเหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms)

ในบทนี้จะกล่าวถึงการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดของกระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาประยุกต์ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม

4.1 พื้นฐานขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้ากำลังนั้น จัดเป็นปัญหาหนึ่งที่ทำผลเฉลยได้ลำบาก เนื่องจากลักษณะของปัญหามีความซับซ้อน ไม่เป็นเชิงเส้น และไม่คอนเวกซ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกวิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่มีประสิทธิภาพ เพื่อเอื้ออำนวยต่อการสร้างรูปแบบของปัญหา และขั้นตอนการหาผลเฉลย

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นหนึ่งในวิธีการหาค่าเหมาะสมตามแนวทางเชิงสโตคาสติกที่ได้รับความนิยม เนื่องจากวิธีการนี้สามารถแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่ฟังก์ชันจุดประสงค์มีความไม่ต่อเนื่อง หรือไม่สามารถหาอนุพันธ์ได้ [21] สำหรับหลักการของวิธีนี้จะอาศัยการเลียนแบบหลักการถ่ายทอดพันธุกรรมทางธรรมชาติ (Natural Genetics) ก็คือ ยีน (Gene) ที่เหมาะสมจากรุ่นพ่อแม่จะถูกถ่ายทอดไปยังรุ่นลูก เพื่อที่จะให้รุ่นลูกมีการพัฒนาที่ดียิ่งขึ้น และสามารถอยู่รอดต่อไปได้ หลักการดังกล่าวได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อค้นหาผลเฉลยในขอบเขตที่ผลเฉลยนั้นมีโอกาสเกิดขึ้นได้ โดยการจำลองที่เลียนแบบวิวัฒนาการ จะทำให้ได้ผลเฉลยที่มีแนวโน้มที่ดียิ่งขึ้น

สำหรับขั้นตอนในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม จะเริ่มจากการสมมติผลเฉลยขึ้นมาหลายๆ ผลเฉลย (Population of solution) ก่อน จากนั้นจึงค้นหาว่าผลเฉลยที่ถูกสมมติขึ้นมา นั้น ผลเฉลยใดมีโอกาสอยู่รอดมากที่สุด (Survival of the fittest) โดยจะใช้วิธีการประเมินผ่านฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function) สำหรับผลเฉลยที่มีค่าความเหมาะสมมาก ก็มีโอกาอยู่รอดมาก และอาจมีโอกาได้รับเลือกเพื่อพัฒนาเป็นผลเฉลยใหม่ๆ ในรุ่นของการถ่ายทอด (Generation) ต่อไป โดยผลเฉลยใหม่ที่เกิดขึ้นเกิดจากการประยุกต์ใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์ คือ การครอสโอเวอร์ (Crossover) และการมิวเทชัน (Mutation) ทั้งนี้ ผลเฉลยที่ต้องการหาจะต้องถูกแสดงให้อยู่ในรูปของโครโมโซม (Chromosome)

จากหลักการข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การหาค่าเหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น จะแตกต่างจากวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีอื่น ดังนี้

- 1) ใช้การสุ่มผลเฉลยชุดหนึ่งขึ้นมาก่อน จากนั้นจึงทำการประเมินค่าความเหมาะสม ดังนั้น วิธีนี้จึงสะดวกในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับตัวแปรชนิดใดก็ได้ ไม่จำเป็นต้องเป็นตัวแปรต่อเนื่อง
- 2) เป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมที่หาจากจุดเริ่มต้นหลายๆ จุด ซึ่งเป็นการหาจุดเหมาะสมที่สุดโดยรวมที่ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมแบบขนาน ทำให้ผลเฉลยที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดโดยรวม
- 3) ใช้ข้อมูลเพียงค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่านั้น ดังนั้น วิธีนี้สามารถใช้กับฟังก์ชันจุดประสงค์ได้ทุกชนิด โดยไม่จำเป็นต้องเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องหรือฟังก์ชันที่หาอนุพันธ์ได้
- 4) ใช้ทฤษฎีทางความน่าจะเป็นในการหาคำตอบ

4.2 กระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

การแก้ปัญหาค่าเหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม จะประกอบไปด้วยขั้นตอนพื้นฐานทั้งหมด 6 ขั้นตอน ได้แก่

1. การแทนผลเฉลยด้วยโครโมโซม
2. การกำหนดประชากรเริ่มต้น
3. การประเมินความเหมาะสม
4. การคัดเลือกประชากร
5. การดำเนินการทางพันธุศาสตร์
6. เงื่อนไขการหยุด

4.2.1 การแทนผลเฉลยด้วยโครโมโซม (Solution representation)

เนื่องจากวิธีการเชิงพันธุกรรมใช้วิธีแทนผลเฉลยของปัญหาให้อยู่ในรูปของโครโมโซม ดังนั้น หากสามารถเลือกวิธีการแทนโครโมโซมได้เหมาะสม ย่อมทำให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น สำหรับวิธีการแทนผลเฉลยด้วยโครโมโซมนี้มีหลากหลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้เลขฐานสอง (Binary digits) เลขทศนิยม (Floating number) จำนวนเต็ม (Integer) และสัญลักษณ์ (Symbol) เป็นต้น แต่โดยทั่วไปวิธีที่นิยมใช้กัน คือ เลขฐานสอง และเลขทศนิยม ซึ่งต่างก็เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ แต่วิธีการแทนโครโมโซมด้วยเลขทศนิยมจะมีข้อได้เปรียบในเรื่องเวลาที่ใช้ในการคำนวณ [22] ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงตัวอย่างการแทนผลเฉลยด้วยโครโมโซมเลขฐานสอง และเลขทศนิยม ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการแทนผลเฉลยด้วยโครโมโซมเลขฐานสอง

2.111	0.231	1.000
ตัวแปรที่ 1	ตัวแปรที่ 2	ตัวแปรที่ 3

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการการแทนผลเฉลยด้วยโครโมโซมเลขทศนิยม

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้การแทนโครโมโซมด้วยเลขทศนิยม ดังนั้น ในรายละเอียดต่อไปจึงกล่าวถึงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้กับการแทนโครโมโซมด้วยเลขทศนิยมเป็นส่วนใหญ่ สำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้การแทนโครโมโซมด้วยเลขฐานสองนั้นสามารถหารายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน [21] – [23]

4.2.2 การกำหนดประชากรเริ่มต้น (Initial Population)

โดยทั่วไปนิยมกำหนดประชากรเริ่มต้นด้วยวิธีการสุ่มเลือกจำนวนโครโมโซมให้เท่ากับจำนวนประชากรที่ต้องการ ทั้งนี้ สิ่งสำคัญสำหรับการกำหนดประชากรเริ่มต้น ก็คือ จำนวนประชากรที่ต้องการ หากกำหนดจำนวนประชากรไม่มากพอที่จะครอบคลุมผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งหมด อาจส่งผลให้การค้นหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมด้อยไป ส่วนใหญ่แล้วนิยมกำหนดจำนวนประชากรที่ต้องการอยู่ในช่วงหลักร้อยจนถึงหลักพัน

4.2.3 การประเมินความเหมาะสม (Fitness Evaluation)

เมื่อมีการกำหนดประชากรเริ่มต้นแล้ว ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะทำการพิจารณาเลือกผลเฉลยใหม่ จากผลเฉลยเดิมโดยอาศัยค่าความเหมาะสม ดังนั้น การเลือกใช้วิธีการประเมิน และ ฟังก์ชันความเหมาะสมอย่างเหมาะสมจะช่วยให้การค้นหาผลเฉลยเป็นไปอย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปการประเมินความเหมาะสมของผลเฉลยจะอาศัยการคำนวณค่าจากฟังก์ชันจุดประสงค์

4.2.4 การคัดเลือกประชากร (Selection Function)

ขั้นตอนต่อไปสำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม คือ การคัดเลือกประชากรซึ่งเป็นขั้นตอนที่ตัดสินใจว่าโครโมโซมแต่ละตัวในกลุ่มประชานั้นว่าจะอยู่รอดหรือไม่ในรุ่นต่อไป โดยพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว ถ้าโครโมโซมใดมีค่าความเหมาะสมสูงก็มีโอกาสอยู่รอดสูง ส่วนโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำก็มีโอกาสอยู่รอดต่ำ สำหรับวิธีในการคัดเลือกประชานี้มีหลายวิธี เช่น การสุ่มแบบวงล้อ (Roulette wheel) การจัดลำดับ (Ranking) การเจอกันของผู้ชนะ (Tournament) เป็นต้น [21]-[22]

1) การสุ่มแบบวงล้อ (Roulette wheel)

เป็นกระบวนการคัดเลือกประชากรแบบสุ่ม โดยใช้ค่าความเหมาะสมเพื่อกำหนดความน่าจะเป็นของโครโมโซม P_i ตามสมการที่ (4.1) จากนั้น ทำการสุ่มความน่าจะเป็น ในช่วง $U(0,1)$ เพื่อเปรียบเทียบกับความน่าจะเป็นสะสมของโครโมโซม $C_i = \sum_{j=1}^i P_j$ หากค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวเป็นไปตามเงื่อนไขนี้ $C_{i-1} < U(0,1) \leq C_i$ โครโมโซม i จะได้รับการคัดเลือก

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^{Popsiz} F_j} \quad (4.1)$$

โดย F_i คือ ค่าความเหมาะสมของโครโมโซม i

$Popsiz$ คือ จำนวนประชากร

2) การจัดลำดับ (Ranking)

เป็นการคัดเลือกประชากรแบบสุ่มเช่นเดียวกับการสุ่มแบบวงล้อ เพียงแต่จะใช้ค่าความเหมาะสมจัดลำดับโครโมโซมก่อน แล้วจึงค่อยกำหนดความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซม P_i ด้วยสมการที่ (4.2)

$$P_i = q'(1-q)^{r-1} \quad (4.2)$$

โดย q คือ ความน่าจะเป็นของโครโมโซมลำดับที่ 1

r คือ ลำดับของโครโมโซม ถ้าเท่ากับ 1 คือ ดีที่สุด

$$q' \text{ คือ } \frac{q}{1 - (1-q)^{Popsiz}}$$

3) การเจอกันของผู้ชนะ (Tournament)

ทำได้โดยจัดกลุ่มโครโมโซมเป็นกลุ่มย่อยๆ แบบสุ่ม และในแต่ละกลุ่มย่อยนี้จะเลือกโครโมโซมที่แข็งแกร่งที่สุดเพื่อกำเนิกรุ่นลูกต่อไป กระบวนการดังกล่าวจะทำซ้ำจนได้จำนวนประชากรครบตามต้องการ

4.2.5 การดำเนินการทางพันธุศาสตร์ (Genetic Operator)

ขั้นตอนการดำเนินการทางพันธุศาสตร์ทำหน้าที่สร้างผลเฉลยใหม่ๆ จากผลเฉลยที่ผ่านขั้นตอนการคัดเลือกประชากรมาแล้ว โดยการดำเนินการทางพันธุศาสตร์ที่นิยมใช้ คือ การครอสโอเวอร์ และการมิวเทชัน

4.2.5.1 การครอสโอเวอร์

เป็นกระบวนการสร้างประชากรรุ่นใหม่โดยอาศัยการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโครโมโซมพ่อแม่ (Parents) จำนวน 2 โครโมโซม เพื่อกำเนิครุ่นลูก (Offspring) จำนวน 2 โครโมโซม ซึ่งขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข้อมูลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ตามวิธีการแทนผลเฉลยด้วยโครโมโซม [23] คือ

1. การครอสโอเวอร์เมื่อใช้วิธีแทนโครโมโซมด้วยเลขฐานสอง

การครอสโอเวอร์ในกลุ่มนี้มีหลายวิธี เช่น วิธีครอสโอเวอร์อย่างง่าย (Simple Crossover) วิธีครอสโอเวอร์หลายจุด (Multi-point Crossover) เป็นต้น สำหรับกระบวนการครอสโอเวอร์ของโครโมโซมนี้ เริ่มจากสุ่มโครโมโซมพ่อแม่มาคู่หนึ่ง ซึ่งก็คือโครโมโซมพ่อแม่ 1 และโครโมโซมพ่อแม่ 2 ดังรูปที่ 4.3 ในกรณีที่เป็นวิธีครอสโอเวอร์จุดเดียว จะทำการสุ่มตำแหน่งครอสโอเวอร์ (Cross site) ขึ้นมา หลังจากนั้นโครโมโซมคู่นั้นก็จะเปลี่ยนบิตกันตั้งแต่ตำแหน่งที่อยู่หลังตำแหน่งครอสโอเวอร์เป็นต้นไปเพื่อให้กำเนิดโครโมโซมลูกขึ้นมาใหม่ จะกระทำเช่นนี้จนได้โครโมโซมชุดใหม่ขึ้นมาจนครบจำนวนประชากรที่เราต้องการ

ตำแหน่งครอสโอเวอร์

1	1	0	0	1	โครโมโซมพ่อแม่ 1
0	1	0	1	0	โครโมโซมพ่อแม่ 2
1	1	0	1	0	โครโมโซมลูก 1
0	1	0	0	1	โครโมโซมลูก 2

รูปที่ 4.3 การครอสโอเวอร์

จากวิธีการครอสโอเวอร์อย่างง่ายข้างต้นนี้ กำหนดให้ x_i และ y_i คือ ค่าของบิต i ในโครโมโซมพ่อแม่ 1 และค่าของบิต i ในโครโมโซมพ่อแม่ 2 ตามลำดับ เมื่อสุ่มตำแหน่งครอสโอเวอร์ r จะทำให้เกิดการเปลี่ยนค่าของบิตตั้งแต่ตำแหน่ง r เป็นต้นไป และเกิดโครโมโซมลูก x' และ y' ขึ้นมาใหม่ ดังสมการที่ (4.3)

$$\begin{aligned}
 x'_i &= \begin{cases} x_i, & \text{if } i < r \\ y_i, & \text{otherwise} \end{cases} \\
 y'_i &= \begin{cases} y_i, & \text{if } i < r \\ x_i, & \text{otherwise} \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

สำหรับรายละเอียดของวิธีอื่นๆ ในกลุ่มนี้สามารถหารายละเอียดได้จาก [21] - [23]

2. การครอสโอเวอร์เมื่อใช้วิธีแทนโครโมโซมด้วยเลขทศนิยม

การครอสโอเวอร์ในกลุ่มนี้มีหลายวิธี เช่น วิธีการครอสโอเวอร์อย่างง่าย (Simple Crossover) วิธีการครอสโอเวอร์เลขคณิต (Arithmetic Crossover) วิธีการครอสโอเวอร์ฮิวริสติก (Heuristic Crossover) เป็นต้น

1) วิธีครอสโอเวอร์อย่างง่าย (Simple Crossover)

วิธีครอสโอเวอร์อย่างง่ายสำหรับการแทนโครโมโซมด้วยเลขทศนิยมนี้ใช้หลักการเดียวกับการแทนโครโมโซมด้วยเลขฐานสองดังสมการที่ (4.3)

2) วิธีครอสโอเวอร์เลขคณิต (Arithmetic Crossover)

วิธีนี้จะสุ่มโครโมโซมพ่อแม่มาคู่หนึ่ง \bar{X} และ \bar{Y} เพื่อนำมาผ่านกระบวนการรวมกันเชิงเส้น ดังสมการที่ (4.4) กำเนิดเป็นโครโมโซมลูก \bar{X}' และ \bar{Y}' ทั้งนี้ r คือ ค่าที่สุ่มได้ในช่วง $U(0,1)$

$$\begin{aligned}\bar{X}' &= r\bar{X} + (1-r)\bar{Y} \\ \bar{Y}' &= (1-r)\bar{X} + r\bar{Y}\end{aligned}\quad (4.4)$$

3) วิธีครอสโอเวอร์ฮิวริสติก (Heuristic Crossover)

เป็นการแลกเปลี่ยนข้อมูลของโครโมโซมพ่อแม่ \bar{X} และ \bar{Y} แบบเชิงเส้น ดังสมการที่ (4.5) ทั้งนี้ \bar{X}' และ \bar{Y}' คือ โครโมโซมลูกที่เกิดขึ้นใหม่ โดย \bar{X}' ต้องมีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่า \bar{Y}' หากไม่เป็นจริงจะต้องสุ่ม r ใหม่ที่สามารถทำให้ \bar{X}' มีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่า \bar{Y}'

$$\begin{aligned}\bar{X}' &= \bar{X} + r(\bar{X} - \bar{Y}) \\ \bar{Y}' &= \bar{X}\end{aligned}\quad (4.5)$$

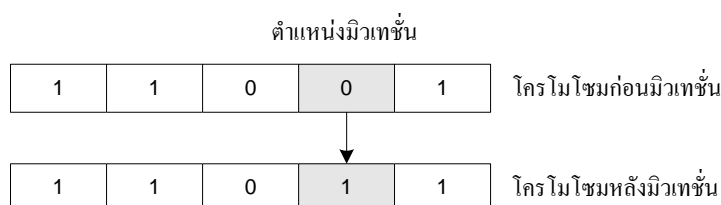
4.2.5.2 การมิวเทชัน

เป็นกระบวนการที่ป้องกันการลู่เข้าก่อนกำหนด และป้องกันการสูญเสียข้อมูลที่สำคัญ บางอย่างไปในระหว่างกระบวนการถ่ายทอด นอกจากนี้ ยังช่วยให้ผลเฉลยมีโอกาสที่จะลู่เข้าสู่จุดคำตอบในช่วงอื่นๆ ที่มีค่าดีกว่า ขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนค่าของโครโมโซมที่ตำแหน่งใดๆ เพื่อกำเนิดโครโมโซมใหม่ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. การมิวเทชันเมื่อใช้วิธีแทนโครโมโซมด้วยเลขฐานสอง

ในแต่ละตำแหน่งบิตจะสุ่มจำนวนจริงในช่วง 0 ถึง 1 ขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบค่าที่สุ่มนั้นกับความน่าจะเป็นของการมิวเทชัน ถ้าค่าที่สุ่มในบิตใดมีค่ามากกว่าความน่าจะเป็นของการมิวเทชันก็

จะไม่มิวเทชัน แต่ถ้าค่าที่สุ่มของบิตใดมีค่าต่ำกว่าความน่าจะเป็นของการมิวเทชันก็จะทำการมิวเทชันที่ตำแหน่งบิตนั้น โดยที่จะเปลี่ยนบิตที่ตำแหน่งนั้นจาก 0 เป็น 1 หรือ 1 เป็น 0 ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การมิวเทชัน

จากการมิวเทชันข้างต้น กำหนดให้ p_m คือ ความน่าจะเป็นของการมิวเทชัน x_i คือ ค่าของบิต i ในโครโมโซม เมื่อสุ่มค่าในช่วง $U(0,1)$ ของแต่ละตำแหน่งในโครโมโซม หากค่านั้นน้อยกว่า p_m จะทำให้เกิดการเปลี่ยนค่าของตำแหน่งนั้น และเกิดโครโมโซมลูก x' ขึ้นมาใหม่ ดังสมการที่ (4.6)

$$x'_i = \begin{cases} 1 - x_i, & \text{if } U(0,1) < p_m \\ x_i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.6)$$

2. การมิวเทชันเมื่อใช้วิธีแทนโครโมโซมด้วยเลขทศนิยม

การมิวเทชันในกลุ่มนี้มีหลายวิธี เช่น วิธีมิวเทชันแบบสม่ำเสมอ (Uniform Mutation) วิธีมิวเทชันแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Mutation) วิธีมิวเทชันที่ค่าขอบเขต (Boundary Mutation) เป็นต้น

1) วิธีมิวเทชันแบบสม่ำเสมอ (Uniform Mutation)

วิธีการนี้จะสุ่มค่า j ขึ้นมา โดย j คือ ตำแหน่งตัวแปรในโครโมโซม ในกรณีที่ตำแหน่งตัวแปรในโครโมโซมมีค่าเท่ากับ j จะเกิดการเปลี่ยนค่าในตำแหน่งตัวแปรนั้น โดยสุ่มค่าในช่วงขอบเขตล่าง a_i และขอบเขตบน b_i ดังสมการที่ (4.7)

$$x'_i = \begin{cases} U(a_i, b_i), & \text{if } i = j \\ x_i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.7)$$

2) วิธีมิวเทชันแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Mutation)

วิธีการนี้เริ่มจากการสุ่มตัวแปรที่ j ขึ้นมา โดยตัวแปรที่ j นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าสุ่มไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform random number) ดังสมการที่ (4.8)

$$x'_i = \begin{cases} x_i + (b_i - x_i)f(G), & \text{if } r_1 < 0.5 \\ x_i - (x_i - a_i)f(G), & \text{if } r_1 \geq 0.5 \\ x_i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$f(G) = \left(r_2 \left(1 - \frac{G}{G_{max}} \right) \right)^b \quad (4.9)$$

โดย r_1, r_2 คือ ค่าสุ่มสม่ำเสมอ (Uniform random number) ในช่วง (0,1)

G คือ รุ่นการถ่ายทอดปัจจุบัน

G_{max} คือ จำนวนรุ่นการถ่ายทอด

b คือ ค่าคงที่กำหนดเอง

3) วิธีมิวเทชันที่ค่าขอบเขต (Boundary Mutation)

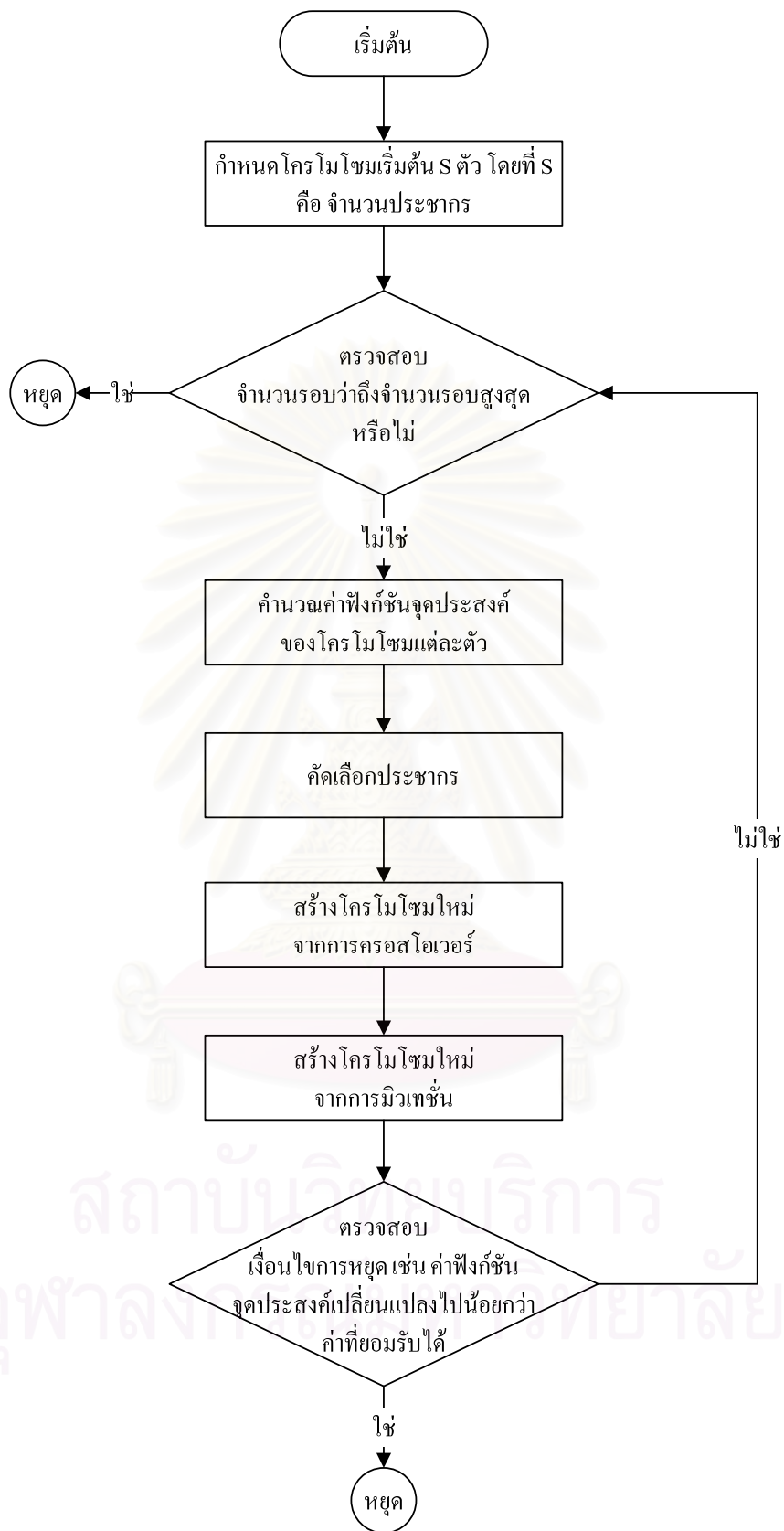
วิธีมิวเทชันที่ค่าขอบเขต ทำโดยสุ่มตัวแปรที่ j ขึ้นมา หากค่าของตัวแปรนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.5 ของ (a_i, b_i) จะเปลี่ยนค่าเป็นค่าขอบเขตล่าง แต่หากค่าของตัวแปรนั้นมีค่ามากกว่า 0.5 ของ (a_i, b_i) จะเปลี่ยนค่าเป็นค่าขอบเขตบน ดังสมการที่ (4.9)

$$x'_i = \begin{cases} a_i, & \text{if } i = j, r < 0.5 \\ b_i, & \text{if } i = j, r \geq 0.5 \\ x_i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.10)$$

4.2.6 เงื่อนไขการหยุด

เงื่อนไขการหยุดของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีอยู่หลายวิธี เช่น ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ หรือมีการเปลี่ยนแปลงยีนในโครโมโซมแต่ละตัวน้อยกว่าจำนวนที่ยอมรับได้ แต่โดยทั่วไปนิยมหยุดหาค่าตอบเมื่อครบจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ [23]

จากองค์ประกอบข้างต้น ขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยรวมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

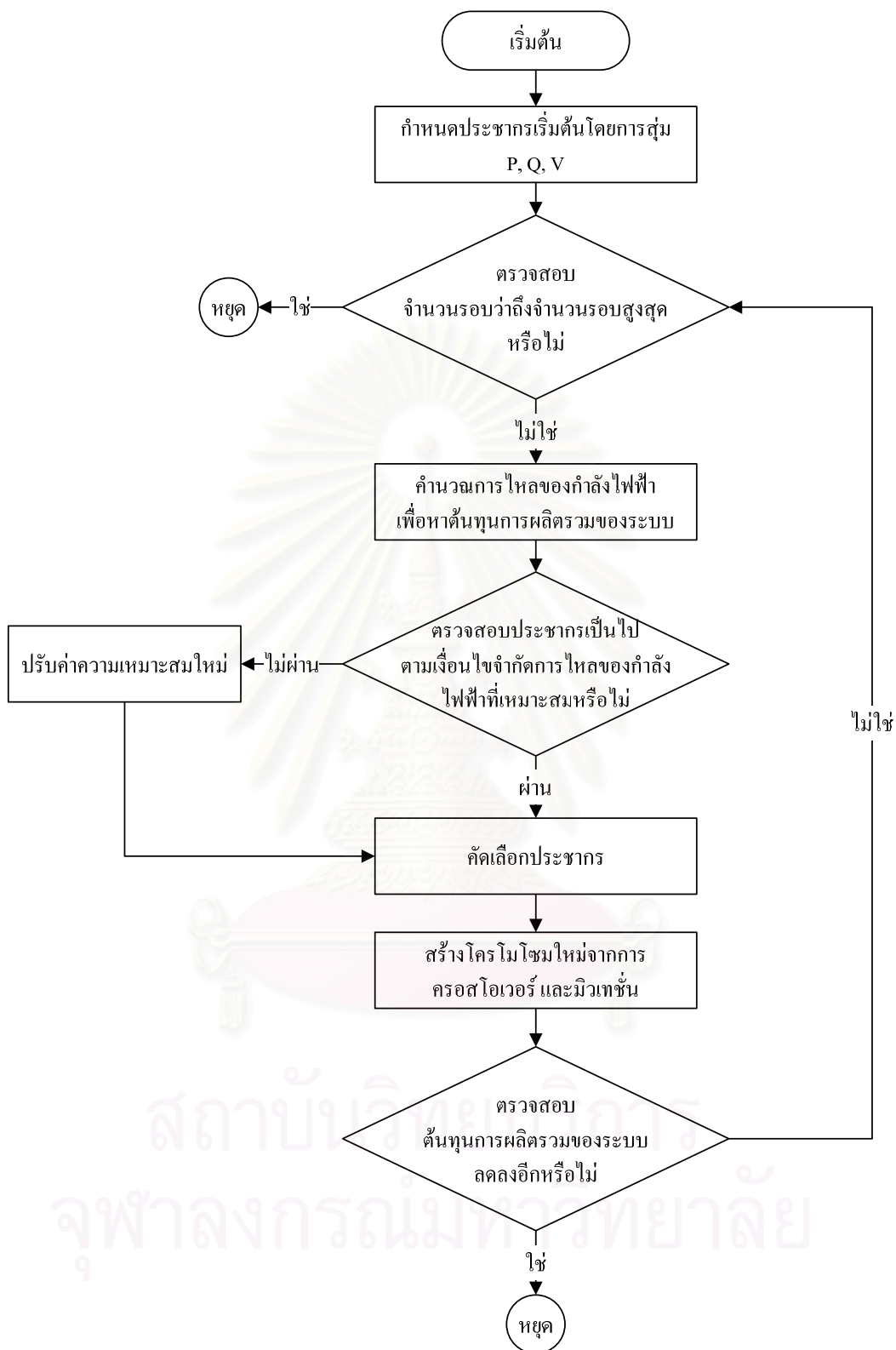
4.3 การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาค่าเหมาะของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม [24]

การแก้ปัญหาค่าเหมาะ โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีใหม่ที่มีประสิทธิภาพ สามารถประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมได้ ทั้งนี้ ด้วยความสัมพันธ์อันซับซ้อนของตัวแปรและฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาค่าเหมาะของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม อาจทำให้บางครั้งวิธีการดั้งเดิมที่นำมาแก้ปัญหาค่าเหมาะไม่สามารถหาผลเฉลยได้ แต่สำหรับการแก้ปัญหาค่าเหมาะโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแล้วจะใช้เพียงค่าฟังก์ชันจุดประสงค์มาเป็นข้อมูลในการหาผลเฉลยเท่านั้น โดยไม่สนใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ

ในการหาผลเฉลยของการแก้ปัญหาค่าเหมาะของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีฟังก์ชันจุดประสงค์ คือ การหาต้นทุนการผลิตรวมต่ำสุดของระบบ ขั้นตอนแรก เริ่มจากการแทนค่าตัวแปรควบคุมต่างๆ ได้แก่ กำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องยกเว้นที่บัสอ้างอิง แรงดันที่บัสอ้างอิง แรงดันที่บัสควบคุมแรงดัน และการตั้งค่าแท็ปของหม้อแปลง ให้อยู่ในรูปของโครโมโซม อาจใช้การแทนด้วยเลขฐานสอง หรือเลขทศนิยมก็ได้ จากนั้นทำการกำหนดประชากรดังกล่าวขึ้นมาตามจำนวนที่ต้องการด้วยการสุ่ม และนำโครโมโซมที่ได้มานั้นไปคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อหาต้นทุนการผลิตรวมของระบบ พร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไขจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม ในกรณีที่โครโมโซมตัวใดสามารถให้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำและสอดคล้องกับเงื่อนไขจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม จะถูกคัดเลือกเพื่อนำไปผ่านการดำเนินการทางพันธุกรรม คือ การครอสโอเวอร์และการมิวเทชันต่อไป จากนั้นจึงเริ่มกระบวนการใหม่อีกรอบ สำหรับเงื่อนไขในการหยุดจะตรวจสอบว่าต้นทุนการผลิตรวมของระบบลดลงอีกหรือไม่

ขั้นตอนการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาค่าเหมาะของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม สรุปได้ดังรูปที่ 4.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม

บทที่ 5

รูปแบบปัญหาของวิทยานิพนธ์

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย โดยจะอธิบายถึงวิธีการกำหนดรูปแบบของปัญหา พร้อมทั้งเงื่อนไขจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าและเงื่อนไขจำกัดกระแสผิวดพ่วงสำหรับอุปกรณ์ป้องกันให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงวิธีการประยุกต์ใช้แนวทางการแก้ปัญหาด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรมที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 มาแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์

5.1 นิยามตัวแปร

แบ่งออกเป็นข้อมูลป้อนเข้า และตัวแปรคำตอบที่สนใจ ได้แก่

ข้อมูลป้อนเข้า

- P_{D_i} คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
- Q_{D_i} คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัส i
- $P_{DG_i}^{max}$ คือ กำลังการผลิตจริงสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
- $P_{DG_i}^{min}$ คือ กำลังการผลิตจริงต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
- $Q_{DG_i}^{max}$ คือ กำลังการผลิตรีแอกทีฟสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
- $Q_{DG_i}^{min}$ คือ กำลังการผลิตรีแอกทีฟต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
- V_i^{max} คือ ขนาดแรงดันสูงสุดของบัส i
- V_i^{min} คือ ขนาดแรงดันต่ำสุดของบัส i
- Y_{ij} คือ ขนาดของสมาชิกที่ตำแหน่ง (i, j) ในบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
- θ_{ij} คือ มุมของสมาชิกที่ตำแหน่ง (i, j) ในบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
- y_{ij} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และบัส j
- y_{i0} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i กับกราวด์ของระบบ
- S_{ij}^{max} คือ พิกัดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลจากบัส i ไป j
- $nbus$ คือ จำนวนบัสของระบบที่ทำการศึกษา

nDG	คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่กำหนดติดตั้งในระบบ
$busDG$	คือ เซตของบัสที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก
$I_{fuse,margin}$	คือ กระแสผิดพลาดมากที่สุดที่ฟิวส์สามารถรับได้

ตัวแปรคำตอบ

P_{Loss}	คือ กำลังสูญเสียจริงรวมในระบบจำหน่ายที่พิจารณา
$P_{Substation}$	คือ กำลังการผลิตจริงของสถานีไฟฟ้าย่อย
P_{DG_i}	คือ กำลังการผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
Q_{DG_i}	คือ กำลังการผลิตรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่บัส i
V_i	คือ ขนาดของแรงดันที่บัส i
δ_i	คือ มุมของแรงดันที่บัส i
I_{ij}	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j
S_{ij}	คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j

5.2 ฟังก์ชันจุดประสงค์ และเงื่อนไขจำกัด

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีจุดประสงค์หลักในการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบ โดยทำการระบุตำแหน่งบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต้องการติดตั้ง ดังนั้น จึงกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาเป็นการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก P_{DG_i} ที่สามารถลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย P_{Loss} ให้มีค่าต่ำที่สุด โดยกำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่ายสามารถคำนวณได้จากผลรวมของกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แต่ละบัสลบด้วยผลรวมของความต้องการกำลังไฟฟ้าที่แต่ละบัส ซึ่งในที่นี้กำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่ายจะถูกกำหนดให้มีค่า ดังสมการที่ (5.1)

สำหรับเงื่อนไขจำกัดของปัญหา กำหนดให้เป็นไปตามปัญหาเงื่อนไขจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้า ดังสมการที่ (5.2) – (5.5) นอกจากนี้ ยังได้รวมเงื่อนไขจำกัดเนื่องจากกระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่อาจส่งผลกระทบต่อลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน ดังสมการที่ (5.6) - (5.8)

ฟังก์ชันจุดประสงค์ คือ

$$\text{minimize } P_{Loss} = P_{Substation} + \sum_{i \in busDG} (P_{DG_i} - P_{D_i}) - \sum_{i \notin busDG} P_{D_i} \quad (5.1)$$

โดยมีเงื่อนไขจำกัด ได้แก่

เงื่อนไขจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้า

1. สมดุลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสใด ๆ

$$\begin{aligned} P_i - \sum_{j=1}^{nbus} |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) &= 0 \\ Q_i - \sum_{j=1}^{nbus} |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) &= 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

โดย $P_i = P_{DG_i} - P_{D_i}$ และ $Q_i = Q_{DG_i} - Q_{D_i}$ เมื่อ $i \in busDG$
 $P_i = -P_{D_i}$ และ $Q_i = -Q_{D_i}$ เมื่อ $i \in busNDG$

2. จำกัดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

$$\begin{aligned} P_{G_i}^{min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{max} \\ Q_{G_i}^{min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{max} \end{aligned} \quad (5.3)$$

3. จำกัดขนาดของแรงดันที่บัส

$$V_i^{min} \leq |V_i| \leq V_i^{max} \quad (5.4)$$

4. จำกัดขนาดของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่ง

$$|S_{ij}| \leq S_{ij}^{max} \quad (5.5)$$

โดย $S_{ij} = V_i I_{ij}^*$ และ $I_{ij} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{i0}V_i$

เงื่อนไขจำกัดกระแสผิดพลาดสำหรับอุปกรณ์ป้องกัน

5. เงื่อนไขจำกัดเนื่องจากการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันตามรูปแบบที่ 1 – 3 ในบทที่ 3

$$\sum_{m=1}^{nDG} I_{F,DG_m}^i < I_{fuse,margin} - I_{F,s}^i, \quad \text{ทุกตำแหน่ง } i \text{ ในสายป้อน} \quad (5.6)$$

โดย I_{F,DG_m}^i คือ กระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กตัวที่ m เมื่อเกิดความผิดพลาด ณ ตำแหน่ง i

nDG คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่กำหนดติดตั้งในระบบ

6. เงื่อนไขจำกัดเนื่องจากการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันตามรูปแบบที่ 4 ในบทที่ 3

$$T_{Fuse} (I_{fuse}^i) < T_{Recloser F} (I_{Recloser-}^i), \quad \text{ทุกตำแหน่ง } i \text{ หนักรีโคลสเซอร์} \quad (5.7)$$

โดย I_{fuse}^i คือ กระแสผิดพลาดผ่านฟิวส์เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สายป้อน i

$I_{Recloser-}^i$ คือ กระแสผิดพลาดไหลย้อนผ่านรีโคลสเซอร์เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สายป้อน i

T_{Fuse} คือ เวลาการทำงานของฟิวส์โดยใช้กราฟคุณลักษณะของฟิวส์ TC

$T_{Recloser F}$ คือ เวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์โดยใช้กราฟคุณลักษณะของรีโคลสเซอร์จังหวะเร็ว

7. เงื่อนไขจำกัดเนื่องจากการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันตามรูปแบบที่ 5 ในบทที่ 3

$$T_{Recloser S} (I_{Recloser+}^i) < T_{Recloser F} (I_{Recloser-}^i), \quad \text{ทุกตำแหน่ง } i \text{ ในสายป้อน} \quad (5.8)$$

โดย $I_{Recloser+}^i$ คือ กระแสผิดพลาดผ่านรีโคลสเซอร์เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สายป้อน i

$I_{Recloser-}^i$ คือ กระแสผิดพลาดไหลย้อนผ่านรีโคลสเซอร์เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สายป้อน i

$T_{Recloser S}$ คือ เวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์โดยใช้กราฟคุณลักษณะของรีโคลสเซอร์จังหวะช้า

$T_{Recloser F}$ คือ เวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์โดยใช้กราฟคุณลักษณะของรีโคลสเซอร์จังหวะเร็ว

5.3 ขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหา

การประยุกต์ใช้ขั้นตอนเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายแบ่งเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดจำนวน และตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต้องการติดตั้ง

ขั้นตอนที่ 2 แทนค่าตัวแปรกำลังจริง กำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทุกเครื่อง และแรงดันที่บัสอ้างอิงให้อยู่ในรูปของโครโมโซม จากนั้นกำหนดโครโมโซมขึ้นตามจำนวนประชากรที่ต้องการด้วยการสุ่ม

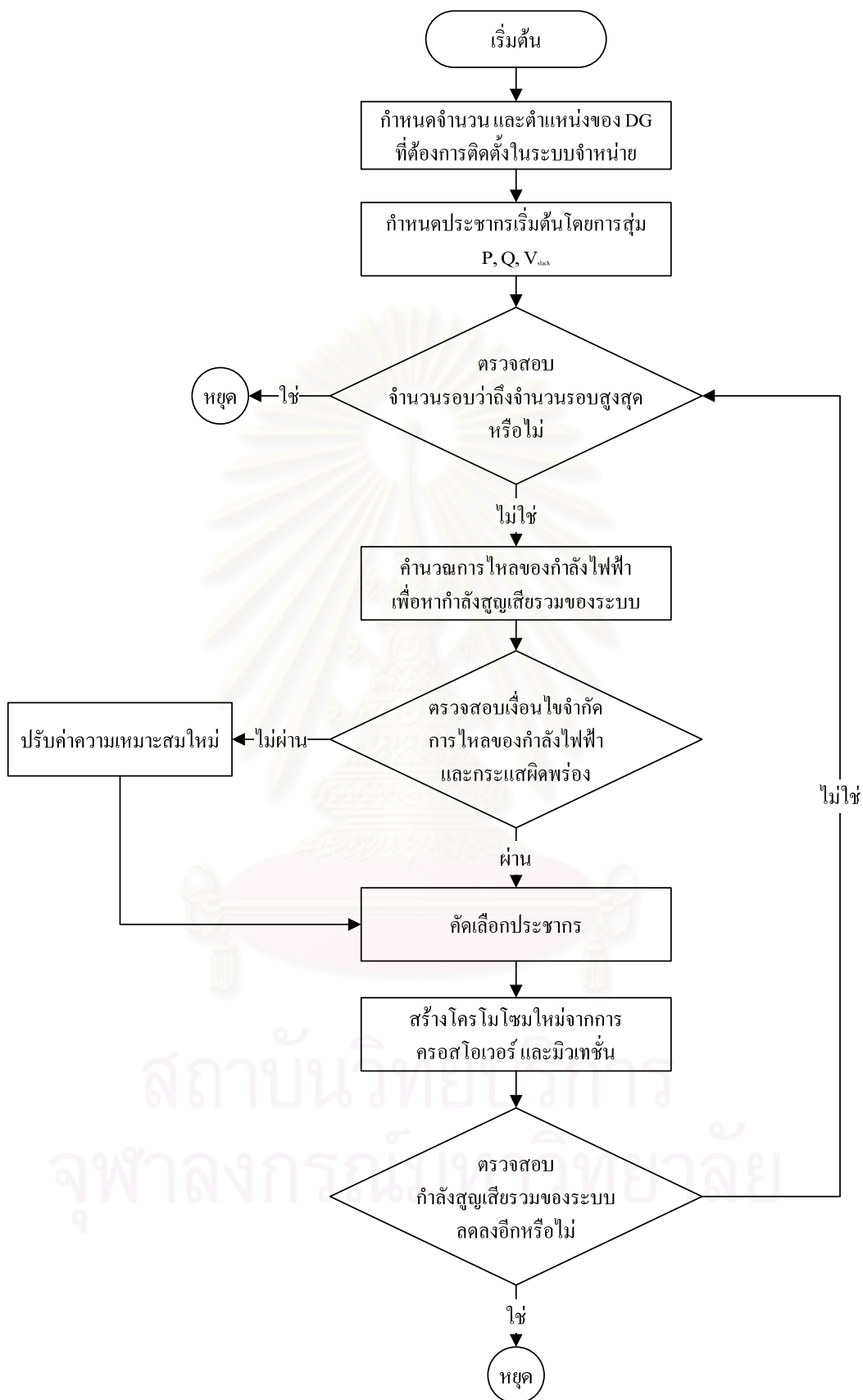
ขั้นตอนที่ 3 นำโครโมโซมแต่ละตัวไปคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อหาลำดับสูญเสียรวมของระบบจำหน่าย กำลังสูญเสียที่ได้นี้คือค่าความเหมาะสมของโครโมโซม

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบเงื่อนไขจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้า และเงื่อนไขจำกัดกระแสพิคพ่วงสำหรับอุปกรณ์ป้องกัน กรณีที่โครโมโซมใดไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจำกัดทั้ง 2 ให้ปรับค่าความเหมาะสมใหม่

ขั้นตอนที่ 5 คัดเลือกโครโมโซมตัวที่มีค่าความเหมาะสมน้อย หรือในอีกนัยหนึ่งคือโครโมโซมที่มีกำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่ายน้อย จากนั้นนำโครโมโซมที่ได้จากการคัดเลือกมาผ่านการดำเนินการทางพันธุกรรม คือ การครอสโอเวอร์และการมิวเทชันต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดว่ากำลังสูญเสียรวมของระบบจำหน่ายลดลงอีกหรือไม่ หากยังสามารถลดได้อีกให้วนกลับไปเริ่มกระบวนการที่ 3 อีกจนครบจำนวนรุ่นการถ่ายทอดที่กำหนด

ขั้นตอนการประยุกต์ใช้ขั้นตอนเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย สรุปได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาของวิทยานิพนธ์

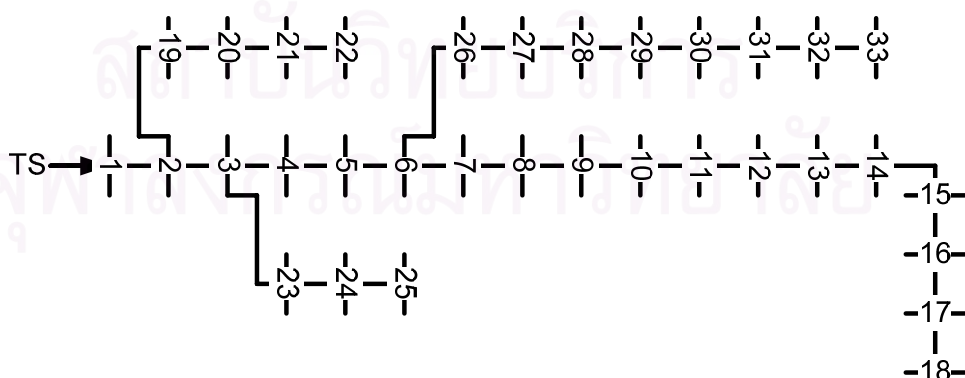
5.4 การพัฒนาโปรแกรม และการทดสอบพื้นฐาน

โปรแกรมสำหรับคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กพัฒนาขึ้นมาจากโปรแกรมการหาค่าเหมาะสมด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm Optimization Toolbox) ร่วมกับโปรแกรม MATPOWER 3.0 ภายใต้การใช้งานบนโปรแกรม MATLAB รุ่น 6.5

สำหรับข้อมูลป้อนเข้าสำหรับโปรแกรมนี้ประกอบด้วย ข้อมูลบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่ง โดยรายละเอียดสามารถดูได้ใน ภาคผนวก ก นอกจากนี้ โปรแกรมยังต้องการข้อมูลกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันทุกชนิดที่พิจารณา รวมทั้งช่วงกระแสต่ำสุดและกระแสสูงสุดที่อุปกรณ์ป้องกันสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

โปรแกรมในส่วนการตรวจสอบเงื่อนไขจำกัดกระแสผิดพลาดสำหรับอุปกรณ์ป้องกันนี้ จะทำการจำลองการเกิดความผิดพลาดในทุกตำแหน่งของสายป้อน โดยเรียงลำดับจากสายป้อนเส้นแรกจนถึงสายป้อนเส้นสุดท้าย เพื่อตรวจสอบกระแสผิดพลาดให้เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ (5.6) – (5.8) สำหรับวิธีการคำนวณกระแสผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบได้ใช้วิธีการสร้าง Z_{bus} โดยแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กใช้ค่ารีแอกแตนซ์แทน และพิจารณาเฉพาะการเกิดความผิดพลาดแบบสามเฟส

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมได้ทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรมกับวิธีกำหนดการเชิงกำลังสองสืบเนื่อง [5] โดยใช้ระบบทดสอบดังรูปที่ 5.2 พร้อมทั้งกำหนดจำนวนและตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเช่นเดียวกัน ผลการเปรียบเทียบขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายระหว่างวิธีกำหนดการเชิงกำลังสองสืบเนื่องกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแสดงไว้ดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 แผนภาพเส้นเดียวของระบบจำหน่าย [5]

ตารางที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายระหว่างวิธีกำหนดการเชิงกำลังสอง สืบเนื่องกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

บัสที่ ติดตั้ง DG	วิธีกำหนดการเชิงกำลังสองสืบเนื่อง [5]			ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม		
	P ของ DG (MW)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)	กำลังสูญเสีย ที่ลดลงเมื่อ เทียบกับ กรณีฐาน (%)	P ของ DG (MW)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)	กำลังสูญเสีย ที่ลดลงเมื่อ เทียบกับ กรณีฐาน (%)
-	-	0.2027	-	-	0.2027	-
30	1.48	0.0526	74.0	1.48	0.0526	74.0
8, 32	1.44, 0.79	0.0297	85.3	1.49, 0.75	0.0290	85.7
8, 25, 32	1.32, 0.82, 0.74	0.0214	89.4	1.34, 0.81, 0.74	0.0173	91.5
7, 18, 25, 32	1.12, 0.42, 0.78, 0.67	0.0108	94.7	1.10, 0.43, 0.79, 0.67	0.0091	95.5

จากผลการทดสอบในตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถให้ผลเฉลยที่ดีกว่าวิธีกำหนดการเชิงกำลังสองสืบเนื่อง เมื่อกำหนดจำนวนและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเช่นเดียวกัน

สำหรับการทดสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ได้ ทำโดยการนำผลเฉลยที่ได้ไปทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าอีกครั้ง พร้อมทั้งคำนวณกระแสผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายเพื่อตรวจสอบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การทดสอบสมรรถนะของโปรแกรมและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงการทดสอบโปรแกรมการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย โดยคำนึงถึงผลกระทบต่ออุปกรณ์ป้องกัน โปรแกรมนี้พัฒนาจากอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 เนื้อหาภายในครอบคลุมถึงโครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของระบบทดสอบ ขั้นตอนในการทดลอง และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับระบบทดสอบ พร้อมทั้งการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละกรณี

6.1 ระบบทดสอบ

การทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะอาศัยระบบทดสอบรอยบิลลินตัน บัส 2 (Roy Billinton Test System Bus 2, RBTS BUS 2) [7] และระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [6] โดยทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1-3 เครื่อง ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบ

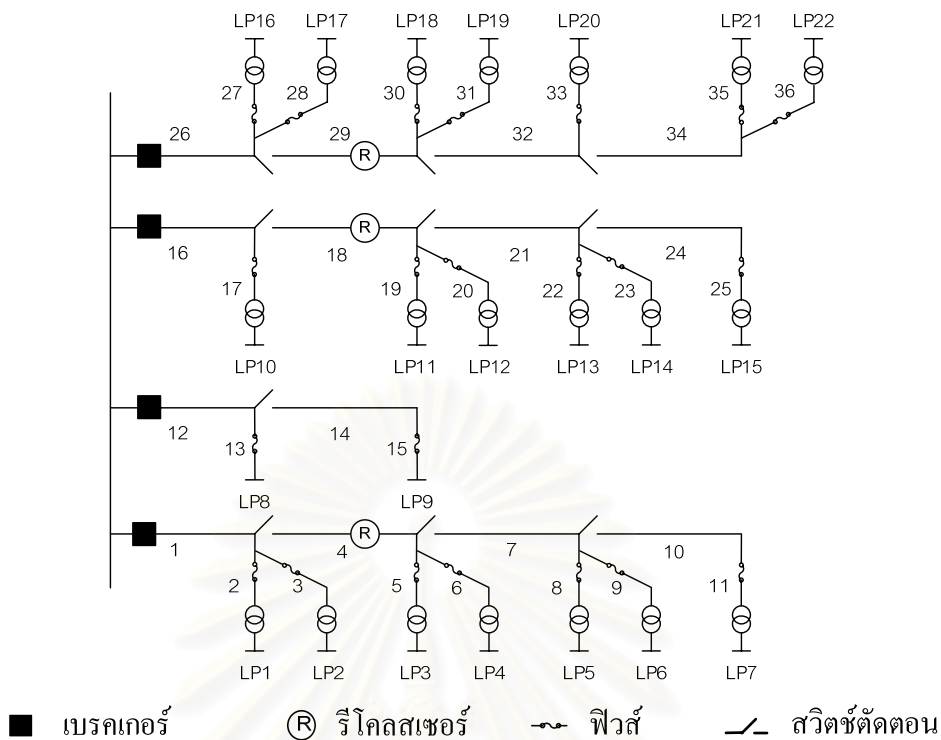
สำหรับคุณสมบัติของระบบจำหน่ายที่ใช้ในการทดสอบ ดังต่อไปนี้

1. เป็นระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างเป็นแบบเรเดียล
2. เป็นระบบ 3 เฟสแบบสมดุล
3. ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานที่ใช้ทดสอบจะต้องลู่เข้า

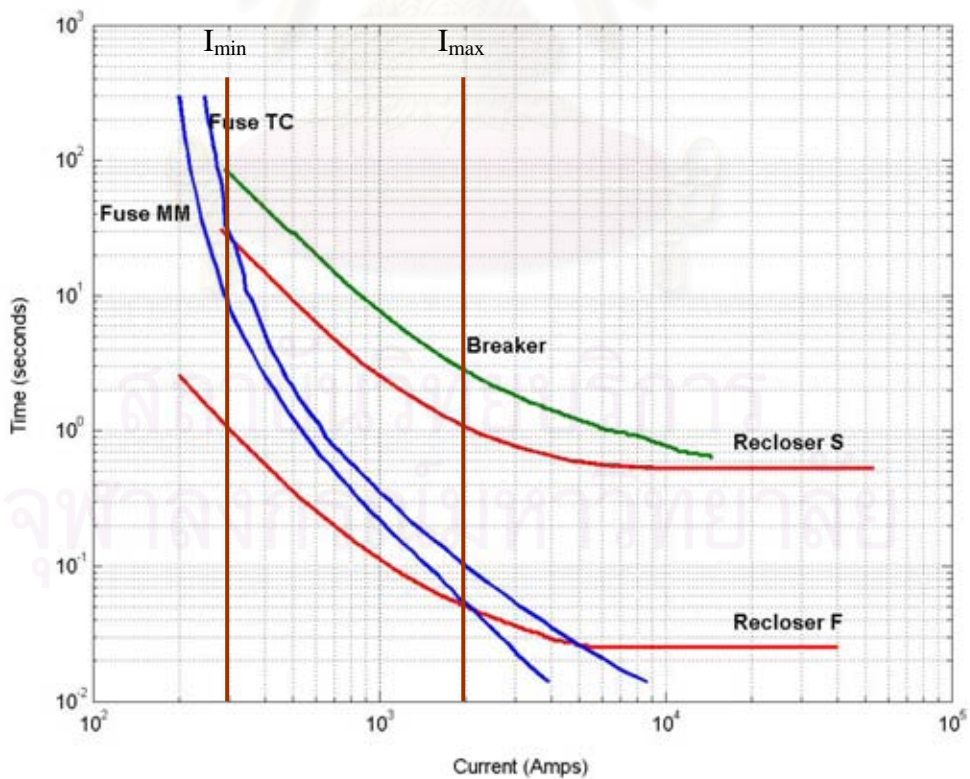
6.1.1 ระบบทดสอบ RBTS BUS2 [25]

ระบบทดสอบ RBTS BUS2 มีลักษณะโครงสร้างเป็นระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เชื่อมต่อกับระบบส่งที่ระดับแรงดัน 11 kV

ลักษณะทางกายภาพของระบบจำหน่ายมีสายป้อนหลัก 4 เส้น และมีสายป้อนย่อยแยกออกมาอีกไหลด สำหรับอุปกรณ์ป้องกันที่พิจารณา ได้แก่ เบรกเกอร์ที่ต้นสายป้อน รีโคลสเซอร์ที่กลางสาย และฟิวส์ที่ทุกสายป้อนย่อย ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบ RBTS BUS2 [25]



รูปที่ 6.2 กราฟคุณลักษณะของลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน สำหรับระบบทดสอบ RBTS BUS2

สมมุติให้กราฟคุณลักษณะของลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันของระบบทดสอบ RBTS BUS 2 เมื่อยังไม่มี การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเป็นดังรูปที่ 6.2 จะสังเกตเห็นว่าช่วง กระแสผิดพลาดที่จะทำให้ลำดับการทำงานของเบรกเกอร์ รีโคลสเซอร์ และฟิวส์เป็นไปอย่าง ถูกต้องนั้น ควรอยู่ในช่วง 300 – 2000 แอมแปร์

สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์แต่ละชนิด และปริมาณความต้องการไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบ RBTS BUS 2 แสดงไว้ในตารางที่ 6.1-6.4

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลความยาวสายป้อนของระบบทดสอบ RBTS BUS 2 [25]

กลุ่มที่	ความยาว (กิโลเมตร)	เลขที่สายป้อน
1	0.6	2, 6, 10, 14, 17, 21, 25, 28, 30, 34
2	0.75	1, 4, 7, 9, 12, 16, 19, 22, 24, 27, 29, 32, 35
3	0.8	3, 5, 8, 11, 13, 15, 18, 20, 23, 26, 31, 33, 36

ตารางที่ 6.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบทดสอบ RBTS BUS 2

ชนิดอุปกรณ์	ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)
สายเปลือย/ความยาว 1 กม.	$0.215+0.335j$
สายป้อน/ความยาว 1กม.	$0.472+0.366j$

ตารางที่ 6.3 ประเภท และปริมาณความต้องการไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า ณ ตำแหน่งโหนดของระบบ ทดสอบ RBTS BUS 2 [25]

ตำแหน่งโหนด	ประเภทผู้ใช้ไฟ	ปริมาณความต้องการไฟฟ้าสูงสุด	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (MVAR)
1-3, 10, 11	บ้านที่อยู่อาศัย	0.8668	0.6934
12,17-19	บ้านที่อยู่อาศัย	0.7291	0.5833
8	อุตสาหกรรมขนาดกลาง	1.6279	1.3023
9	อุตสาหกรรมขนาดกลาง	1.8721	1.4977
4, 5, 13, 14, 20, 21	หน่วยงานราชการ	0.9167	0.7334
6, 7, 15, 16, 22	ธุรกิจบริการ	0.7500	0.6000
รวม		20.0006	16.0006

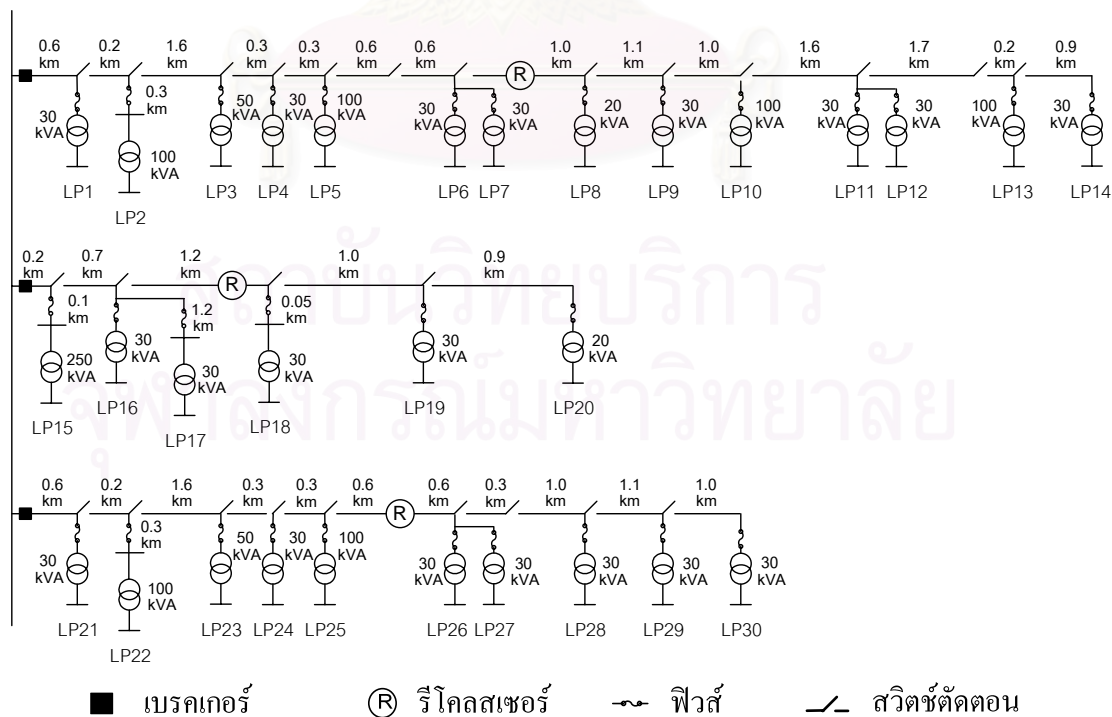
ตารางที่ 6.4 ปริมาณความต้องการไฟฟ้าแบ่งตามสายป้อนของระบบทดสอบ RBTS BUS 2 [25]

สายป้อน	ตำแหน่งโหลด	ปริมาณความต้องการไฟฟ้าสูงสุด	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVAR)
1	1-7	5.9338	4.747
2	8-9	3.5000	2.8000
3	10-15	5.0461	4.0369
4	16-22	5.5207	4.4167
รวม		20.0006	16.0006

6.1.2 ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) [6]

ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีลักษณะโครงสร้างระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เชื่อมต่อกับระบบส่งที่ระดับแรงดัน 22 kV

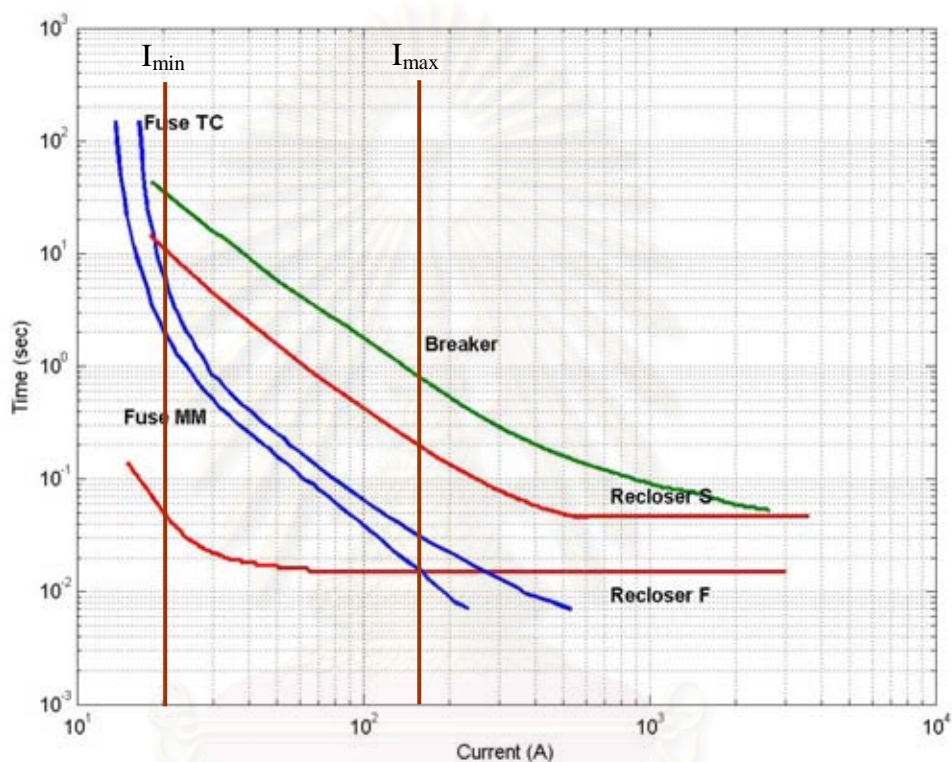
ลักษณะทางกายภาพของระบบจำหน่ายมีสายป้อนหลักอยู่ 3 เส้น และมีสายป้อนย่อยแยกสาขาออกมายังโหลด สำหรับอุปกรณ์อุปกรณ์ที่พิจารณา ได้แก่ เบรกเกอร์ที่ต้นสายป้อน รีโกลสเซอร์ที่กลางสาย และฟิวส์ที่ทุกสายป้อนย่อย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [6]

สมมุติให้กราฟคุณลักษณะของลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. เมื่อยังไม่มีติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเป็น ดังรูปที่ 6.4 จะสังเกตเห็นว่าช่วงกระแสผัดพ้องที่จะทำให้ลำดับการทำงานของเบรกเกอร์รีโคลสเซอร์ และฟิวส์เป็นไปอย่างถูกต้องนั้น ควรอยู่ในช่วง 20 – 150 แอมแปร์

สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์แต่ละชนิด และปริมาณความต้องการไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. แสดงไว้ในตารางที่ 6.5 - 6.7



รูปที่ 6.4 กราฟคุณลักษณะของลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ตารางที่ 6.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. [6]

ชนิดอุปกรณ์	ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)
หม้อแปลงขนาด 30 kVA	215.11+469.31j
หม้อแปลงขนาด 50 kVA	162.62+263.63j
หม้อแปลงขนาด 100 kVA	84.71+174.08j
หม้อแปลงขนาด 250 kVA	25.16+73.23j
สายเปลือย/ความยาว 1 กม.	0.215+0.335j
สายป้อน/ความยาว 1กม.	0.472+0.366j

ตารางที่ 6.6 ประเภท และปริมาณความต้องการไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า ณ จุดโหลดของระบบทดสอบ ที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. [6]

ตำแหน่งโหลด	ประเภทผู้ใช้ไฟ	ปริมาณความต้องการไฟฟ้าสูงสุด	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (MVAR)
1, 11, 12, 17-19	บ้านที่อยู่อาศัย	0.045	0.036
3, 23	บ้านที่อยู่อาศัย	0.075	0.06
8-9	อุตสาหกรรมขนาดกลาง	0.045	0.036
4, 14, 20, 21	หน่วยงานราชการ	0.045	0.036
2, 5, 10, 13	หน่วยงานราชการ	0.150	0.120
6, 7, 16, 24, 26-30	ธุรกิจบริการ	0.045	0.036
15	ธุรกิจบริการ	0.375	0.300
22, 25	ธุรกิจบริการ	0.150	0.120
รวม		2.370	1.896

ตารางที่ 6.7 ปริมาณความต้องการไฟฟ้าแบ่งตามสายป้อนของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. [6]

สายป้อน	ตำแหน่งโหลด	ปริมาณความต้องการไฟฟ้าสูงสุด	
		กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (MVAR)
1	1-14	1.080	0.864
2	15-20	0.600	0.480
3	21-30	0.690	0.552
รวม		2.370	1.896

6.2 ขั้นตอนในการทดสอบ

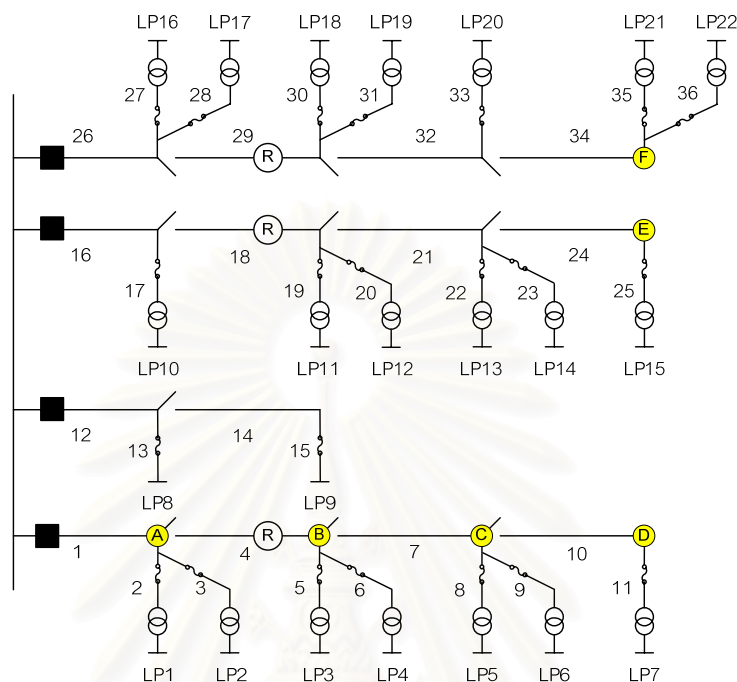
ระเบียบวิธีในการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนานั้นกับระบบจำหน่ายทั้ง 2 ระบบ จะแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. คำนวณกำลังสูญเสียของระบบจำหน่ายในกรณีฐาน ตามโครงสร้างเดิมดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 6.1 และ 6.3 ตามลำดับ
2. ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้าไปในระบบจำหน่าย โดยระบุตำแหน่ง และจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต้องการติดตั้งดังกรณีศึกษาในตารางที่ 6.8 และ 6.10
3. ใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และตรวจสอบความถูกต้องของกำลังสูญเสียที่คำนวณจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยใช้โปรแกรม MATPOWER 3.0 คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และกำลังสูญเสียอีกครั้ง
4. เปรียบเทียบกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยขนาดกำลังการผลิตที่คำนวณได้จากโปรแกรม กับกำลังสูญเสียในกรณีฐาน เพื่อดูว่ากำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายลดลงได้คิดเป็นร้อยละเท่าใด
5. ทดสอบผลกระทบเนื่องจากเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกัน โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย เมื่อเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันเป็นดังกรณีศึกษาในตารางที่ 6.9 และ 6.11
6. พิจารณาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่มาจากเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกัน
7. สรุปผลการทดสอบ

6.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

ผลการทดสอบโปรแกรม และวิเคราะห์แบ่งตามระบบทดสอบ ได้แก่ ระบบทดสอบรอยบิลลินตัน บัส 2 และระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยในแต่ละระบบทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณีศึกษาหลัก กล่าวคือ การวิเคราะห์ผลของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1-3 เครื่อง และการวิเคราะห์ผลกระทบของเงื่อนไขลำดับการทำงานที่ถูกต้องของอุปกรณ์ป้องกัน ตามลำดับ

6.3.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ระบบ RBTS BUS2



รูปที่ 6.5 ระบบทดสอบ RBTS BUS2 และตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

6.3.1.1 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1-3 เครื่อง

การทดสอบโปรแกรมกับระบบ RBTS BUS 2 แบ่งเป็น 8 กรณีศึกษา โดยจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และตำแหน่งที่จะติดตั้งในระบบ RBTS BUS 2 ในแต่ละกรณีศึกษาแสดงไว้ดังตารางที่ 6.8 และรูปที่ 6.5

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ โปรแกรมนี้ คือ กำลังการผลิตจริง และกำลังการผลิตรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย และไม่ส่งผลกระทบต่อลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน กำลังสูญเสียที่คำนวณได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับกำลังสูญเสียในกรณีซึ่งไม่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (กรณีฐาน) สำหรับรายละเอียดผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณีต่างๆ สามารถดูได้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 6.8 ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบ RBTS BUS2

กรณี	จำนวน DG	ตำแหน่งติดตั้ง DG	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	P_{DG} รวม / ปริมาณความต้องการไฟฟ้ารวม (%)	กำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย (MW)	กำลังสูญเสียที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน (%)
ฐาน	0	-	-	-	-	0.530	-
1	1	A	5.95	4.88	29.77	0.4009	24.46
2	1	D	2.26	1.97	11.30	0.3896	26.58
3	2	C, D	0.81, 1.48	0.59, 1.34	11.46	0.3865	27.17
4	2	A, E	6.07, 2.21	4.96, 2.03	41.37	0.3228	39.16
5	2	D, E	2.20, 2.43	2.04, 1.76	23.13	0.3115	41.31
6	3	A, C, D	3.52, 1.45, 0.84	2.76, 1.38, 0.55	29.02	0.3583	32.47
7	3	B, C, D	0.59, 0.88, 0.89	0.81, 0.47, 0.45	11.82	0.3887	26.76
8	3	D, E, F	2.30, 2.11, 2.48	1.93, 2.13, 1.68	34.42	0.2173	59.05

จากผลการทดสอบที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.8 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1 เครื่องในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 พบว่า สามารถติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ (กรณีที่ 1) ได้ขนาดกำลังการผลิตมากกว่าติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ (กรณีที่ 2) แต่การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ (กรณีที่ 2) จะสามารถลดกำลังการสูญเสียในระบบจำหน่ายได้มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งบริเวณปลายสายป้อนจะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ความต้องการไฟฟ้าในบริเวณนั้นเป็นผลให้กำลังสูญเสียในระบบลดลงได้มากกว่า

สำหรับขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ได้น้อยนั้น ก็เนื่องมาจากเงื่อนไขลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่จำกัดกระแสผิดพลาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อไม่ให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด โดยปริมาณกระแสผิดพลาดจะแปรผันตามขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

นอกจากนี้ เมื่อทดสอบติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ในสายป้อนเส้นเดียวกัน และมีจำนวนเครื่องที่มากขึ้น ดังกรณีที่ 3 และกรณีที่ 7 พบว่า การติดตั้งการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 2 เครื่อง (กรณีที่ 3) สามารถลดกำลังสูญเสียได้มากกว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1 เครื่อง (กรณีที่ 2) เพราะตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกระจายตัว เป็นผลให้แหล่งผลิตไฟฟ้าและจุดโหลดมีระยะใกล้กันมากขึ้น จึงสามารถลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายได้มากกว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ตำแหน่งเดียว

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 3 เครื่อง (กรณีที่ 7) กลับลดกำลังสูญเสียได้น้อยกว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 2 เครื่อง (กรณีที่ 3) ทั้งนี้ เนื่องจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลายเครื่องบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ ทำให้กระแสผิตพร่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีปริมาณสูงขึ้น ดังนั้น เพื่อจำกัดขนาดกระแสผิตพร่องให้ เป็นไปตามเงื่อนไขลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันจึงต้องลดขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เป็นผลให้ลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายได้น้อยลงตามไปด้วย

ทั้งนี้ จากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 7 ได้ย้ายตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากตำแหน่ง B มายังตำแหน่ง A (กรณีที่ 6) พบว่า สามารถลดกำลังสูญเสียได้มากกว่า เนื่องจากตำแหน่ง A เป็นตำแหน่งที่อยู่หน้ารีโกลสเซอร์ จึงไม่ถูกเงื่อนไขลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันจำกัดขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กดังเช่นการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 7

สำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 4, 5 และ 8 นั้น เป็นการทดสอบติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1 เครื่องในสายป้อนแต่ละเส้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมสามารถหาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เมื่อมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในสายป้อนแต่ละเส้นได้ ทั้งนี้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแบบกระจายไปในสายป้อนแต่ละเส้นจะสามารถลดกำลังสูญเสียได้ดีกว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในสายป้อนเพียงเส้นเดียว ดังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 6 และ 7 จะเห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีจำนวนถึง 3 เครื่อง แต่สามารถกำลังสูญเสียได้เพียง 32.47 % และ 26.67 % ตามลำดับ ในขณะที่การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 2 เครื่องในกรณีที่ 4 และกรณีที่ 5 สามารถลดกำลังสูญเสียได้ถึง 39.16 % และ 41.31 % ตามลำดับ และการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 3 เครื่องในกรณีที่ 8 สามารถลดกำลังสูญเสียได้ 59.05 %

6.3.1.2 ผลกระทบจากเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

การทดสอบในส่วนนี้เพื่อศึกษาเงื่อนไขจำกัดการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันที่ส่งผลต่อขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม และกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายที่ลดลงได้ สำหรับเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันนี้แบ่งตามรูปแบบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 เงื่อนไข ได้แก่ เงื่อนไขการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กของรูปแบบที่ 1 – 3 เงื่อนไขการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กของรูปแบบที่ 4 และเงื่อนไขการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กของรูปแบบที่ 5

ขั้นตอนการทดสอบได้ใช้จำนวนและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากตารางที่ 6.8 มาทำการพิจารณาเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันในรูปแบบต่างๆ ดังตารางที่ 6.9 จากนั้นเปรียบเทียบกำลังสูญเสียในแต่ละกรณีของระบบจำหน่ายกับกรณีฐาน

ตารางที่ 6.9 เปรียบเทียบกำลังสูญเสียในระบบทดสอบ RBTS BUS 2 เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันกรณีต่างๆ

กรณี	ตำแหน่ง ติดตั้ง DG	กรณีผ่อนปรนเงื่อนไขของ อุปกรณ์ป้องกันทั้งหมด			กรณีพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขของ อุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1-3			กรณีพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขของ อุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1-4			กรณีพิจารณาเงื่อนไขของอุปกรณ์ ป้องกันรูปแบบ 1-5		
		P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)
1	A	5.9990	4.8337	0.40087 (24.46 %)	5.9971	4.8333	0.40088 (24.46 %)	5.9895	4.8418	0.40088 (24.46 %)	5.9544	4.8763	0.40087 (24.46 %)
2	D	3.4848	2.8056	0.37886 (28.61 %)	3.4996	2.7957	0.37886 (28.61 %)	3.4976	2.7881	0.37886 (28.61 %)	2.2597	1.9729	0.38961 (26.58 %)
3	C, D	3.3892, 0.8030	2.5935, 0.7401	0.36360 (31.48 %)	3.1308, 1.0124	2.4932, 0.8159	0.36368 (31.47 %)	3.1329, 0.9211	2.6372, 0.6820	0.36371 (31.46 %)	0.8081, 1.4842	0.5888, 1.3405	0.38648 (27.17 %)
4	A, E	6.0665, 3.2296	4.7670, 2.5651	0.31575 (40.50 %)	6.0437, 3.2165	4.8835, 2.5933	0.31580 (40.49 %)	5.9822, 3.1550	4.8824, 2.6215	0.31580 (40.49 %)	6.0688, 2.2057	4.9614, 2.0333	0.32284 (39.16 %)
5	D, E	3.5118, 3.1898	2.7951, 2.5959	0.29374 (44.65 %)	3.4748, 3.1881	2.8215, 2.5960	0.29374 (44.65 %)	3.5023, 3.2267	2.8005, 2.5639	0.29374 (44.65 %)	2.1964, 2.4307	2.0428, 1.7581	0.31145 (41.31 %)

ตารางที่ 6.9 เปรียบเทียบกำลังสูญเสียในระบบทดสอบ RBTS BUS 2 เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันกรณีต่างๆ (ต่อ)

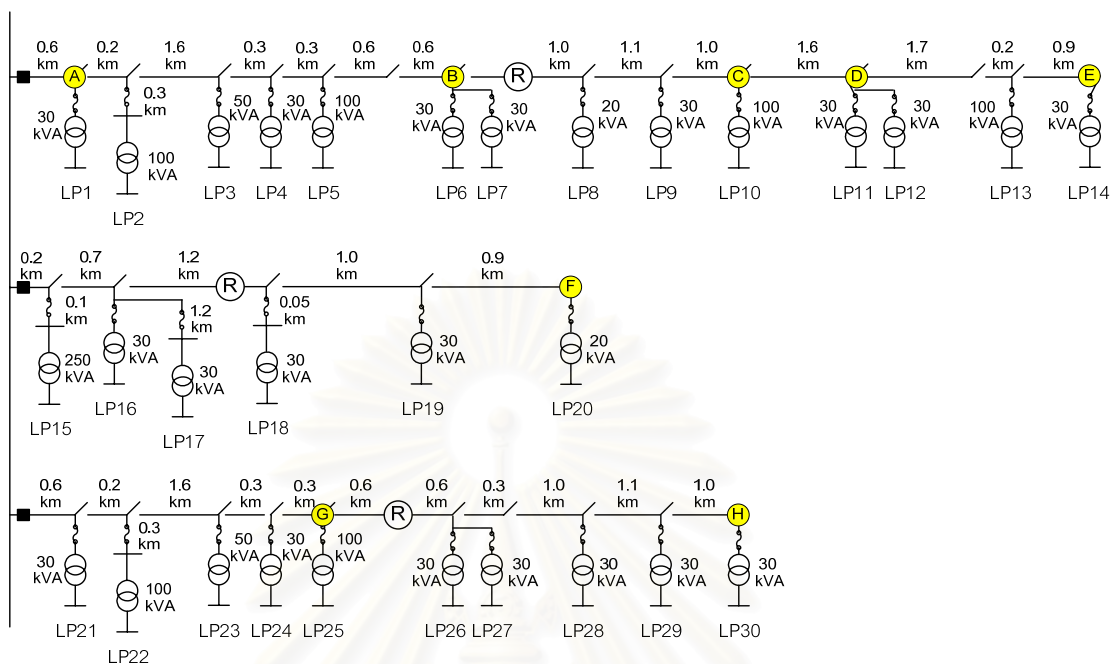
กรณี	ตำแหน่ง ติดตั้ง DG	กรณีผ่อนปรนเงื่อนไขของ อุปกรณ์ป้องกันทั้งหมด			กรณีพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขของ อุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1-3			กรณีพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขของ อุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1-4			กรณีพิจารณาเงื่อนไขของอุปกรณ์ ป้องกันรูปแบบ 1-5		
		P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)
6	A, C, D	2.5925,	2.1631,	0.35425 (33.24 %)	2.5864,	2.0095,	0.35425 (33.24 %)	2.7037,	2.1040,	0.35426 (33.24 %)	3.5211,	2.7558,	0.35833 (32.47 %)
		2.5171,	2.3244,		2.5491,	2.3543,		2.5704,	1.7937,		1.4458,	1.3816,	
		0.8126	0.3086		0.7811	0.3367		0.7104	0.8225		0.8368	0.5474	
7	B, C, D	2.7143,	2.1495,	0.35405 (33.28 %)	2.6338,	2.2269,	0.35405 (33.28 %)	2.5474,	1.9512,	0.35405 (33.28 %)	0.5907,	0.8062,	0.38867 (26.76 %)
		1.6281,	1.3465,		1.8435,	1.2715,		1.8871,	1.4177,		0.8834,	0.4682,	
		0.7501	0.5964		0.5877	0.5945		0.6331	0.6327		0.8908	0.4542	
8	D, E, F	3.5252,	2.8232,	0.18603 (64.94 %)	3.4001,	2.8360,	0.18609 (64.93 %)	3.3569,	2.8386,	0.18608 (64.93 %)	2.2995,	1.9261,	0.21733 (59.05 %)
		3.2294,	2.6139,		3.2282,	2.5587,		3.1825,	2.6074,		2.1069,	2.1265,	
		3.6190	2.9165		3.5040	2.9104		3.5879	2.9022		2.4786	1.6849	

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 6.9 พบว่า เงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันทุกรูปแบบที่พิจารณา นี้ไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณหน้ารีโกลสเซอร์ ซึ่งสอดคล้องกับที่ควรจะเป็นดังผลการสอบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีที่ 1, 4 และ 6 อย่างไรก็ตาม การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 6 จะสังเกตเห็นว่า ในกรณีพิจารณาเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1 - 5 ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งบริเวณหน้ารีโกลสเซอร์ (ตำแหน่ง A) มีค่ามากขึ้นกว่าขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีพิจารณาเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆ เนื่องจากขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกัน ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ตำแหน่ง A ซึ่งไม่ถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันจึงเพิ่มขนาดกำลังการผลิตเท่าที่เหมาะสม เพื่อชดเชยกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ที่ถูกจำกัดไว้

จากผลการทดสอบเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบต่างๆ พบว่า เงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันที่ส่งผลต่อขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายเด่นชัดที่สุด คือ เงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 5 ซึ่งเป็นเงื่อนไขของการเกิดความผิดพลาดที่สายป้อนคนละเส้นกับสายป้อนที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากกระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะไหลย้อนผ่านรีโกลสเซอร์ และหากกระแสผิดพลาดมีปริมาณมากพอจะทำให้รีโกลสเซอร์ทำงาน เป็นผลให้ผู้ใช้ไฟฟ้าบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ ประสบไฟฟ้ากระแสปรกติ ดังนั้น เพื่อให้ปริมาณกระแสผิดพลาดที่ไหลย้อนมีปริมาณน้อย และรีโกลสเซอร์ของสายป้อนที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทำงานช้ากว่า รีโกลสเซอร์ในสายป้อนที่เกิดความผิดพลาดจึงต้องจำกัดขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ.



รูปที่ 6.6 ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. และตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

6.3.2.1 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1-3 เครื่อง

การทดสอบโปรแกรมกับระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแบ่งเป็น 9 กรณีศึกษา โดยจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และตำแหน่งที่จะติดตั้งในระบบทดสอบในแต่ละกรณีศึกษาแสดงไว้ดังตารางที่ 6.10 และรูปที่ 6.6 การเลือกตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในตารางที่ 6.10 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะว่าโปรแกรมสามารถติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้มากกว่า 1 เครื่อง และตำแหน่งอยู่ในสายป้อนใดก็ได้

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ โปรแกรมกับระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. แสดงไว้ในตารางที่ 6.10 สำหรับรายละเอียดผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณีต่างๆ สามารถดูได้ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 6.10 ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบทดสอบที่ตัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ.

กรณี	จำนวน DG	ตำแหน่งติดตั้ง DG	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	P _{DG} รวม / ปริมาณความต้องการไฟฟ้ารวม (%)	กำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย (MW)	กำลังสูญเสียที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน (%)
ฐาน	0	-	-	-	-	0.1061	-
1	1	A	0.96	1.00	40.70	0.0942	11.23
2	1	B	0.85	0.74	35.89	0.0923	12.98
3	1	E	0.29	0.28	12.12	0.0928	12.54
4	2	A, E	0.87, 0.32	0.72, 0.24	50.37	0.0925	12.85
5	2	B, G	0.86, 0.54	0.75, 0.49	58.75	0.0916	13.63
6	2	C, F	0.30, 0.17	0.27, 0.08	19.76	0.0929	12.49
7	3	A, B, E	0.31, 0.52, 0.30	0.19, 0.48, 0.27	47.75	0.0917	13.58
8	3	C, D, E	0.07, 0.07, 0.07	0.07, 0.07, 0.07	8.78	0.0932	12.16
9	3	E, F, H	0.30, 0.12, 0.29	0.26, 0.13, 0.26	29.65	0.0922	13.09

จากตารางที่ 6.10 ทดสอบติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1 เครื่องที่บริเวณต้นสายป้อน (กรณีที่ 1) บริเวณกลางสายป้อนหน้ารีโกลสเซอร์ (กรณีที่ 2) และบริเวณปลายสายป้อน (กรณีที่ 3) จะสังเกตเห็นว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณกลางสายป้อนหน้ารีโกลสเซอร์ (กรณีที่ 2) สามารถลดกำลังสูญเสียได้ 12.98 % ซึ่งมากที่สุด ใน 3 กรณีนี้

การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณกลางสายป้อนหน้ารีโกลสเซอร์ มีข้อดีว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณต้นสายป้อน หรือบริเวณปลายสายป้อน คือ ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งบริเวณหน้ารีโกลสเซอร์จะไม่ถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน ในขณะที่เดียวกันการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณกลางสายป้อนช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังบริเวณปลายสายป้อนได้ดีกว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณต้นสายป้อน ด้วยข้อดีทั้ง 2 ประการนี้ ทำให้การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 2 สามารถลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายได้มากที่สุด เมื่อกำหนดถึงลำดับการทำงานที่ถูกต้องของอุปกรณ์ป้องกัน

การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 7 และ 8 เพื่อทดสอบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวนหลายเครื่องในสายป้อนเส้นเดียวกัน การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 7 เป็นการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 3 เครื่องแบบกระจายทั่วสายป้อน คือ บริเวณต้นสายป้อน (ตำแหน่ง A) บริเวณกลางสายป้อนหน้ารีโกลสเซอร์ (ตำแหน่ง B) และบริเวณปลายสายป้อน (ตำแหน่ง E) ในขณะที่การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 8 เป็นการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 3 เครื่องในตำแหน่งใกล้ๆ กันบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 6.11 แสดงให้เห็นว่า การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 7 สามารถลดกำลังสูญเสียได้มากกว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 8 ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบในระบบ RBTS BUS 2 ที่ผ่านมา

สำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่ 4 - 6 และ 9 นั้น เป็นการทดสอบติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1 เครื่องในสายป้อนแต่ละเส้น โดยกรณีที่ 4 - 6 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 2 เครื่อง ส่วนกรณีที่ 9 นั้นติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 3 เครื่อง จากผลการทดสอบสามารถเรียงลำดับกรณีติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถลดกำลังการสูญเสียในระบบจำหน่ายจากมากไปน้อย ได้แก่ กรณีที่ 5 กรณีที่ 9 กรณีที่ 4 และกรณีที่ 6 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไม่จำเป็นต้องเป็นบริเวณปลายสายป้อนเสมอไป ตำแหน่งที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างของระบบจำหน่ายนั้น

6.3.2.2 ผลกระทบจากเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

การทดสอบผลกระทบเนื่องจากเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทำเช่นเดียวกับ กรณีระบบทดสอบ RBTS BUS 2 โดยขั้นตอนการทดสอบได้ใช้จำนวนและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากตารางที่ 6.11 มาทำการพิจารณาเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันในรูปแบบต่างๆ ดังตารางที่ 6.12 จากนั้นเปรียบเทียบกำลังสูญเสียในแต่ละกรณีของระบบจำหน่ายกับกรณีฐาน

ตารางที่ 6.11 เปรียบเทียบกำลังสูญเสียในระบบทดสอบที่ตัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันกรณีต่างๆ

กรณี	ตำแหน่งติดตั้ง DG	กรณีผ่อนปรนเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันทั้งหมด			กรณีพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1-3			กรณีพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1-4			กรณีพิจารณาเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1-5		
		P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย (MW)
1	A	1.1663	0.9608	0.094182 (11.23 %)	1.1133	0.9078	0.09418 (11.23 %)	0.9902	0.9838	0.09419 (11.23 %)	0.9646	0.9993	0.09419 (11.23 %)
2	B	0.8714	0.7371	0.09233 (12.98 %)	0.8708	0.7180	0.09233 (12.98 %)	0.8482	0.7454	0.09233 (12.98 %)	0.8505	0.7411	0.09233 (12.98 %)
3	E	0.5191	0.4416	0.09231 (13.00 %)	0.5490	0.4285	0.09231 (13.00 %)	0.4971	0.4551	0.09231 (13.00 %)	0.2872	0.2750	0.09279 (12.54 %)
4	A, E	0.6824, 0.4802	0.5515, 0.4200	0.09212 (13.17 %)	0.6465, 0.5075	0.5466, 0.4029	0.09213 (13.17 %)	0.6361, 0.5037	0.5991, 0.3825	0.09213 (13.16 %)	0.8718, 0.3220	0.7229, 0.2353	0.09247 (12.85 %)
5	B, G	0.8533, 0.5415	0.7514, 0.4703	0.09164 (13.63 %)	0.8440, 0.5615	0.7605, 0.4698	0.09164 (13.63 %)	0.8673, 0.5623	0.7447, 0.4685	0.09164 (13.63 %)	0.8566, 0.5358	0.7510, 0.4855	0.09164 (13.63 %)
6	C, F	0.4784, 0.2281	0.4422, 0.1627	0.09176 (13.51 %)	0.5230, 0.1893	0.4016, 0.1886	0.09177 (13.51 %)	0.4774, 0.2322	0.4104, 0.1856	0.09177 (13.50 %)	0.2962, 0.1722	0.2684, 0.0769	0.09285 (12.49 %)

ตารางที่ 6.11 เปรียบเทียบกำลังสูญเสียในระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันกรณีต่างๆ (ต่อ)

กรณี	ตำแหน่ง ติดตั้ง DG	กรณีผ่อนปรนเงื่อนไขของ อุปกรณ์ป้องกันทั้งหมด			กรณีพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขของ อุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1-3			กรณีพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขของ อุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1-4			กรณีพิจารณาเงื่อนไขของอุปกรณ์ ป้องกันรูปแบบ 1-5		
		P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสีย ในระบบ จำหน่าย (MW)
7	A, B, E	0.2960, 0.5109, 0.3318	0.2451, 0.4217, 0.2774	0.09167 (13.60 %)	0.3387, 0.4678, 0.3426	0.2525, 0.4549, 0.2506	0.09167 (13.60%)	0.2719, 0.4750, 0.3324	0.2419, 0.4558, 0.2615	0.09167 (13.60 %)	0.3090, 0.5240, 0.2986	0.1850, 0.4779, 0.2661	0.09169 (13.58 %)
8	C, D, E	0.3460, 0.2264, 0.1360	0.2871, 0.1768, 0.1295	0.09176 (13.52 %)	0.3982, 0.1120, 0.1908	0.2960, 0.1802, 0.1000	0.09176 (13.52 %)	0.3951, 0.1576, 0.1536	0.2510, 0.1784, 0.1405	0.09176 (13.52 %)	0.0702, 0.0679, 0.0700	0.0709, 0.0686, 0.0695	0.09320 (12.16 %)
9	E, F, H	0.5153, 0.1423, 0.2855	0.4474, 0.1256, 0.2551	0.09173 (13.55 %)	0.5292, 0.1581, 0.2849	0.4429, 0.1144, 0.2373	0.09174 (13.54 %)	0.5205, 0.1726, 0.2842	0.4323, 0.1190, 0.2565	0.09174 (13.54 %)	0.2998, 0.1152, 0.2877	0.2643, 0.1291, 0.2607	0.09222 (13.09 %)

ในทำนองเดียวกับกับการทดสอบกับระบบ RBTS BUS 2 ผลการทดสอบตารางที่ 6.13 แสดงให้เห็นว่า เงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันทุกรูปแบบที่พิจารณานี้ไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณหน้ารีโกลสเซอร์

สำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ พบว่า เงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 5 ส่งผลกระทบต่อขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กโดยเงื่อนไขดังกล่าวนี้มีผลจำกัดขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ เนื่องจากกระแสผิดพลาดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะไหลย้อนผ่านรีโกลสเซอร์ และหากกระแสผิดพลาดมีปริมาณมากพอจะทำให้รีโกลสเซอร์ทำงาน เป็นผลให้ผู้ใช้งานบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ประสบไฟฟ้ากระพริบได้

จากผลการทดสอบเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบต่างๆ พบว่า เงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันที่ส่งผลกระทบต่อขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายเด่นชัดที่สุด คือ เงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 5 ซึ่งเป็นเงื่อนไขของการเกิดความผิดพลาดที่สายป้อนคนละเส้นกับสายป้อนที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

6.4 วิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึม

สมรรถนะของการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และคุณภาพของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การกำหนดประชากรเริ่มต้น ฟังก์ชันประเมินความเหมาะสม และการดำเนินการทางพันธุศาสตร์ เป็นต้น สำหรับการปรับตั้งค่าเพื่อให้ได้สมรรถนะ และคุณภาพของผลเฉลยให้ดีขึ้นขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของปัญหาที่ต้องการหาผลเฉลย

สำหรับการแก้ปัญหาลำดับกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายในที่นี้ พบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของผลเฉลย ได้แก่ การกำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น ฟังก์ชันสำหรับประเมินค่าความเหมาะสม จำนวนรอบในการดำเนินการทางพันธุกรรม การกำหนดจำนวนประชากรจะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรของผลเฉลยที่ต้องการหา หากตัวแปรของผลเฉลยมีจำนวนมาก ก็ต้องกำหนดจำนวนประชากรมากให้มากขึ้นไปด้วย จำนวนประชากรที่นิยมกำหนดมีค่าอยู่ในช่วงหลักร้อยถึงหลักพัน ตัวอย่างเช่น การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1, 2 และ 3 เครื่องได้กำหนดประชากรเริ่มต้นเป็นจำนวน 1000, 2000 และ 3000 โครโมโซมตามลำดับ สำหรับฟังก์ชันการประเมินค่าความเหมาะสมนั้นมีความสำคัญในการคัดเลือกโครโมโซมที่มีโอกาสอยู่รอดในรุ่นถัดไป โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์ ร่วมกับการปรับค่าความเหมาะสมกรณีที่โครโมโซมนั้นไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจำกัด อย่างไรก็ดี เพื่อพัฒนาสมรรถนะขั้นตอนวิธีพันธุกรรม สามารถคิดฟังก์ชันประเมินความ

เหมาะสมใหม่ให้มีความเหมาะสมกับปัญหามากขึ้น เช่น การเพิ่มเงื่อนไขจำกัดรวมไปในฟังก์ชัน ประเมินค่าความเหมาะสม นอกจากนี้ ในส่วนจำนวนรอบการดำเนินการทางพันธุกรรมนั้น การเพิ่มจำนวนรอบจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดประชากรใหม่ที่ดีขึ้นในรุ่นต่อไป

6.5 การประยุกต์ใช้โปรแกรมในการวางแผนใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อรองรับการเจริญเติบโตของความต้องการไฟฟ้า

ความต้องการไฟฟ้าในอนาคตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพื่อยืดระยะเวลาในการสร้างโรงผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ การนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง โดยสามารถประยุกต์โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้เพื่อการวางแผนกำหนดขนาดกำลังการผลิตโดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะสามารถเข้ามาเชื่อมโยงกับระบบจำหน่ายได้โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านลบต่อการทำงานเชิงเทคนิคของระบบจำหน่ายนั้น เมื่อความต้องการใช้ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

ในที่นี้ เนื่องจากความต้องการไฟฟ้าในแต่ละจุดโหนดอาจไม่ได้มีการเพิ่มขึ้นในอัตราเดียวกัน ในขณะที่บางจุดโหนดเพิ่มขึ้น บางจุดโหนดอาจลดลง ด้วยลักษณะการเพิ่มลดของความต้องการไฟฟ้าเช่นนี้ โปรแกรมจึงออกแบบให้สามารถกำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นและลดลงในแต่ละจุดโหนดได้

สำหรับการทดสอบในส่วนของการเปลี่ยนแปลงใช้ไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงไป จะทำการสุ่มให้แต่ละจุดโหนดมีความต้องการไฟฟ้าแบ่งเป็น 4 ระดับ คือ 110 %, 100 %, 60 % และ 30 % ของความต้องการไฟฟ้าสูงสุด ณ ปัจจุบัน จากนั้นใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อรองรับในแต่ละลักษณะความต้องการไฟฟ้า

เมื่อทำการทดสอบใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการวางแผนใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อรองรับการเจริญเติบโตของความต้องการไฟฟ้ากับระบบทดสอบ RBTS BUS 2 และระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6.12 และตารางที่ 6.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.12 ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบทดสอบ RBTS BUS 2 เมื่อพิจารณาการเติบโตของความต้องการไฟฟ้า กรณีติดตั้ง DG ที่ตำแหน่ง D

ลักษณะความต้องการไฟฟ้า	ปริมาณความต้องการไฟฟ้ารวม (MW)	อัตราการใช้ไฟฟ้า	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสียในระบบ (MW)
1	12.0004	1.00	2.0719	1.6876	0.1331
2	13.1248	1.09	2.6998	2.1660	0.1548
3	14.6321	1.22	2.3379	1.8733	0.2294
4	16.5721	1.38	3.0823	2.5078	0.2948
5	17.8484	1.49	3.2532	2.6249	0.2994
6	20.0006	1.67	2.2597	1.9729	0.3896
7	22.0007	1.83	3.8475	3.0780	0.4613

ตารางที่ 6.13 ผลการทดสอบโปรแกรมระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ. เมื่อพิจารณาการเติบโตของความต้องการไฟฟ้า กรณีติดตั้ง DG ที่ตำแหน่ง E

ลักษณะความต้องการไฟฟ้า	ปริมาณความต้องการไฟฟ้ารวม (MW)	อัตราการใช้ไฟฟ้า	P ของ DG (MW)	Q ของ DG (MVAR)	กำลังสูญเสียในระบบ (MW)
1	1.4220	1.00	0.2698	0.2653	0.0315
2	1.6710	1.18	0.2848	0.2598	0.0586
3	1.7340	1.22	0.2879	0.2770	0.0660
4	1.8480	1.30	0.3048	0.2370	0.0624
5	1.9620	1.38	0.3125	0.2495	0.0755
6	2.3700	1.67	0.2872	0.2750	0.0928
7	2.6070	1.83	0.3138	0.2481	0.1141

จากตารางที่ 6.12 พบว่าเมื่อปริมาณความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถติดตั้งในระบบจำหน่ายต้องเพิ่มขนาดมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการสุ่มให้ความต้องการไฟฟ้าในแต่ละจุดมี 4 ระดับ ซึ่งอาจมีผลให้สายส่งที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเส้นมีปริมาณความต้องการที่เพิ่มขึ้น ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต่ออยู่กับสายส่งเส้นนั้นจึงสามารถเชื่อมโยงได้ในปริมาณที่มาก และในทาง

กลับกันหากสายส่งที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีปริมาณความต้องการที่ลดลง ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถติดตั้งในสายส่งเส้นนั้นได้ก็จะมีขนาดลดลงด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 6.13 พบว่า สำหรับระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ถึงแม้ความต้องการไฟฟ้าจะมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถเชื่อมโยงกับระบบจำหน่ายเพิ่มสูงขึ้นได้ในปริมาณไม่มากนัก และในบางกรณีปริมาณกำลังการผลิตโดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีค่าลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบที่มีผลให้เงื่อนไขอุปกรณ์ป้องกันจำกัดขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กนั้น

จากการทดสอบผลกระทบเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันพบว่าเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบที่ 5 มีผลในการจำกัดขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากกระแสผิดพ่วงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะไหลย้อนผ่านรีโกลสเซอร์ และหากกระแสผิดพ่วงมีปริมาณมากพอจะทำให้รีโกลสเซอร์ ดังนั้น เพื่อรองรับการเจริญเติบโตของความต้องการไฟฟ้าปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนรีโกลสเซอร์ให้เป็นรีโกลสเซอร์ที่ตรวจจับทิศทางของกระแสผิดพ่วงได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุป และข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เมื่อมีการระบุจำนวน และตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ทำการติดตั้ง

สำหรับโปรแกรมแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดในการหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้พัฒนาขึ้นมาจากโปรแกรมการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม (Genetic Algorithm Optimization Toolbox) [26] ร่วมกับโปรแกรม MATPOWER 3.0 [27] ภายใต้การใช้งานบนโปรแกรม MATLAB รุ่น 6.5 ทดสอบสมรรถนะของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับระบบทดสอบรอยบิลลินตัน บัส 2 และระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยในแต่ละระบบทดสอบแบ่งเป็น 3 กรณีศึกษา คือ ผลจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1-3 เครื่อง การทดสอบผลกระทบของเงื่อนไขลำดับการทำงานที่ถูกต้องของอุปกรณ์ป้องกันแต่ละแบบต่อสมรรถนะในการลดกำลังสูญเสียในระบบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และผลของความไม่แน่นอนของความต้องการไฟฟ้าต่อขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่ในระบบจำหน่าย ณ ตำแหน่งต่างๆ

จากการศึกษาวิจัยข้างต้นสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

โปรแกรมที่นำเสนอนี้ สามารถคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้อย่างเหมาะสม ทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายลดลงได้ และไม่ส่งผลกระทบต่อลำดับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน เมื่อมีการระบุจำนวน และตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

หากแบ่งตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเป็นบริเวณหน้ารีโกลสเซอร์ และบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ พบว่า สามารถติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณหน้ารีโกลสเซอร์ได้ขนาดกำลังการผลิตมากกว่าติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ เนื่องจากข้อจำกัดของเงื่อนไขลำดับการทำงานที่ถูกต้องของอุปกรณ์ป้องกัน ทำให้ขนาดกำลังการผลิตของ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ถูกจำกัด ทั้งนี้ หากตำแหน่งเหมาะสมในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอยู่บริเวณหลังรีโกลสเซอร์ การถูกจำกัดขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอาจทำให้เสียโอกาสใช้ตำแหน่งนั้นได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

จากผลการทดสอบเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบต่างๆ พบว่า เงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันที่ส่งผลต่อขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายเด่นชัดที่สุด คือ เงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 5 ซึ่งเป็นเงื่อนไขของการเกิดความผิดปกติที่สายป้อนคนละเส้นกับสายป้อนที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

เนื่องจากเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 5 นี้ รีโกลสเซอร์ในสายป้อนที่เกิดความผิดปกติต้องทำงานเร็วกว่ารีโกลสเซอร์ของสายป้อนที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก แต่ความล่าช้าอยู่ที่รีโกลสเซอร์ในสายป้อนที่เกิดความผิดปกติจะกำจัดความผิดปกติได้อย่างถาวรเมื่อเป็นจังหวะการทำงานซ้ำ ในขณะที่รีโกลสเซอร์ของสายป้อนที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต้องไม่ทำงานเลย ดังนั้น กระแสผิดปกติจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ไหลย้อนผ่านรีโกลสเซอร์ต้องมีปริมาณน้อย มิฉะนั้น ผู้ใช้ไฟฟ้าบริเวณหลังรีโกลสเซอร์จะประสบไฟฟ้ากระพริบ อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบกับระบบทดสอบทั้ง 2 ระบบ พบว่า ผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทำให้การลดกำลังสูญเสียในระบบทดสอบลดลงไม่เกิน 10 %

การทดสอบผลของเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1-3 และเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 4 กับระบบทดสอบ RTBTS BUS 2 และระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พบว่า เงื่อนไขทั้งสองไม่มีผลต่อขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากกรณีละเลยเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันทั้งหมด ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีขนาดไม่มาก ดังนั้น เมื่อทดสอบปริมาณกระแสผิดปกติจึงสอดคล้องกับเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 1-3 และเงื่อนไขของอุปกรณ์ป้องกันรูปแบบ 4 อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขทั้ง 2 นี้มีโอกาสส่งผลต่อระบบจำหน่ายอื่นๆ ได้

ความไม่แน่นอนของความต้องการไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อขนาดกำลังการผลิตโดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ รวมถึงกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายที่สามารถลดลงได้ นอกจากนี้ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้หาขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการวางแผนขยายกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เมื่อความต้องการไฟฟ้ามีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นในอนาคต

7.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไปในอนาคต

โปรแกรมแก้ปัญหาการหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กใช้เวลาในการคำนวณในแต่ละกรณีอยู่ประมาณ 15-30 นาที ถ้าระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้น มีบัสจำนวนมาก และต้องการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวนหลายเครื่องก็จะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณนานขึ้น การปรับปรุงเวลาที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และคุณภาพของผลเฉลยที่ได้ควรพิจารณากระบวนการต่างๆ เช่น การกำหนดประชากรเริ่มต้น ฟังก์ชันประเมินความเหมาะสม และการดำเนินการทางพันธุศาสตร์ เป็นต้น

ข้อจำกัดของโปรแกรมอีกประการหนึ่งคือ โปรแกรมใช้ทดสอบได้เฉพาะระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างแบบเรเดียล ดังนั้นในอนาคตอาจมีการพัฒนาโปรแกรมต่อไปให้สามารถใช้กับระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างแบบอื่น แต่ต้องพิจารณาด้วยว่าผลกระทบต่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบประเภทนั้นมีลักษณะเป็นอย่างไร

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการหาขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อจุดประสงค์ในการลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย และคำนึงถึงผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติ ยังมีประเด็นปัญหาที่เกิดจากการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้ามาในระบบจำหน่ายที่ควรได้รับการแก้ไข เช่น ปัญหาความไม่แน่นอนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ปัญหาความไม่แน่นอนของความต้องการไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้น ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้ามาในระบบจำหน่ายสามารถก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่ระบบการผลิตและการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] IEEE std 1547-2003, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems.
- [2] อนุบุตร สง่าราศรี, ชรินรัตน์ พานิชชาติ, สุรัชชัย ชัยทัศนีย์, แนบบุญ หุนเจริญ, และบัณฑิต เอื้ออากรณ์. การศึกษาผลกระทบของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กต่อกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 (2546) : 69-74
- [3] F.C. Lambert, H.B. Puttgen, P.R. MacGrego. Distributed Generation : Semantic Hype The Dawn of A New Era?. IEEE Power and Energy Magazine 1 (2003) : 22-29
- [4] Choi Joon-Ho, Kim Jae-Chul. Network Reconfiguration at the Power Distribution System With Dispersed Generations for Loss Reduction. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 4 (2000) : 2363-2367
- [5] ชรินรัตน์ พานิชชาติ. กำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยแนวทางเชิงกำหนด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [6] ภรต อินทรเทศ. ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายที่มีต่อการป้องกันและความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [7] G. Carpinelli, G. Celli, F. Pilo, A. Russo. Distributed Generation Siting and Sizing under Uncertainty. Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto. 4 (Sep 2001) : 7
- [8] G. Celli, F. Pilo. Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks. Power Industry Computer Applications. (2001) : 81-86.
- [9] M. Mardaneh, G. B. Gharehpetian. Siting and Sizing of DG Units Using GA and OPF Based Technique. TENCON IEEE Region 10 Conference 3 (Nov. 2004) : 331-334
- [10] K. Nara, Y. Hayashi, K. Ikeda, T. Ashizawa. Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators. Power Engineering Society Winter Meeting 2 (2001) : 918-923
- [11] T. Hoff, D. S. Shugar. The Value of Grid-Support Photovoltaics in Reducing Distribution System Losses. IEEE Transactions on Energy Conversion 10 (Sep 1995) : 569 – 576

- [12] M. Gandomkar, M. Vakilian, M. Ehsan. Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Network Using Hereford Ranch Algorithm. Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS. 2 (Sept. 2005) : 916–918
- [13] N. S. Rau, Yih-Heui Wan. Optimum Location of Resources in Distributed Planning. IEEE Transactions on Power Systems 9 (Nov 1994) : 2014–2020
- [14] P. Chiradeja. Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis. Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific IEEE/PES (Aug. 2005) : 1 – 5.
- [15] P.P. Barker, R.W. De Mello. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems. I. Radial distribution systems. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 3 (2000) : 1645-1656
- [16] A. Girgis, S. Brahma. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system. 2001 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, LESCOPE '01 (July 2001) : 115 - 119
- [17] S. Chaitusaney, A. Yokoyama. Impact of Protection Coordination on Sizes of Several Distributed Generation Sources. The 7th International Power Engineering Conference, IPEC. (Nov. 2005) : 669-674
- [18] R. C. Dugan, T. E. Mcdermott. Operating Conflicts for Distributed Generation on Distribution Systems. IEEE Rural Electric Power Conference (2001) : A3/1 -A3/6.
- [19] R. C. Dugan. Distributed Resources and Reliability of Distribution Systems. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting (July 2002) : 106 – 108.
- [20] M. T. Doyle. Reviewing the Impacts of Distributed Generation on Distribution System Protection. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 1 (July 2002) : 103 – 105.
- [21] D. E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning. Addison-Wesley Professional, 1989.
- [22] Z. Michalewicz. Genetic Algorithm + Data Structure = Evolution Programs. Springer Verlag, 1992.
- [23] J. Joines, M. Kay, C. Houck. A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation. NCSU-IE Technical Report 95-09 (1995).

- [24] T. Bouktir, L. Slimani, M. Belkacemi. A Genetic Algorithm for Solving the Optimal Power Flow Problem. Leonardo Journal of Sciences 4 (2004) : 44-58
- [25] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, L. Goel, K. S. So. A Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Distribution System Data and Results. IEEE Transaction on Power Systems 6 (May1991) : 813-820.
- [26] <http://www.ise.ncsu.edu/mirage/GAToolBox/gaot/>
- [27] <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ข้อมูลป้อนเข้าของระบบทดสอบ

ภาคผนวก ก จะแสดงรายละเอียดของข้อมูลป้อนเข้าของระบบทดสอบที่ใช้ในบทที่ 6 ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่ง

ข้อมูลบัสประกอบด้วย

1. bus no หมายเลขบัส
2. bus type ชนิดของบัส
โหนดบัส = 1
บัสควบคุมแรงดัน = 2
บัสอ้างอิง = 3
3. Pd ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจริง (MW)
4. Qd ความต้องการพลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)
5. Vm ขนาดแรงดัน (p.u.)
6. Va มุมของแรงดัน (degrees)
7. baseKV แรงดันฐาน (kV)
8. maxVm ขนาดแรงดันสูงสุด (p.u.)
9. minVm ขนาดแรงดันต่ำสุด (p.u.)

ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วย

1. bus no. บัสที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. Pg กำลังการผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MW)
3. Qg กำลังการผลิตรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MVar)
4. Qmax กำลังการผลิตรีแอกทีฟสูงสุด (MVar)
5. Qmin กำลังการผลิตรีแอกทีฟต่ำสุด (MVar)
6. Vg แรงดันของบัสที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)
7. status สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
1 – จ่ายกำลังไฟฟ้าได้
0 – ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้

8. Pmax กำลังการผลิตจริงสูงสุด (MW)
9. Pmin กำลังการผลิตจริงต่ำสุด (MW)

ข้อมูลสายส่งประกอบด้วย

1. f บัสต้นทาง
2. t บัสปลายทาง
3. r ความต้านทานของสายส่ง (p.u.)
4. x รีแอกแตนซ์ของสายส่ง (p.u.)
5. b โหลดชาร์จจัสเซปแตนซ์ (Line Charging Susceptance) ของสายส่ง (p.u.)
6. ratio อัตราส่วนออฟนอมินัลของหม้อแปลง (Transformer Off Nominal Turns Ratio) มีค่าเท่ากับ 0 สำหรับสายส่ง
7. angle มุมเฟสชิฟท์ของหม้อแปลง (Transformer Phase Shift Angle) (degrees)
8. status สถานะของสายส่ง
 - 1 – ใช้งานได้
 - 0 – ไม่สามารถใช้งานได้

ข้อมูลป้อนเข้าจะแสดงอยู่ในรูปของตาราง แบ่งเป็น 2 ระบบทดสอบ คือ ระบบทดสอบ RBTS BUS 2 และระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยข้อมูลป้อนเข้าจะเป็นข้อมูลกรณีที่ยังไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (กรณีฐาน)

ก.1 ระบบทดสอบ RBTS BUS 2

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัส ระบบทดสอบ RBTS BUS 2

bus no	type	Pd	Qd	Vm	Va	baseKV	maxVm	minVm
1	3	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
2	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
3	1	0.8668	0.6934	0	0	11	1.05	0.95
4	1	0.8668	0.6934	0	0	11	1.05	0.95
5	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
6	1	0.8668	0.6934	0	0	11	1.05	0.95
7	1	0.9167	0.7334	0	0	11	1.05	0.95
8	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัส ระบบทดสอบ RBTS BUS 2 (ต่อ)

bus no	type	Pd	Qd	Vm	Va	baseKV	maxVm	minVm
9	1	0.9167	0.7334	0	0	11	1.05	0.95
10	1	0.7500	0.6000	0	0	11	1.05	0.95
11	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
12	1	0.7500	0.6000	0	0	11	1.05	0.95
13	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
14	1	1.6279	1.3023	0	0	11	1.05	0.95
15	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
16	1	1.8721	1.4977	0	0	11	1.05	0.95
17	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
18	1	0.8668	0.6934	0	0	11	1.05	0.95
19	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
20	1	0.8668	0.6934	0	0	11	1.05	0.95
21	1	0.7291	0.5833	0	0	11	1.05	0.95
22	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
23	1	0.9167	0.7334	0	0	11	1.05	0.95
24	1	0.9167	0.7334	0	0	11	1.05	0.95
25	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
26	1	0.7500	0.6000	0	0	11	1.05	0.95
27	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
28	1	0.7500	0.6000	0	0	11	1.05	0.95
29	1	0.7291	0.5833	0	0	11	1.05	0.95
30	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
31	1	0.7291	0.5833	0	0	11	1.05	0.95
32	1	0.7291	0.5833	0	0	11	1.05	0.95
33	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
34	1	0.9167	0.7334	0	0	11	1.05	0.95
35	1	0.0000	0.0000	0	0	11	1.05	0.95
36	1	0.9167	0.7334	0	0	11	1.05	0.95
37	1	0.7500	0.6000	0	0	11	1.05	0.95

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบทดสอบ RBTS BUS 2

bus no	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	status	Pmax	Pmin
1	0	0	999	-999	1	1	0	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0
16	0	0	999	-999	1	0	0	0
17	0	0	999	-999	1	0	0	0
18	0	0	999	-999	1	0	0	0
19	0	0	999	-999	1	0	0	0
20	0	0	999	-999	1	0	0	0
21	0	0	999	-999	1	0	0	0
22	0	0	999	-999	1	0	0	0
23	0	0	999	-999	1	0	0	0
24	0	0	999	-999	1	0	0	0
25	0	0	999	-999	1	0	0	0
26	0	0	999	-999	1	0	0	0
27	0	0	999	-999	1	0	0	0
28	0	0	999	-999	1	0	0	0
29	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบทดสอบ RBTS BUS 2 (ต่อ)

bus no	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	status	Pmax	Pmin
30	0	0	999	-999	1	0	0	0
31	0	0	999	-999	1	0	0	0
32	0	0	999	-999	1	0	0	0
33	0	0	999	-999	1	0	0	0
34	0	0	999	-999	1	0	0	0
35	0	0	999	-999	1	0	0	0
36	0	0	999	-999	1	0	0	0
37	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่ง ระบบทดสอบ RBTS BUS 2

f	t	r (pu)	x (pu)	b (pu)	ratio	Angle	status
1	2	0.03332	0.05191	0	1	0	1
2	3	0.05851	0.04537	0	1	0	1
2	4	0.07802	0.06050	0	1	0	1
2	5	0.03332	0.05191	0	1	0	1
5	6	0.07802	0.06050	0	1	0	1
5	7	0.05851	0.04537	0	1	0	1
5	8	0.03332	0.05191	0	1	0	1
8	9	0.07802	0.06050	0	1	0	1
8	10	0.07314	0.05672	0	1	0	1
8	11	0.02665	0.04153	0	1	0	1
11	12	0.07802	0.06050	0	1	0	1
1	13	0.03332	0.05191	0	1	0	1
13	14	0.07802	0.06050	0	1	0	1
13	15	0.02665	0.04153	0	1	0	1
15	16	0.07802	0.06050	0	1	0	1
1	17	0.03332	0.05191	0	1	0	1
17	18	0.05851	0.04537	0	1	0	1
17	19	0.03554	0.05537	0	1	0	1

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่ง ระบบทดสอบ RBTS BUS 2 (ต่อ)

f	t	r (pu)	x (pu)	b (pu)	ratio	Angle	status
19	20	0.07314	0.05672	0	1	0	1
19	21	0.07802	0.06050	0	1	0	1
19	22	0.02665	0.04153	0	1	0	1
22	23	0.07314	0.05672	0	1	0	1
22	24	0.07802	0.06050	0	1	0	1
22	25	0.03332	0.05191	0	1	0	1
25	26	0.05851	0.04537	0	1	0	1
1	27	0.03554	0.05537	0	1	0	1
27	28	0.07314	0.05672	0	1	0	1
27	29	0.05851	0.04537	0	1	0	1
27	30	0.03332	0.05191	0	1	0	1
30	31	0.05851	0.04537	0	1	0	1
30	32	0.07802	0.06050	0	1	0	1
30	33	0.03332	0.05191	0	1	0	1
33	34	0.07802	0.06050	0	1	0	1
33	35	0.02665	0.04153	0	1	0	1
35	36	0.07314	0.05672	0	1	0	1
35	37	0.07802	0.06050	0	1	0	1

ก.2 ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.)

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัส ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของ กฟภ.

bus no	type	Pd	Qd	Vm	Va	baseKV	maxVm	minVm
1	3	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
2	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
3	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
4	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
5	1	0.15000	0.12000	0	0	22	1.05	0.95
6	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัส ระบบทดสอบที่คัดแปลงจากระบบของ กฟภ. (ต่อ)

bus no	type	Pd	Qd	Vm	Va	baseKV	maxVm	minVm
7	1	0.07500	0.06000	0	0	22	1.05	0.95
8	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
9	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
10	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
11	1	0.15000	0.12000	0	0	22	1.05	0.95
12	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
13	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
14	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
15	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
16	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
17	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
18	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
19	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
20	1	0.15000	0.12000	0	0	22	1.05	0.95
21	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
22	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
23	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
24	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
25	1	0.15000	0.12000	0	0	22	1.05	0.95
26	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
27	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
28	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
29	1	0.37500	0.30000	0	0	22	1.05	0.95
30	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
31	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
32	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
33	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
34	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
35	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัส ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของ กฟภ. (ต่อ)

bus no	type	Pd	Qd	Vm	Va	baseKV	maxVm	minVm
36	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
37	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
38	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
39	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
40	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
41	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
42	1	0.15000	0.12000	0	0	22	1.05	0.95
43	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
44	1	0.07500	0.06000	0	0	22	1.05	0.95
45	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
46	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
47	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
48	1	0.15000	0.12000	0	0	22	1.05	0.95
49	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
50	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
51	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
52	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
53	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
54	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
55	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95
56	1	0.00000	0.00000	0	0	22	1.05	0.95
57	1	0.04500	0.03600	0	0	22	1.05	0.95

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของ กฟภ.

bus no	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	status	Pmax	Pmin
1	0	0	999	-999	1	1	0	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของ กฟภ. (ต่อ)

bus no	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	status	Pmax	Pmin
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0
16	0	0	999	-999	1	0	0	0
17	0	0	999	-999	1	0	0	0
18	0	0	999	-999	1	0	0	0
19	0	0	999	-999	1	0	0	0
20	0	0	999	-999	1	0	0	0
21	0	0	999	-999	1	0	0	0
22	0	0	999	-999	1	0	0	0
23	0	0	999	-999	1	0	0	0
24	0	0	999	-999	1	0	0	0
25	0	0	999	-999	1	0	0	0
26	0	0	999	-999	1	0	0	0
27	0	0	999	-999	1	0	0	0
28	0	0	999	-999	1	0	0	0
29	0	0	999	-999	1	0	0	0
30	0	0	999	-999	1	0	0	0
31	0	0	999	-999	1	0	0	0
32	0	0	999	-999	1	0	0	0
33	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของ กฟภ. (ต่อ)

bus no	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	status	Pmax	Pmin
34	0	0	999	-999	1	0	0	0
35	0	0	999	-999	1	0	0	0
36	0	0	999	-999	1	0	0	0
37	0	0	999	-999	1	0	0	0
38	0	0	999	-999	1	0	0	0
39	0	0	999	-999	1	0	0	0
40	0	0	999	-999	1	0	0	0
41	0	0	999	-999	1	0	0	0
42	0	0	999	-999	1	0	0	0
43	0	0	999	-999	1	0	0	0
44	0	0	999	-999	1	0	0	0
45	0	0	999	-999	1	0	0	0
46	0	0	999	-999	1	0	0	0
47	0	0	999	-999	1	0	0	0
48	0	0	999	-999	1	0	0	0
49	0	0	999	-999	1	0	0	0
50	0	0	999	-999	1	0	0	0
51	0	0	999	-999	1	0	0	0
52	0	0	999	-999	1	0	0	0
53	0	0	999	-999	1	0	0	0
54	0	0	999	-999	1	0	0	0
55	0	0	999	-999	1	0	0	0
56	0	0	999	-999	1	0	0	0
57	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่ง ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของ กฟภ.

f	t	r (pu)	x (pu)	b (pu)	ratio	Angle	status
1	2	0.00666	0.01038	0	1	0	1
2	3	11.11100	24.24100	0	1	0	1
2	4	0.00222	0.00346	0	1	0	1
4	5	4.37880	8.99690	0	1	0	1
4	6	0.01777	0.02769	0	1	0	1
6	7	8.39980	13.61700	0	1	0	1
6	8	0.00333	0.00519	0	1	0	1
8	9	11.11100	24.24100	0	1	0	1
8	10	0.00333	0.00519	0	1	0	1
10	11	4.37550	8.99170	0	1	0	1
10	12	0.01333	0.02076	0	1	0	1
12	13	11.11100	24.24100	0	1	0	1
12	14	11.11100	24.24100	0	1	0	1
12	15	0.01111	0.01730	0	1	0	1
15	16	11.11100	24.24100	0	1	0	1
15	17	0.01222	0.01903	0	1	0	1
17	18	11.11100	24.24100	0	1	0	1
17	19	0.01111	0.01730	0	1	0	1
19	20	4.37550	8.99170	0	1	0	1
19	21	0.01777	0.02769	0	1	0	1
21	22	11.11100	24.24100	0	1	0	1
21	23	11.11100	24.24100	0	1	0	1
21	24	0.02110	0.03288	0	1	0	1
24	25	4.37550	8.99170	0	1	0	1
24	26	0.00999	0.01557	0	1	0	1
26	27	11.11100	24.24100	0	1	0	1
1	28	0.00222	0.00346	0	1	0	1
28	29	1.30070	3.78430	0	1	0	1
28	30	0.00777	0.01211	0	1	0	1

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่ง ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบของ กฟภ. (ต่อ)

f	t	r (pu)	x (pu)	b (pu)	ratio	Angle	status
30	31	11.11100	24.24100	0	1	0	1
30	32	11.12400	24.26200	0	1	0	1
30	33	0.01333	0.02076	0	1	0	1
33	34	11.11200	24.24200	0	1	0	1
33	35	0.01111	0.01730	0	1	0	1
35	36	11.11100	24.24100	0	1	0	1
35	37	0.00999	0.01557	0	1	0	1
37	38	11.11100	24.24100	0	1	0	1
1	39	0.00666	0.01038	0	1	0	1
39	40	11.11100	24.24100	0	1	0	1
39	41	0.00222	0.00346	0	1	0	1
41	42	4.37880	8.99690	0	1	0	1
41	43	0.01777	0.02769	0	1	0	1
43	44	8.39980	13.61700	0	1	0	1
43	45	0.00333	0.00519	0	1	0	1
45	46	11.11100	24.24100	0	1	0	1
45	47	0.00333	0.00519	0	1	0	1
47	48	4.37550	8.99170	0	1	0	1
47	49	0.01333	0.02076	0	1	0	1
49	50	11.11100	24.24100	0	1	0	1
49	51	11.11100	24.24100	0	1	0	1
49	52	0.01444	0.02250	0	1	0	1
52	53	11.11100	24.24100	0	1	0	1
52	54	0.01222	0.01903	0	1	0	1
54	55	11.11100	24.24100	0	1	0	1
54	56	0.01111	0.01730	0	1	0	1
56	57	11.11100	24.24100	0	1	0	1

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบของระบบทดสอบ RBTS BUS2

ภาคผนวก ข จะแสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสผิดพลาดของระบบทดสอบ RBTS BUS2 ในแต่ละกรณี

ข.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ ข.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีฐาน

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0000	0.0000	20.531	16.748	-	-
2	0.9815	-0.3515	-	-	-	-
3	0.9782	-0.3485	-	-	0.8668	0.6934
4	0.9771	-0.3475	-	-	0.8668	0.6934
5	0.9684	-0.6085	-	-	-	-
6	0.9639	-0.6044	-	-	0.8668	0.6934
7	0.9648	-0.6052	-	-	0.9167	0.7334
8	0.9609	-0.7595	-	-	-	-
9	0.9560	-0.7551	-	-	0.9167	0.7334
10	0.9571	-0.7561	-	-	0.7500	0.6000
11	0.9590	-0.7974	-	-	-	-
12	0.9550	-0.7938	-	-	0.7500	0.6000
13	0.9893	-0.2068	-	-	-	-
14	0.9809	-0.1994	-	-	1.6279	1.3023
15	0.9847	-0.2967	-	-	-	-
16	0.9750	-0.2882	-	-	1.8721	1.4977
17	0.9843	-0.2981	-	-	-	-
18	0.9810	-0.2951	-	-	0.8668	0.6934
19	0.9704	-0.5694	-	-	-	-
20	0.9662	-0.5656	-	-	0.8668	0.6934

ตารางที่ ข.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีฐาน (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
21	0.9666	-0.5660	-	-	0.7291	0.5833
22	0.9640	-0.6979	-	-	-	-
23	0.9594	-0.6938	-	-	0.9167	0.7334
24	0.9591	-0.6935	-	-	0.9167	0.7334
25	0.9616	-0.7449	-	-	-	-
26	0.9587	-0.7422	-	-	0.7500	0.6000
27	0.9817	-0.3487	-	-	-	-
28	0.9780	-0.3455	-	-	0.7500	0.6000
29	0.9788	-0.3462	-	-	0.7291	0.5833
30	0.9690	-0.5958	-	-	-	-
31	0.9661	-0.5932	-	-	0.7291	0.5833
32	0.9652	-0.5923	-	-	0.7291	0.5833
33	0.9609	-0.7572	-	-	-	-
34	0.9560	-0.7528	-	-	0.9167	0.7334
35	0.9567	-0.8415	-	-	-	-
36	0.9521	-0.8374	-	-	0.9167	0.7334
37	0.9527	-0.8379	-	-	0.7500	0.6000

ตารางที่ ข.2 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 1

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.0000	14.447	11.677	-	-
2	1.0500	-0.0080	5.9544	4.8763	-	-
3	1.0469	-0.0053	-	-	0.8668	0.6934
4	1.0458	-0.0045	-	-	0.8668	0.6934
5	1.0378	-0.2319	-	-	-	-
6	1.0335	-0.2284	-	-	0.8668	0.6934
7	1.0344	-0.2291	-	-	0.9167	0.7334
8	1.0307	-0.3633	-	-	-	-
9	1.0262	-0.3594	-	-	0.9167	0.7334

ตารางที่ ข.2 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 1 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
10	1.0273	-0.3603	-	-	0.7500	0.6000
11	1.0290	-0.3961	-	-	-	-
12	1.0253	-0.3930	-	-	0.7500	0.6000
13	1.0398	-0.1872	-	-	-	-
14	1.0318	-0.1805	-	-	1.6279	1.3023
15	1.0354	-0.2685	-	-	-	-
16	1.0262	-0.2607	-	-	1.8721	1.4977
17	1.0351	-0.2698	-	-	-	-
18	1.0319	-0.2671	-	-	0.8668	0.6934
19	1.0219	-0.5148	-	-	-	-
20	1.0179	-0.5113	-	-	0.8668	0.6934
21	1.0183	-0.5117	-	-	0.7291	0.5833
22	1.0158	-0.6305	-	-	-	-
23	1.0115	-0.6268	-	-	0.9167	0.7334
24	1.0112	-0.6266	-	-	0.9167	0.7334
25	1.0136	-0.6728	-	-	-	-
26	1.0108	-0.6704	-	-	0.7500	0.6000
27	1.0326	-0.3156	-	-	-	-
28	1.0291	-0.3127	-	-	0.7500	0.6000
29	1.0299	-0.3133	-	-	0.7291	0.5833
30	1.0206	-0.5385	-	-	-	-
31	1.0179	-0.5362	-	-	0.7291	0.5833
32	1.0170	-0.5354	-	-	0.7291	0.5833
33	1.0129	-0.6838	-	-	-	-
34	1.0083	-0.6798	-	-	0.9167	0.7334
35	1.0089	-0.7596	-	-	-	-
36	1.0046	-0.7559	-	-	0.9167	0.7334
37	1.0052	-0.7564	-	-	0.7500	0.6000

ตารางที่ ข.3 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 2

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.0000	18.130	14.563	-	-
2	1.0396	-0.2076	-	-	-	-
3	1.0365	-0.2050	-	-	0.8668	0.6934
4	1.0354	-0.2041	-	-	0.8668	0.6934
5	1.0343	-0.3247	-	-	-	-
6	1.0300	-0.3211	-	-	0.8668	0.6934
7	1.0309	-0.3219	-	-	0.9167	0.7334
8	1.0341	-0.3455	-	-	-	-
9	1.0296	-0.3417	-	-	0.9167	0.7334
10	1.0307	-0.3426	-	-	0.7500	0.6000
11	1.0379	-0.2899	2.2597	1.9729	-	-
12	1.0342	-0.2868	-	-	0.7500	0.6000
13	1.0398	-0.1872	-	-	-	-
14	1.0318	-0.1805	-	-	1.6279	1.3023
15	1.0354	-0.2685	-	-	-	-
16	1.0262	-0.2607	-	-	1.8721	1.4977
17	1.0351	-0.2698	-	-	-	-
18	1.0319	-0.2671	-	-	0.8668	0.6934
19	1.0219	-0.5148	-	-	-	-
20	1.0179	-0.5113	-	-	0.8668	0.6934
21	1.0183	-0.5117	-	-	0.7291	0.5833
22	1.0158	-0.6305	-	-	-	-
23	1.0115	-0.6268	-	-	0.9167	0.7334
24	1.0112	-0.6266	-	-	0.9167	0.7334
25	1.0136	-0.6728	-	-	-	-
26	1.0108	-0.6704	-	-	0.7500	0.6000
27	1.0326	-0.3156	-	-	-	-
28	1.0291	-0.3127	-	-	0.7500	0.6000
29	1.0299	-0.3133	-	-	0.7291	0.5833

ตารางที่ ข.3 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 2 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
30	1.0206	-0.5385	-	-	-	-
31	1.0179	-0.5362	-	-	0.7291	0.5833
32	1.0170	-0.5354	-	-	0.7291	0.5833
33	1.0129	-0.6838	-	-	-	-
34	1.0083	-0.6798	-	-	0.9167	0.7334
35	1.0089	-0.7596	-	-	-	-
36	1.0046	-0.7559	-	-	0.9167	0.7334
37	1.0052	-0.7564	-	-	0.7500	0.6000

ตารางที่ ข.4 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 3

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.0000	18.095	14.602	-	-
2	1.0396	-0.2010	-	-	-	-
3	1.0364	-0.1984	-	-	0.8668	0.6934
4	1.0354	-0.1975	-	-	0.8668	0.6934
5	1.0342	-0.3114	-	-	-	-
6	1.0300	-0.3078	-	-	0.8668	0.6934
7	1.0308	-0.3086	-	-	0.9167	0.7334
8	1.0340	-0.3254	0.80814	0.58875	-	-
9	1.0295	-0.3217	-	-	0.9167	0.7334
10	1.0306	-0.3225	-	-	0.7500	0.6000
11	1.0360	-0.3026	1.4842	1.3405	-	-
12	1.0323	-0.2995	-	-	0.7500	0.6000
13	1.0398	-0.1872	-	-	-	-
14	1.0318	-0.1805	-	-	1.6279	1.3023
15	1.0354	-0.2685	-	-	-	-
16	1.0262	-0.2607	-	-	1.8721	1.4977
17	1.0351	-0.2698	-	-	-	-
18	1.0319	-0.2671	-	-	0.8668	0.6934

ตารางที่ ข.4 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 3 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
19	1.0219	-0.5148	-	-	-	-
20	1.0179	-0.5113	-	-	0.8668	0.6934
21	1.0183	-0.5117	-	-	0.7291	0.5833
22	1.0158	-0.6305	-	-	-	-
23	1.0115	-0.6268	-	-	0.9167	0.7334
24	1.0112	-0.6266	-	-	0.9167	0.7334
25	1.0136	-0.6728	-	-	-	-
26	1.0108	-0.6704	-	-	0.7500	0.6000
27	1.0326	-0.3156	-	-	-	-
28	1.0291	-0.3127	-	-	0.7500	0.6000
29	1.0299	-0.3133	-	-	0.7291	0.5833
30	1.0206	-0.5385	-	-	-	-
31	1.0179	-0.5362	-	-	0.7291	0.5833
32	1.0170	-0.5354	-	-	0.7291	0.5833
33	1.0129	-0.6838	-	-	-	-
34	1.0083	-0.6798	-	-	0.9167	0.7334
35	1.0089	-0.7596	-	-	-	-
36	1.0046	-0.7559	-	-	0.9167	0.7334
37	1.0052	-0.7564	-	-	0.7500	0.6000

ตารางที่ ข.5 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 4

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0491	0.0000	12.049	9.4378	-	-
2	1.0494	-0.0015	6.0688	4.9614	-	-
3	1.0463	0.0011	-	-	0.8668	0.6934
4	1.0452	0.0020	-	-	0.8668	0.6934
5	1.0372	-0.2258	-	-	-	-
6	1.0329	-0.2222	-	-	0.8668	0.6934
7	1.0338	-0.2229	-	-	0.9167	0.7334

ตารางที่ ข.5 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 4 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
8	1.0301	-0.3572	-	-	-	-
9	1.0256	-0.3534	-	-	0.9167	0.7334
10	1.0267	-0.3543	-	-	0.7500	0.6000
11	1.0284	-0.3901	-	-	-	-
12	1.0247	-0.3870	-	-	0.7500	0.6000
13	1.0389	-0.1875	-	-	-	-
14	1.0309	-0.1809	-	-	1.6279	1.3023
15	1.0345	-0.2690	-	-	-	-
16	1.0253	-0.2612	-	-	1.8721	1.4977
17	1.0414	-0.17030	-	-	-	-
18	1.0382	-0.1677	-	-	0.8668	0.6934
19	1.0358	-0.3045	-	-	-	-
20	1.0318	-0.3012	-	-	0.8668	0.6934
21	1.0322	-0.3015	-	-	0.7291	0.5833
22	1.0353	-0.3366	-	-	-	-
23	1.0311	-0.3330	-	-	0.9167	0.7334
24	1.0308	-0.3328	-	-	0.9167	0.7334
25	1.0400	-0.2775	2.2057	2.0333	-	-
26	1.0373	-0.2752	-	-	0.7500	0.6000
27	1.0317	-0.3162	-	-	-	-
28	1.0282	-0.3132	-	-	0.7500	0.6000
29	1.0290	-0.3139	-	-	0.7291	0.5833
30	1.0197	-0.5394	-	-	-	-
31	1.0170	-0.5371	-	-	0.7291	0.5833
32	1.0160	-0.5364	-	-	0.7291	0.5833
33	1.0120	-0.6850	-	-	-	-
34	1.0074	-0.6811	-	-	0.9167	0.7334
35	1.0080	-0.7610	-	-	-	-
36	1.0037	-0.7573	-	-	0.9167	0.7334
37	1.0042	-0.7577	-	-	0.7500	0.6000

ตารางที่ ข.6 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 5

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0495	0.0000	15.685	12.614	-	-
2	1.0392	-0.2196	-	-	-	-
3	1.0360	-0.2169	-	-	0.8668	0.6934
4	1.0349	-0.2161	-	-	0.8668	0.6934
5	1.0339	-0.3488	-	-	-	-
6	1.0296	-0.3452	-	-	0.8668	0.6934
7	1.0305	-0.3459	-	-	0.9167	0.7334
8	1.0338	-0.3816	-	-	-	-
9	1.0293	-0.3778	-	-	0.9167	0.7334
10	1.0303	-0.3787	-	-	0.7500	0.6000
11	1.0376	-0.3356	2.1964	2.0428	-	-
12	1.0339	-0.3325	-	-	0.7500	0.6000
13	1.0393	-0.1874	-	-	-	-
14	1.0313	-0.1807	-	-	1.6279	1.3023
15	1.0349	-0.2687	-	-	-	-
16	1.0257	-0.2610	-	-	1.8721	1.4977
17	1.0415	-0.1265	-	-	-	-
18	1.0383	-0.1239	-	-	0.8668	0.6934
19	1.0356	-0.2135	-	-	-	-
20	1.0317	-0.2101	-	-	0.8668	0.6934
21	1.0321	-0.2105	-	-	0.7291	0.5833
22	1.0349	-0.2099	-	-	-	-
23	1.0307	-0.2063	-	-	0.9167	0.7334
24	1.0304	-0.2061	-	-	0.9167	0.7334
25	1.0394	-0.1063	2.4307	1.7581	-	-
26	1.0367	-0.1040	-	-	0.7500	0.6000
27	1.0321	-0.3159	-	-	-	-
28	1.0286	-0.3130	-	-	0.7500	0.6000
29	1.0294	-0.3136	-	-	0.7291	0.5833

ตารางที่ ข.6 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 5 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
30	1.0201	-0.5390	-	-	-	-
31	1.0174	-0.5367	-	-	0.7291	0.5833
32	1.0165	-0.5359	-	-	0.7291	0.5833
33	1.0124	-0.6845	-	-	-	-
34	1.0078	-0.6805	-	-	0.9167	0.7334
35	1.0084	-0.7604	-	-	-	-
36	1.0041	-0.7567	-	-	0.9167	0.7334
37	1.0046	-0.7571	-	-	0.7500	0.6000

ตารางที่ ข.7 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 6

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.0000	14.555	11.803	-	-
2	1.0496	-0.0109	3.5211	2.7558	-	-
3	1.0465	-0.0083	-	-	0.8668	0.6934
4	1.0454	-0.0074	-	-	0.8668	0.6934
5	1.0443	-0.1202	-	-	-	-
6	1.0401	-0.1167	-	-	0.8668	0.6934
7	1.0409	-0.1174	-	-	0.9167	0.7334
8	1.0441	-0.1351	1.4458	1.3816	-	-
9	1.0396	-0.1313	-	-	0.9167	0.7334
10	1.0407	-0.1322	-	-	0.7500	0.6000
11	1.0441	-0.1246	0.8368	0.5474	-	-
12	1.0404	-0.1216	-	-	0.7500	0.6000
13	1.0398	-0.1872	-	-	-	-
14	1.0318	-0.1805	-	-	1.6279	1.3023
15	1.0354	-0.2685	-	-	-	-
16	1.0262	-0.2607	-	-	1.8721	1.4977
17	1.0351	-0.2698	-	-	-	-
18	1.0319	-0.2671	-	-	0.8668	0.6934

ตารางที่ ข.7 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 6 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
19	1.0219	-0.5148	-	-	-	-
20	1.0179	-0.5113	-	-	0.8668	0.6934
21	1.0183	-0.5117	-	-	0.7291	0.5833
22	1.0158	-0.6305	-	-	-	-
23	1.0115	-0.6268	-	-	0.9167	0.7334
24	1.0112	-0.6266	-	-	0.9167	0.7334
25	1.0136	-0.6728	-	-	-	-
26	1.0108	-0.6704	-	-	0.7500	0.6000
27	1.0326	-0.3156	-	-	-	-
28	1.0291	-0.3127	-	-	0.7500	0.6000
29	1.0299	-0.3133	-	-	0.7291	0.5833
30	1.0206	-0.5385	-	-	-	-
31	1.0179	-0.5362	-	-	0.7291	0.5833
32	1.0170	-0.5354	-	-	0.7291	0.5833
33	1.0129	-0.6838	-	-	-	-
34	1.0083	-0.6798	-	-	0.9167	0.7334
35	1.0089	-0.7596	-	-	-	-
36	1.0046	-0.7559	-	-	0.9167	0.7334
37	1.0052	-0.7564	-	-	0.7500	0.6000

ตารางที่ ข.8 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 7

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0499	0.0000	18.024	14.806	-	-
2	1.0392	-0.1792	-	-	-	-
3	1.0360	-0.1765	-	-	0.8668	0.6934
4	1.0349	-0.1756	-	-	0.8668	0.6934
5	1.0335	-0.2674	0.5907	0.8062	-	-
6	1.0292	-0.2638	-	-	0.8668	0.6934
7	1.0301	-0.2645	-	-	0.9167	0.7334

ตารางที่ ข.8 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 7 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
8	1.0306	-0.2672	0.8834	0.4682	-	-
9	1.0261	-0.2634	-	-	0.9167	0.7334
10	1.0271	-0.2643	-	-	0.7500	0.6000
11	1.0305	-0.2463	0.8908	0.4542	-	-
12	1.0268	-0.2432	-	-	0.7500	0.6000
13	1.0397	-0.1872	-	-	-	-
14	1.0317	-0.1806	-	-	1.6279	1.3023
15	1.0353	-0.2685	-	-	-	-
16	1.0261	-0.2608	-	-	1.8721	1.4977
17	1.0350	-0.2699	-	-	-	-
18	1.0318	-0.2672	-	-	0.8668	0.6934
19	1.0218	-0.5149	-	-	-	-
20	1.0178	-0.5114	-	-	0.8668	0.6934
21	1.0182	-0.5118	-	-	0.7291	0.5833
22	1.0157	-0.6306	-	-	-	-
23	1.0114	-0.6269	-	-	0.9167	0.7334
24	1.0111	-0.6267	-	-	0.9167	0.7334
25	1.0135	-0.6729	-	-	-	-
26	1.0107	-0.6705	-	-	0.7500	0.6000
27	1.0325	-0.3157	-	-	-	-
28	1.0290	-0.3128	-	-	0.7500	0.6000
29	1.0298	-0.3134	-	-	0.7291	0.5833
30	1.0205	-0.5386	-	-	-	-
31	1.0178	-0.5363	-	-	0.7291	0.5833
32	1.0169	-0.5355	-	-	0.7291	0.5833
33	1.0128	-0.6839	-	-	-	-
34	1.0082	-0.6800	-	-	0.9167	0.7334
35	1.0088	-0.7598	-	-	-	-
36	1.0045	-0.7561	-	-	0.9167	0.7334
37	1.0051	-0.7565	-	-	0.7500	0.6000

ตารางที่ ข.9 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 8

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0495	0.0000	13.333	10.531	-	-
2	1.0391	-0.2002	-	-	-	-
3	1.0359	-0.1975	-	-	0.8668	0.6934
4	1.0348	-0.1967	-	-	0.8668	0.6934
5	1.0337	-0.3097	-	-	-	-
6	1.0294	-0.3061	-	-	0.8668	0.6934
7	1.0303	-0.3068	-	-	0.9167	0.7334
8	1.0335	-0.3227	-	-	-	-
9	1.0290	-0.3189	-	-	0.9167	0.7334
10	1.0300	-0.3198	-	-	0.7500	0.6000
11	1.0372	-0.2608	2.2995	1.9261	-	-
12	1.0335	-0.2578	-	-	0.7500	0.6000
13	1.0393	-0.1874	-	-	-	-
14	1.0313	-0.1807	-	-	1.6279	1.3023
15	1.0349	-0.2687	-	-	-	-
16	1.0257	-0.2610	-	-	1.8721	1.4977
17	1.0418	-0.1874	-	-	-	-
18	1.0387	-0.1848	-	-	0.8668	0.6934
19	1.0363	-0.3401	-	-	-	-
20	1.0323	-0.3368	-	-	0.8668	0.6934
21	1.0327	-0.3371	-	-	0.7291	0.5833
22	1.0359	-0.3862	-	-	-	-
23	1.0316	-0.3827	-	-	0.9167	0.7334
24	1.0314	-0.3825	-	-	0.9167	0.7334
25	1.0406	-0.3447	2.1069	2.1265	-	-
26	1.0379	-0.3424	-	-	0.7500	0.6000
27	1.0394	-0.1511	-	-	-	-
28	1.0360	-0.1482	-	-	0.7500	0.6000
29	1.0368	-0.1489	-	-	0.7291	0.5833

ตารางที่ ข.9 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 8 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
30	1.0343	-0.2149	-	-	-	-
31	1.0316	-0.2127	-	-	0.7291	0.5833
32	1.0307	-0.2119	-	-	0.7291	0.5833
33	1.0333	-0.2000	-	-	-	-
34	1.0288	-0.1961	-	-	0.9167	0.7334
35	1.0347	-0.1480	2.4786	1.6849	-	-
36	1.0305	-0.1445	-	-	0.9167	0.7334
37	1.0310	-0.1449	-	-	0.7500	0.6000

ข.2 ผลการคำนวณกระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกัน

ตารางที่ ข.10 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณีฐาน

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.6191	-	-	-	-	-	-	-
3	0.5854	-	-	-	-	-	-	0.6080
4	0.5782	-	-	-	-	-	-	0.6030
5	0.6031	-	-	-	0.6045	-	-	-
6	0.5747	-	-	-	0.5646	-	-	0.5878
7	0.5817	-	-	-	0.5716	-	-	0.5927
8	0.5878	-	-	-	0.5892	-	-	-
9	0.5642	-	-	-	0.5616	-	-	0.5732
10	0.5658	-	-	-	0.5633	-	-	0.5744
11	0.5760	-	-	-	0.5774	-	-	-
12	0.5547	-	-	-	0.5539	-	-	0.5620
13	-	0.6225	-	-	-	-	-	-
14	-	0.5807	-	-	-	-	-	0.6027
15	-	0.6095	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข.10 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติฐาน (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
16	-	0.5790	-	-	-	-	-	0.5904
17	-	-	0.6198	-	-	-	-	-
18	-	-	0.5859	-	-	-	-	0.6080
19	-	-	0.6027	-	-	0.6034	-	-
20	-	-	0.5764	-	-	0.5658	-	0.5880
21	-	-	0.5746	-	-	0.5641	-	0.5868
22	-	-	0.5905	-	-	0.5911	-	-
23	-	-	0.5679	-	-	0.5640	-	0.5763
24	-	-	0.5663	-	-	0.5623	-	0.5751
25	-	-	0.5757	-	-	0.5764	-	-
26	-	-	0.5599	-	-	0.5591	-	0.5655
27	-	-	-	0.6180	-	-	-	-
28	-	-	-	0.5794	-	-	-	0.6032
29	-	-	-	0.5849	-	-	-	0.6070
30	-	-	-	0.6021	-	-	0.6035	-
31	-	-	-	0.5809	-	-	0.5707	0.5917
32	-	-	-	0.5739	-	-	0.5637	0.5868
33	-	-	-	0.5868	-	-	0.5882	-
34	-	-	-	0.5634	-	-	0.5607	0.5723
35	-	-	-	0.5751	-	-	0.5764	-
36	-	-	-	0.5552	-	-	0.5545	0.5622
37	-	-	-	0.5538	-	-	0.5530	0.5611

ตารางที่ ข.11 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 1

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.4625	-	-	-	-	-	-	-
2	0.6191	-	-	-	-	-	-	-
3	0.5631	-	-	-	-	-	-	1.0436
4	0.5527	-	-	-	-	-	-	1.0292
5	0.5918	-	-	-	1.0381	-	-	-
6	0.5453	-	-	-	0.9490	-	-	0.9861
7	0.5559	-	-	-	0.9658	-	-	0.9995
8	0.5668	-	-	-	0.9945	-	-	-
9	0.5286	-	-	-	0.9287	-	-	0.9460
10	0.5309	-	-	-	0.9326	-	-	0.9491
11	0.5482	-	-	-	0.9619	-	-	-
12	0.5140	-	-	-	0.9045	-	-	0.9159
13	-0.4419	1.0479	-	-	-	-	-	-
14	-0.4145	0.9572	-	-	-	-	-	0.9930
15	-0.4267	1.0121	-	-	-	-	-	-
16	-0.4029	0.9421	-	-	-	-	-	0.9601
17	-0.4420	-	1.0454	-	-	-	-	-
18	-0.4215	-	0.9725	-	-	-	-	1.0070
19	-0.4221	-	0.9985	-	-	0.9992	-	-
20	-0.4005	-	0.9368	-	-	0.9190	-	0.9534
21	-0.3990	-	0.9328	-	-	0.9151	-	0.9502
22	-0.4082	-	0.9656	-	-	0.9663	-	-
23	-0.3884	-	0.9117	-	-	0.9050	-	0.9229
24	-0.3870	-	0.9081	-	-	0.9012	-	0.9200
25	-0.3918	-	0.9271	-	-	0.9277	-	-
26	-0.3775	-	0.8890	-	-	0.8871	-	0.8956
27	-0.4407	-	-	1.0418	-	-	-	-
28	-0.4153	-	-	0.9573	-	-	-	0.9940

ตารางที่ ข.11 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงในกรณี 1 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
29	-0.4205	-	-	0.9702	-	-	-	1.0042
30	-0.4221	-	-	0.9979	-	-	0.9993	-
31	-0.4051	-	-	0.9481	-	-	0.9304	0.9630
32	-0.3990	-	-	0.9320	-	-	0.9144	0.9503
33	-0.4048	-	-	0.9571	-	-	0.9584	-
34	-0.3841	-	-	0.9011	-	-	0.8959	0.9127
35	-0.3919	-	-	0.9266	-	-	0.9278	-
36	-0.3738	-	-	0.8787	-	-	0.8768	0.8873
37	-0.3725	-	-	0.8755	-	-	0.8734	0.8845

ตารางที่ ข.12 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงในกรณี 2

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.1749	-	-	-	-0.1736	-	-	-
2	0.6191	-	-	-	-0.1748	-	-	-
3	0.5765	-	-	-	-0.1644	-	-	0.7696
4	0.5680	-	-	-	-0.1625	-	-	0.7617
5	0.6031	-	-	-	0.6045	-	-	-
6	0.5657	-	-	-	0.5539	-	-	0.7476
7	0.5746	-	-	-	0.5623	-	-	0.7554
8	0.5878	-	-	-	0.5892	-	-	-
9	0.5566	-	-	-	0.5524	-	-	0.7341
10	0.5585	-	-	-	0.5545	-	-	0.7360
11	0.5760	-	-	-	0.5774	-	-	-
12	0.5477	-	-	-	0.5459	-	-	0.7237
13	-0.1690	0.7823	-	-	-0.1677	-	-	-
14	-0.1605	0.7240	-	-	-0.1597	-	-	0.7513
15	-0.1646	0.7621	-	-	-0.1633	-	-	-

ตารางที่ ข.12 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 2 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
16	-0.1573	0.7184	-	-	-0.1564	-	-	0.7323
17	-0.1690	-	0.7797	-	-0.1677	-	-	-
18	-0.1627	-	0.7326	-	-0.1618	-	-	0.7594
19	-0.1632	-	0.7531	-	-0.1620	0.7538	-	-
20	-0.1567	-	0.7150	-	-0.1557	0.7017	-	0.7285
21	-0.1562	-	0.7125	-	-0.1552	0.6993	-	0.7267
22	-0.1591	-	0.7342	-	-0.1579	0.7349	-	-
23	-0.1531	-	0.7012	-	-0.1521	0.6962	-	0.7106
24	-0.1527	-	0.6989	-	-0.1517	0.6938	-	0.7088
25	-0.1542	-	0.7116	-	-0.1530	0.7123	-	-
26	-0.1499	-	0.6884	-	-0.1488	0.6871	-	0.6943
27	-0.1687	-	-	0.7773	-0.1674	-	-	-
28	-0.1607	-	-	0.7233	-0.1600	-	-	0.7520
29	-0.1624	-	-	0.7313	-0.1615	-	-	0.7578
30	-0.1633	-	-	0.7525	-0.1620	-	0.7539	-
31	-0.1581	-	-	0.7218	-0.1571	-	0.7087	0.7341
32	-0.1562	-	-	0.7118	-0.1552	-	0.6987	0.7267
33	-0.1581	-	-	0.7290	-0.1569	-	0.7303	-
34	-0.1518	-	-	0.6947	-0.1508	-	0.6910	0.7046
35	-0.1542	-	-	0.7110	-0.1530	-	0.7124	-
36	-0.1487	-	-	0.6818	-0.1476	-	0.6806	0.6894
37	-0.1483	-	-	0.6798	-0.1473	-	0.6784	0.6877

ตารางที่ ข.13 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 3

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.1755	-	-	-	-0.1741	-	-	-
2	0.6191	-	-	-	-0.1754	-	-	-
3	0.5764	-	-	-	-0.1650	-	-	0.7701
4	0.5679	-	-	-	-0.1631	-	-	0.7622
5	0.6031	-	-	-	0.6045	-	-	-
6	0.5657	-	-	-	0.5539	-	-	0.7481
7	0.5746	-	-	-	0.5622	-	-	0.7559
8	0.5878	-	-	-	0.5892	-	-	-
9	0.5565	-	-	-	0.5524	-	-	0.7346
10	0.5585	-	-	-	0.5545	-	-	0.7365
11	0.5750	-	-	-	0.5763	-	-	-
12	0.5468	-	-	-	0.5450	-	-	0.7216
13	-0.1695	0.7828	-	-	-0.1682	-	-	-
14	-0.1610	0.7245	-	-	-0.1602	-	-	0.7518
15	-0.1651	0.7625	-	-	-0.1638	-	-	-
16	-0.1578	0.7189	-	-	-0.1569	-	-	0.7328
17	-0.1695	-	0.7802	-	-0.1683	-	-	-
18	-0.1632	-	0.7331	-	-0.1623	-	-	0.7599
19	-0.1637	-	0.7536	-	-0.1625	0.7543	-	-
20	-0.1572	-	0.7154	-	-0.1562	0.7021	-	0.7290
21	-0.1567	-	0.7130	-	-0.1557	0.6997	-	0.7271
22	-0.1596	-	0.7346	-	-0.1584	0.7353	-	-
23	-0.1536	-	0.7016	-	-0.1526	0.6966	-	0.7111
24	-0.1532	-	0.6993	-	-0.1521	0.6942	-	0.7093
25	-0.1547	-	0.7120	-	-0.1535	0.7127	-	-
26	-0.1503	-	0.6888	-	-0.1492	0.6875	-	0.6947
27	-0.1692	-	-	0.7778	-0.1679	-	-	-
28	-0.1613	-	-	0.7238	-0.1605	-	-	0.7524

ตารางที่ ข.13 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 3 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
29	-0.1629	-	-	0.7317	-0.1621	-	-	0.7583
30	-0.1637	-	-	0.7530	-0.1625	-	0.7544	-
31	-0.1586	-	-	0.7222	-0.1576	-	0.7091	0.7346
32	-0.1567	-	-	0.7122	-0.1557	-	0.6991	0.7272
33	-0.1586	-	-	0.7294	-0.1574	-	0.7308	-
34	-0.1523	-	-	0.6951	-0.1513	-	0.6914	0.7050
35	-0.1547	-	-	0.7115	-0.1535	-	0.7128	-
36	-0.1492	-	-	0.6822	-0.1481	-	0.6810	0.6898
37	-0.1488	-	-	0.6802	-0.1477	-	0.6788	0.6881

ตารางที่ ข.14 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 4

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.4625	-	-0.1742	-	-	-0.1735	-	-
2	0.7790	-	-0.1683	-	-	-0.1677	-	-
3	0.7080	-	-0.1578	-	-	-0.1577	-	1.1903
4	0.6937	-	-0.1545	-	-	-0.1545	-	1.1716
5	0.7403	-	-0.1601	-	1.1839	-0.1595	-	-
6	0.6790	-	-0.1490	-	1.0741	-0.1487	-	1.1159
7	0.6932	-	-0.1518	-	1.0953	-0.1514	-	1.1332
8	0.7050	-	-0.1525	-	1.1276	-0.1520	-	-
9	0.6540	-	-0.1428	-	1.0454	-0.1424	-	1.0646
10	0.6571	-	-0.1435	-	1.0504	-0.1430	-	1.0686
11	0.6788	-	-0.1469	-	1.0858	-0.1463	-	-
12	0.6331	-	-0.1380	-	1.0141	-0.1375	-	1.0265
13	-0.4391	1.2025	-0.1655	-	-	-0.1648	-	-
14	-0.4080	1.0899	-0.1530	-	-	-0.1528	-	1.1307
15	-0.4220	1.1557	-0.1590	-	-	-0.1584	-	-

ตารางที่ ข.14 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 4 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
16	-0.3950	1.0678	-0.1483	-	-	-0.1480	-	1.0881
17	-0.4420	-	1.0454	-	-	-0.1748	-	-
18	-0.4179	-	0.9621	-	-	-0.1607	-	1.1640
19	-0.4221	-	0.9985	-	-	0.9992	-	-
20	-0.3967	-	0.9259	-	-	0.9066	-	1.1084
21	-0.3949	-	0.9214	-	-	0.9022	-	1.1042
22	-0.4082	-	0.9656	-	-	0.9663	-	-
23	-0.3849	-	0.9019	-	-	0.8937	-	1.0790
24	-0.3833	-	0.8977	-	-	0.8893	-	1.0749
25	-0.3918	-	0.9271	-	-	0.9277	-	-
26	-0.3750	-	0.8819	-	-	0.8792	-	1.0559
27	-0.4377	-	-0.1649	1.1955	-	-0.1643	-	-
28	-0.4089	-	-0.1533	1.0905	-	-0.1531	-	1.1319
29	-0.4147	-	-0.1556	1.1068	-	-0.1553	-	1.1451
30	-0.4167	-	-0.1570	1.1382	-	-0.1564	1.1395	-
31	-0.3973	-	-0.1493	1.0754	-	-0.1489	1.0551	1.0917
32	-0.3906	-	-0.1467	1.0551	-	-0.1463	1.035	1.0754
33	-0.3974	-	-0.1498	1.0855	-	-0.1492	1.0867	-
34	-0.3741	-	-0.1406	1.0147	-	-0.1402	1.0087	1.0273
35	-0.3830	-	-0.1444	1.0463	-	-0.1438	1.0475	-
36	-0.3628	-	-0.1365	0.9860	-	-0.1360	0.98366	0.9952
37	-0.3614	-	-0.1359	0.9820	-	-0.1355	0.9795	0.9916

ตารางที่ ข.15 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 5

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.1749	-	-0.1742	-	-0.1736	-0.1735	-	-
2	0.7790	-	-0.1683	-	-0.1748	-0.1677	-	-
3	0.7227	-	-0.1605	-	-0.1629	-0.1602	-	0.9194
4	0.7107	-	-0.1579	-	-0.1607	-0.1577	-	0.9081
5	0.7541	-	-0.1629	-	0.7555	-0.1623	-	-
6	0.7031	-	-0.1542	-	0.6887	-0.1538	-	0.8859
7	0.7153	-	-0.1565	-	0.7002	-0.1561	-	0.8967
8	0.7304	-	-0.1578	-	0.7318	-0.1572	-	-
9	0.6873	-	-0.1500	-	0.6823	-0.1495	-	0.8648
10	0.6900	-	-0.1505	-	0.6851	-0.1500	-	0.8674
11	0.7124	-	-0.1539	-	0.7137	-0.1533	-	-
12	0.6732	-	-0.1466	-	0.6708	-0.1461	-	0.8487
13	-0.1679	0.9402	-0.1672	-	-0.1667	-0.1666	-	-
14	-0.1578	0.8634	-0.1572	-	-0.1571	-0.1570	-	0.8958
15	-0.1628	0.9112	-0.1621	-	-0.1615	-0.1614	-	-
16	-0.1541	0.8526	-0.1535	-	-0.1532	-0.1531	-	0.8689
17	-0.1690	-	0.7797	-	-0.1677	-0.1748	-	-
18	-0.1610	-	0.7232	-	-0.1603	-0.1629	-	0.9193
19	-0.1632	-	0.7531	-	-0.1620	0.7538	-	-
20	-0.1550	-	0.7057	-	-0.1541	0.6906	-	0.8870
21	-0.1545	-	0.7027	-	-0.1536	0.6878	-	0.8844
22	-0.1591	-	0.7342	-	-0.1579	0.7349	-	-
23	-0.1517	-	0.6929	-	-0.1507	0.6863	-	0.8701
24	-0.1511	-	0.6901	-	-0.1502	0.6834	-	0.8675
25	-0.1542	-	0.7116	-	-0.1530	0.7123	-	-
26	-0.1488	-	0.6825	-	-0.1478	0.6804	-	0.8573
27	-0.1676	-	-0.1668	0.9346	-0.1663	-0.1662	-	-
28	-0.1581	-	-0.1575	0.86316	-0.1574	-0.1573	-	0.8966

ตารางที่ ข.15 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 5 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
29	-0.1600	-	-0.1594	0.87392	-0.1592	-0.1591	-	0.9049
30	-0.1612	-	-0.1605	0.89907	-0.1599	-0.1599	0.9004	-
31	-0.1550	-	-0.1544	0.85748	-0.1540	-0.1539	0.8416	0.8713
32	-0.1528	-	-0.1522	0.84394	-0.1518	-0.1518	0.8282	0.8609
33	-0.1552	-	-0.1545	0.86578	-0.1540	-0.1539	0.8671	-
34	-0.1477	-	-0.1471	0.81904	-0.1467	-0.1466	0.8145	0.8300
35	-0.1507	-	-0.1500	0.84067	-0.1495	-0.1495	0.8420	-
36	-0.1442	-	-0.1436	0.80076	-0.1431	-0.1431	0.7991	0.8090
37	-0.1437	-	-0.1431	0.79806	-0.1427	-0.1426	0.7962	0.8066

ตารางที่ ข.16 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 6

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.4600	-	-	-	-0.1724	-	-	-
2	0.6191	-	-	-	-0.1757	-	-	-
3	0.5634	-	-	-	-0.1622	-	-	1.0413
4	0.5530	-	-	-	-0.1598	-	-	1.0270
5	0.5961	-	-	-	0.8771	-	-	-
6	0.5477	-	-	-	0.7964	-	-	0.9972
7	0.5586	-	-	-	0.8108	-	-	1.0108
8	0.5746	-	-	-	0.8457	-	-	-
9	0.5342	-	-	-	0.7850	-	-	0.9691
10	0.5366	-	-	-	0.7885	-	-	0.9723
11	0.5563	-	-	-	0.8189	-	-	-
12	0.5203	-	-	-	0.7666	-	-	0.9410
13	-0.4396	1.0457	-	-	-0.1649	-	-	-
14	-0.4122	0.9552	-	-	-0.1545	-	-	0.9910
15	-0.4245	1.0100	-	-	-0.1593	-	-	-

ตารางที่ ข.16 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 6 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
16	-0.4008	0.9403	-	-	-0.1501	-	-	0.9582
17	-0.4397	-	1.0432	-	-0.1650	-	-	-
18	-0.4192	-	0.9705	-	-0.1571	-	-	1.0049
19	-0.4199	-	0.9965	-	-0.1575	0.9971	-	-
20	-0.3984	-	0.9349	-	-0.1492	0.9172	-	0.9515
21	-0.3969	-	0.9309	-	-0.1486	0.9133	-	0.9484
22	-0.4061	-	0.9637	-	-0.1524	0.9644	-	-
23	-0.3864	-	0.9099	-	-0.1447	0.9033	-	0.9212
24	-0.3850	-	0.9063	-	-0.1442	0.8994	-	0.9182
25	-0.3899	-	0.9253	-	-0.1463	0.9259	-	-
26	-0.3756	-	0.8873	-	-0.1407	0.8854	-	0.8939
27	-0.4384	-	-	1.0396	-0.1645	-	-	-
28	-0.4130	-	-	0.9553	-0.1548	-	-	0.9920
29	-0.4182	-	-	0.9682	-0.1567	-	-	1.0021
30	-0.4200	-	-	0.9959	-0.1576	-	0.9972	-
31	-0.4029	-	-	0.9462	-0.1509	-	0.9285	0.9611
32	-0.3969	-	-	0.9301	-0.1486	-	0.9126	0.9484
33	-0.4028	-	-	0.9552	-0.1511	-	0.9565	-
34	-0.3821	-	-	0.8993	-0.1431	-	0.8942	0.9110
35	-0.3899	-	-	0.9248	-0.1463	-	0.9261	-
36	-0.3719	-	-	0.8771	-0.1393	-	0.8751	0.8857
37	-0.3706	-	-	0.8739	-0.1388	-	0.8717	0.8829

ตารางที่ ข.17 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 7

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.1764	-	-	-	-0.1751	-	-	-
2	0.6191	-	-	-	-0.1764	-	-	-
3	0.5763	-	-	-	-0.1661	-	-	0.7710
4	0.5678	-	-	-	-0.1641	-	-	0.7631
5	0.6031	-	-	-	0.6045	-	-	-
6	0.5656	-	-	-	0.5537	-	-	0.7490
7	0.5745	-	-	-	0.5620	-	-	0.7568
8	0.5865	-	-	-	0.5878	-	-	-
9	0.5554	-	-	-	0.5515	-	-	0.7322
10	0.5574	-	-	-	0.5535	-	-	0.7341
11	0.5727	-	-	-	0.5740	-	-	-
12	0.5447	-	-	-	0.5431	-	-	0.7167
13	-0.1704	0.7837	-	-	-0.1691	-	-	-
14	-0.1619	0.7253	-	-	-0.1612	-	-	0.7526
15	-0.1660	0.7634	-	-	-0.1647	-	-	-
16	-0.1588	0.7197	-	-	-0.1578	-	-	0.7336
17	-0.1705	-	0.7811	-	-0.1692	-	-	-
18	-0.1641	-	0.7339	-	-0.1633	-	-	0.7607
19	-0.1646	-	0.7544	-	-0.1634	0.7551	-	-
20	-0.1581	-	0.7162	-	-0.1571	0.7029	-	0.7298
21	-0.1576	-	0.7137	-	-0.1566	0.7004	-	0.7279
22	-0.1605	-	0.7354	-	-0.1592	0.7361	-	-
23	-0.1545	-	0.7023	-	-0.1534	0.6974	-	0.7118
24	-0.1540	-	0.7001	-	-0.1530	0.6950	-	0.7100
25	-0.1555	-	0.7128	-	-0.1543	0.7135	-	-
26	-0.1512	-	0.6895	-	-0.1501	0.6883	-	0.6955
27	-0.1701	-	-	0.7787	-0.1688	-	-	-
28	-0.1622	-	-	0.7246	-0.1614	-	-	0.7533

ตารางที่ ข.17 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 7 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
29	-0.1639	-	-	0.7325	-0.1630	-	-	0.7591
30	-0.1646	-	-	0.7538	-0.1634	-	0.7552	-
31	-0.1595	-	-	0.7230	-0.1585	-	0.7099	0.7354
32	-0.1576	-	-	0.7130	-0.1566	-	0.6999	0.7280
33	-0.1595	-	-	0.7302	-0.1582	-	0.7316	-
34	-0.1532	-	-	0.6958	-0.1521	-	0.6921	0.7058
35	-0.1555	-	-	0.7122	-0.1543	-	0.7136	-
36	-0.1500	-	-	0.6829	-0.1489	-	0.6817	0.6905
37	-0.1496	-	-	0.6809	-0.1486	-	0.6796	0.6888

ตารางที่ ข.18 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 8

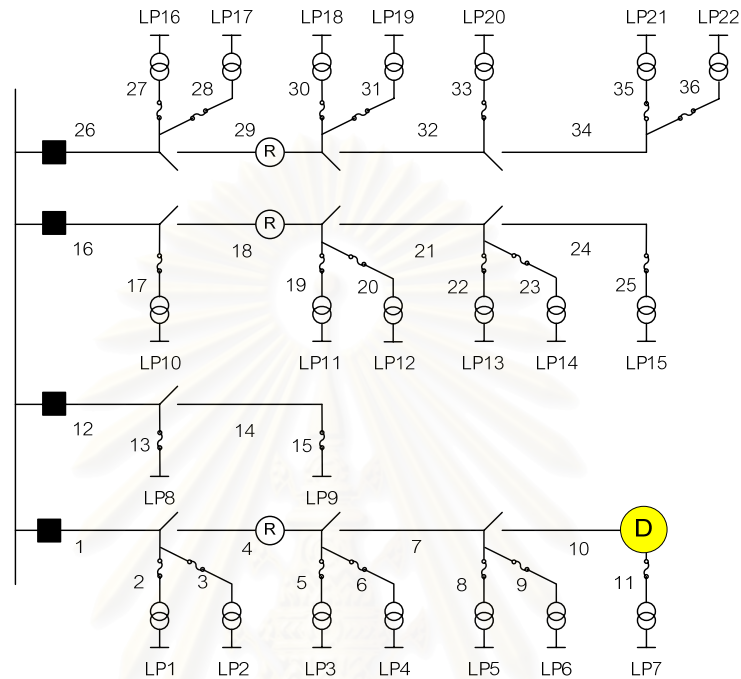
Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.1749	-	-0.1742	-0.1748	-0.1736	-0.1735	-0.1735	-
2	0.9370	-	-0.1673	-0.1679	-0.1748	-0.1666	-0.1666	-
3	0.8652	-	-0.1582	-0.1587	-0.1616	-0.1580	-0.1580	1.0654
4	0.8493	-	-0.1553	-0.1558	-0.1591	-0.1552	-0.1551	1.0502
5	0.9013	-	-0.1609	-0.1615	0.9027	-0.1603	-0.1602	-
6	0.8349	-	-0.1509	-0.1513	0.8178	-0.1505	-0.1505	1.0184
7	0.8508	-	-0.1535	-0.1539	0.8331	-0.1530	-0.1530	1.0328
8	0.8678	-	-0.1549	-0.1555	0.8692	-0.1543	-0.1543	-
9	0.8113	-	-0.1460	-0.1464	0.8053	-0.1455	-0.1455	0.9886
10	0.8148	-	-0.1466	-0.1470	0.8090	-0.1461	-0.1461	0.9920
11	0.8426	-	-0.1504	-0.1510	0.8439	-0.1498	-0.1498	-
12	0.7910	-	-0.1421	-0.1425	0.7882	-0.1416	-0.1416	0.9660
13	-0.1669	1.0961	-0.1662	-0.1668	-0.1656	-0.1655	-0.1655	-
14	-0.1552	0.99873	-0.1547	-0.1551	-0.1545	-0.1545	-0.1545	1.0361

ตารางที่ ข.18 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 8 (ต่อ)

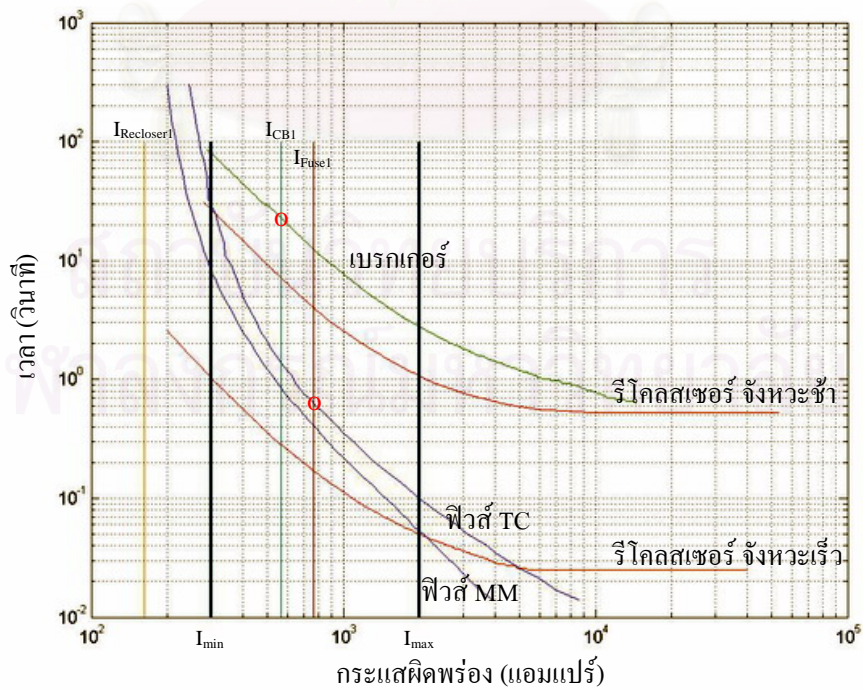
Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I CB_4 (kA)	I R_1 (kA)	I R_3 (kA)	I R_4 (kA)	I fuse (kA)
15	-0.1609	1.0571	-0.1602	-0.1608	-0.1597	-0.1596	-0.1596	-
16	-0.1510	0.9816	-0.1504	-0.1509	-0.1501	-0.1500	-0.1500	1.0003
17	-0.1680	-	0.9377	-0.1679	-0.1667	-0.1748	-0.1666	-
18	-0.1588	-	0.8658	-0.1587	-0.1581	-0.1615	-0.1580	1.0653
19	-0.1612	-	0.8996	-0.1611	-0.1599	0.9003	-0.1598	-
20	-0.1517	-	0.8378	-0.1516	-0.1509	0.82016	-0.1508	1.0199
21	-0.1511	-	0.8339	-0.1510	-0.1502	0.81649	-0.1501	1.0163
22	-0.1564	-	0.8728	-0.1563	-0.1551	0.8735	-0.1551	-
23	-0.1478	-	0.8187	-0.1477	-0.1468	0.8111	-0.1468	0.9958
24	-0.1472	-	0.8151	-0.1471	-0.1463	0.8073	-0.1462	0.9924
25	-0.1507	-	0.8412	-0.1506	-0.1495	0.8418	-0.1494	-
26	-0.1445	-	0.8029	-0.1444	-0.1435	0.8003	-0.1434	0.9772
27	-0.1676	-	-0.1668	0.9346	-0.1663	-0.1662	-0.1748	-
28	-0.1563	-	-0.1558	0.8518	-0.1556	-0.1556	-0.1598	1.0518
29	-0.1585	-	-0.1579	0.8639	-0.1578	-0.1577	-0.1616	1.0632
30	-0.1612	-	-0.1605	0.8991	-0.1599	-0.1599	0.9004	-
31	-0.1537	-	-0.1531	0.8490	-0.1528	-0.1527	0.8310	1.0307
32	-0.1511	-	-0.1505	0.8331	-0.1502	-0.1502	0.8158	1.0164
33	-0.1552	-	-0.1545	0.8658	-0.1540	-0.1539	0.8671	-
34	-0.1462	-	-0.1456	0.8095	-0.1453	-0.1452	0.8034	0.9866
35	-0.1507	-	-0.1500	0.8407	-0.1495	-0.1495	0.8420	-
36	-0.1428	-	-0.1423	0.7926	-0.1419	-0.1418	0.7898	0.9675
37	-0.1423	-	-0.1418	0.7893	-0.1414	-0.1413	0.7864	0.9642

ข.3 ตัวอย่างลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

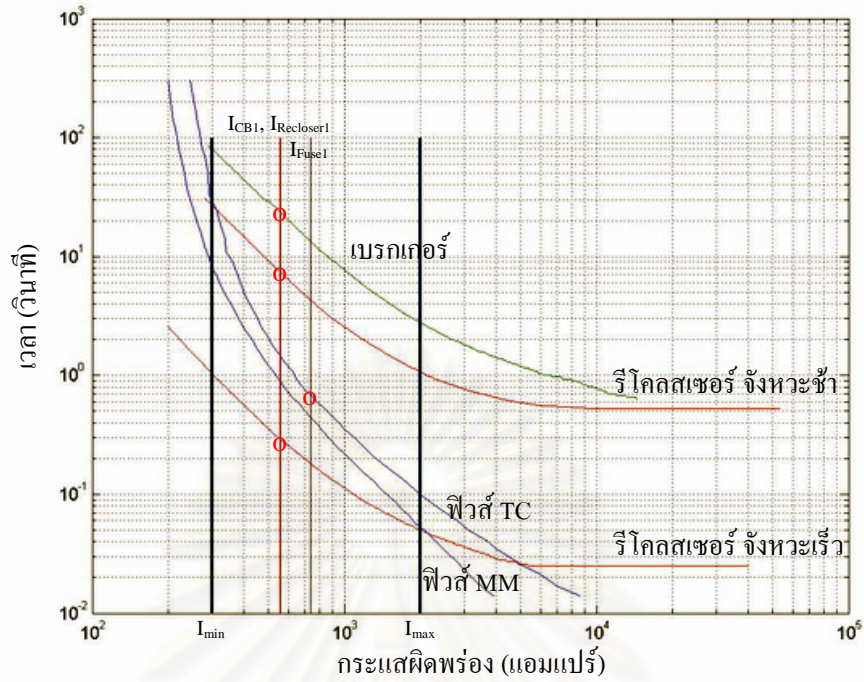
กรณีติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ตำแหน่ง D (กรณีที่ 2)



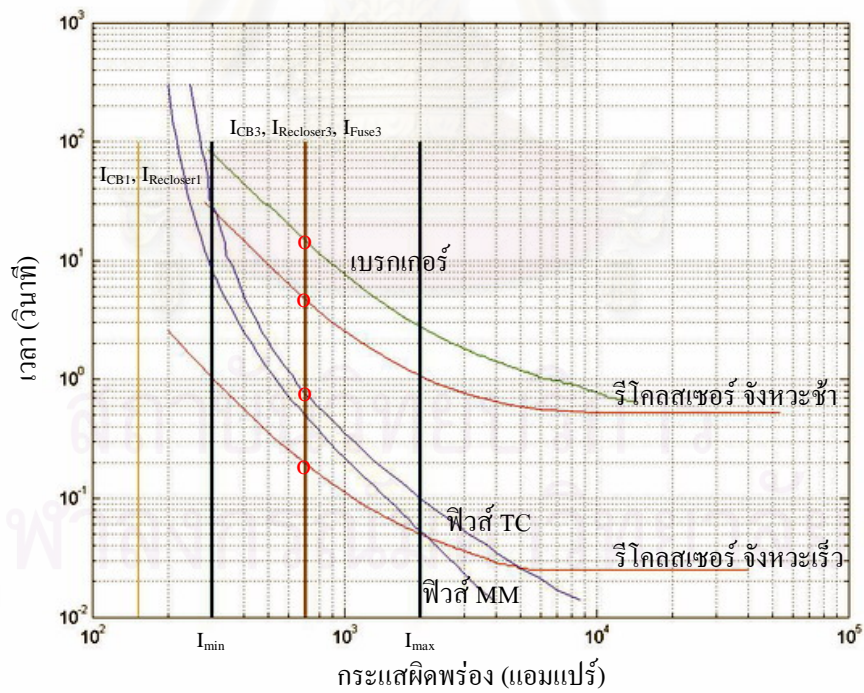
รูปที่ ข.1 ระบบทดสอบ RBTS BUS 2 กรณีติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ตำแหน่ง D (กรณีที่ 2)



รูปที่ ข.2 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่งโหลดที่ 2 (บัสที่ 4)



รูปที่ ข.3 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่ง โหลดที่ 6 (บัสที่ 10)



รูปที่ ข.4 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่ง โหลดที่ 14 (บัสที่ 24)

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของ กฟภ.

ภาคผนวก ค จะแสดงผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และกระแสผิดพลาดของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในแต่ละกรณี

ค.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีฐาน

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0000	0.0000	2.4761	2.1252	-	-
2	0.9993	-0.0121	-	-	-	-
3	0.9405	-1.6971	-	-	0.045	0.036
4	0.9991	-0.0160	-	-	-	-
5	0.9232	-2.0641	-	-	0.150	0.120
6	0.9975	-0.0426	-	-	-	-
7	0.9354	-1.3133	-	-	0.075	0.060
8	0.9973	-0.0472	-	-	-	-
9	0.9383	-1.7395	-	-	0.045	0.036
10	0.9970	-0.0515	-	-	-	-
11	0.9210	-2.1078	-	-	0.150	0.120
12	0.9962	-0.0654	-	-	-	-
13	0.9372	-1.7615	-	-	0.045	0.036
14	0.9372	-1.7615	-	-	0.045	0.036
15	0.9956	-0.0752	-	-	-	-
16	0.9366	-1.7734	-	-	0.045	0.036
17	0.9951	-0.0852	-	-	-	-
18	0.9360	-1.7855	-	-	0.045	0.036
19	0.9946	-0.0934	-	-	-	-

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีฐาน (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
20	0.9184	-2.1606	-	-	0.150	0.120
21	0.9941	-0.1020	-	-	-	-
22	0.9349	-1.8059	-	-	0.045	0.036
23	0.9349	-1.8059	-	-	0.045	0.036
24	0.9937	-0.1090	-	-	-	-
25	0.9174	-2.1803	-	-	0.150	0.120
26	0.9936	-0.1098	-	-	-	-
27	0.9344	-1.8153	-	-	0.045	0.036
28	0.9999	-0.0022	-	-	-	-
29	0.9290	-2.5416	-	-	0.375	0.300
30	0.9997	-0.0051	-	-	-	-
31	0.9409	-1.6886	-	-	0.045	0.036
32	0.9409	-1.6899	-	-	0.045	0.036
33	0.9995	-0.0082	-	-	-	-
34	0.9407	-1.6923	-	-	0.045	0.036
35	0.9994	-0.0099	-	-	-	-
36	0.9406	-1.6943	-	-	0.045	0.036
37	0.9994	-0.0106	-	-	-	-
38	0.9406	-1.6952	-	-	0.045	0.036
39	0.9996	-0.0078	-	-	-	-
40	0.9408	-1.6918	-	-	0.045	0.036
41	0.9994	-0.0102	-	-	-	-
42	0.9236	-2.0568	-	-	0.150	0.120
43	0.9986	-0.0251	-	-	-	-
44	0.9365	-1.2930	-	-	0.075	0.060
45	0.9984	-0.0274	-	-	-	-
46	0.9396	-1.7155	-	-	0.045	0.036
47	0.9983	-0.0295	-	-	-	-
48	0.9224	-2.0800	-	-	0.150	0.120

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีฐาน (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
49	0.9980	-0.0346	-	-	-	-
50	0.9391	-1.7242	-	-	0.045	0.036
51	0.9391	-1.7242	-	-	0.045	0.036
52	0.9978	-0.0379	-	-	-	-
53	0.9389	-1.7282	-	-	0.045	0.036
54	0.9977	-0.0398	-	-	-	-
55	0.9388	-1.7304	-	-	0.045	0.036
56	0.9977	-0.0406	-	-	-	-
57	0.9387	-1.7315	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 1

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.0000	1.4996	1.1005	-	-
2	1.0500	-0.0041	0.96455	0.99931	-	-
3	0.9944	-1.5207	-	-	0.045	0.036
4	1.0498	-0.0076	-	-	-	-
5	0.9782	-1.8471	-	-	0.150	0.120
6	1.0483	-0.0318	-	-	-	-
7	0.9896	-1.1746	-	-	0.075	0.060
8	1.0481	-0.0359	-	-	-	-
9	0.9924	-1.5584	-	-	0.045	0.036
10	1.0478	-0.0398	-	-	-	-
11	0.9762	-1.8857	-	-	0.150	0.120
12	1.0471	-0.0524	-	-	-	-
13	0.9913	-1.5780	-	-	0.045	0.036
14	0.9913	-1.5780	-	-	0.045	0.036
15	1.0465	-0.0614	-	-	-	-
16	0.9907	-1.5887	-	-	0.045	0.036
17	1.0460	-0.0704	-	-	-	-

ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 1 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
18	0.9902	-1.5994	-	-	0.045	0.036
19	1.0455	-0.0779	-	-	-	-
20	0.9737	-1.9325	-	-	0.150	0.120
21	1.0451	-0.0857	-	-	-	-
22	0.9892	-1.6175	-	-	0.045	0.036
23	0.9892	-1.6175	-	-	0.045	0.036
24	1.0447	-0.0921	-	-	-	-
25	0.9728	-1.9500	-	-	0.150	0.120
26	1.0446	-0.0928	-	-	-	-
27	0.9887	-1.6259	-	-	0.045	0.036
28	1.0499	-0.0020	-	-	-	-
29	0.9830	-2.2875	-	-	0.375	0.300
30	1.0497	-0.0047	-	-	-	-
31	0.9941	-1.5221	-	-	0.045	0.036
32	0.9941	-1.5232	-	-	0.045	0.036
33	1.0496	-0.0074	-	-	-	-
34	0.9939	-1.5254	-	-	0.045	0.036
35	1.0495	-0.0090	-	-	-	-
36	0.9939	-1.5272	-	-	0.045	0.036
37	1.0494	-0.0097	-	-	-	-
38	0.9938	-1.5280	-	-	0.045	0.036
39	1.0496	-0.0071	-	-	-	-
40	0.9940	-1.5249	-	-	0.045	0.036
41	1.0494	-0.0093	-	-	-	-
42	0.9779	-1.8500	-	-	0.150	0.120
43	1.0486	-0.0228	-	-	-	-
44	0.9900	-1.1649	-	-	0.075	0.060
45	1.0485	-0.0250	-	-	-	-
46	0.9928	-1.5461	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 1 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
47	1.0484	-0.0269	-	-	-	-
48	0.9768	-1.8706	-	-	0.150	0.120
49	1.0481	-0.0315	-	-	-	-
50	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
51	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
52	1.0479	-0.0345	-	-	-	-
53	0.9922	-1.5574	-	-	0.045	0.036
54	1.0478	-0.0362	-	-	-	-
55	0.9921	-1.5594	-	-	0.045	0.036
56	1.0478	-0.0370	-	-	-	-
57	0.9921	-1.5603	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 2

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.0000	1.6119	1.3557	-	-
2	1.0498	-0.0029	-	-	-	-
3	0.9943	-1.5200	-	-	0.045	0.036
4	1.0498	-0.0038	-	-	-	-
5	0.9783	-1.8431	-	-	0.150	0.120
6	1.0497	-0.0063	-	-	-	-
7	0.9911	-1.1460	-	-	0.075	0.060
8	1.0497	-0.0064	-	-	-	-
9	0.9941	-1.5239	-	-	0.045	0.036
10	1.0497	-0.0063	-	-	-	-
11	0.9782	-1.8449	-	-	0.150	0.120
12	1.0500	-0.0026	0.85045	0.74111	-	-
13	0.9944	-1.5192	-	-	0.045	0.036
14	0.9944	-1.5192	-	-	0.045	0.036
15	1.0495	-0.0116	-	-	-	-

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 2 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
16	0.9939	-1.5298	-	-	0.045	0.036
17	1.0489	-0.0206	-	-	-	-
18	0.9933	-1.5404	-	-	0.045	0.036
19	1.0485	-0.0280	-	-	-	-
20	0.9769	-1.8714	-	-	0.150	0.120
21	1.0480	-0.0358	-	-	-	-
22	0.9923	-1.5585	-	-	0.045	0.036
23	0.9923	-1.5585	-	-	0.045	0.036
24	1.0476	-0.0421	-	-	-	-
25	0.9760	-1.8887	-	-	0.150	0.120
26	1.0476	-0.0428	-	-	-	-
27	0.9919	-1.5668	-	-	0.045	0.036
28	1.0499	-0.0020	-	-	-	-
29	0.9830	-2.2875	-	-	0.375	0.300
30	1.0497	-0.0047	-	-	-	-
31	0.9941	-1.5221	-	-	0.045	0.036
32	0.9941	-1.5232	-	-	0.045	0.036
33	1.0496	-0.0074	-	-	-	-
34	0.9939	-1.5254	-	-	0.045	0.036
35	1.0495	-0.0090	-	-	-	-
36	0.9939	-1.5272	-	-	0.045	0.036
37	1.0494	-0.0097	-	-	-	-
38	0.9938	-1.5280	-	-	0.045	0.036
39	1.0496	-0.0071	-	-	-	-
40	0.9940	-1.5249	-	-	0.045	0.036
41	1.0494	-0.0093	-	-	-	-
42	0.9779	-1.8500	-	-	0.150	0.120
43	1.0486	-0.0228	-	-	-	-
44	0.9900	-1.1649	-	-	0.075	0.060

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 2 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
45	1.0485	-0.0250	-	-	-	-
46	0.9928	-1.5461	-	-	0.045	0.036
47	1.0484	-0.0269	-	-	-	-
48	0.9768	-1.8706	-	-	0.150	0.120
49	1.0481	-0.0315	-	-	-	-
50	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
51	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
52	1.0479	-0.0345	-	-	-	-
53	0.9922	-1.5574	-	-	0.045	0.036
54	1.0478	-0.0362	-	-	-	-
55	0.9921	-1.5594	-	-	0.045	0.036
56	1.0478	-0.0370	-	-	-	-
57	0.9921	-1.5603	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.4 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 3

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.0000	2.1756	1.8225	-	-
2	1.0495	-0.0087	-	-	-	-
3	0.9939	-1.5267	-	-	0.045	0.036
4	1.0494	-0.0114	-	-	-	-
5	0.9778	-1.8524	-	-	0.150	0.120
6	1.0484	-0.0292	-	-	-	-
7	0.9897	-1.1719	-	-	0.075	0.060
8	1.0482	-0.0321	-	-	-	-
9	0.9926	-1.5541	-	-	0.045	0.036
10	1.0481	-0.0348	-	-	-	-
11	0.9765	-1.8797	-	-	0.150	0.120
12	1.0477	-0.0426	-	-	-	-
13	0.9920	-1.5663	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.4 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 3 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
14	0.9920	-1.5663	-	-	0.045	0.036
15	1.0475	-0.0476	-	-	-	-
16	0.9917	-1.5720	-	-	0.045	0.036
17	1.0473	-0.0522	-	-	-	-
18	0.9915	-1.5772	-	-	0.045	0.036
19	1.0471	-0.0557	-	-	-	-
20	0.9754	-1.9043	-	-	0.150	0.120
21	1.0471	-0.0571	-	-	-	-
22	0.9914	-1.5824	-	-	0.045	0.036
23	0.9914	-1.5824	-	-	0.045	0.036
24	1.0473	-0.0558	-	-	-	-
25	0.9756	-1.9036	-	-	0.150	0.120
26	1.0476	-0.0529	0.28716	0.27503	-	-
27	0.9918	-1.5769	-	-	0.045	0.036
28	1.0499	-0.0020	-	-	-	-
29	0.9830	-2.2875	-	-	0.375	0.300
30	1.0497	-0.0047	-	-	-	-
31	0.9941	-1.5221	-	-	0.045	0.036
32	0.9941	-1.5232	-	-	0.045	0.036
33	1.0496	-0.0074	-	-	-	-
34	0.9939	-1.5254	-	-	0.045	0.036
35	1.0495	-0.0090	-	-	-	-
36	0.9939	-1.5272	-	-	0.045	0.036
37	1.0494	-0.0097	-	-	-	-
38	0.9938	-1.5280	-	-	0.045	0.036
39	1.0496	-0.0071	-	-	-	-
40	0.9940	-1.5249	-	-	0.045	0.036
41	1.0494	-0.0093	-	-	-	-
42	0.9779	-1.8500	-	-	0.150	0.120

ตารางที่ ค.4 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 3 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
43	1.0486	-0.0228	-	-	-	-
44	0.9900	-1.1649	-	-	0.075	0.060
45	1.0485	-0.0250	-	-	-	-
46	0.9928	-1.5461	-	-	0.045	0.036
47	1.0484	-0.0269	-	-	-	-
48	0.9768	-1.8706	-	-	0.150	0.120
49	1.0481	-0.0315	-	-	-	-
50	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
51	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
52	1.0479	-0.0345	-	-	-	-
53	0.9922	-1.5574	-	-	0.045	0.036
54	1.0478	-0.0362	-	-	-	-
55	0.9921	-1.5594	-	-	0.045	0.036
56	1.0478	-0.0370	-	-	-	-
57	0.9921	-1.5603	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.5 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 4

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.0000	1.2687	1.1389	-	-
2	1.0500	0.0015	0.87178	0.7229	-	-
3	0.9944	-1.5151	-	-	0.045	0.036
4	1.0499	-0.0008	-	-	-	-
5	0.9783	-1.8399	-	-	0.150	0.120
6	1.0489	-0.0151	-	-	-	-
7	0.9902	-1.1567	-	-	0.075	0.060
8	1.0487	-0.0174	-	-	-	-
9	0.9931	-1.5379	-	-	0.045	0.036
10	1.0486	-0.0195	-	-	-	-
11	0.9770	-1.8626	-	-	0.150	0.120

ตารางที่ ค.5 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 4 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
12	1.0482	-0.0247	-	-	-	-
13	0.9925	-1.5469	-	-	0.045	0.036
14	0.9925	-1.5469	-	-	0.045	0.036
15	1.0479	-0.0275	-	-	-	-
16	0.9922	-1.5504	-	-	0.045	0.036
17	1.0477	-0.0297	-	-	-	-
18	0.9920	-1.5533	-	-	0.045	0.036
19	1.0475	-0.0309	-	-	-	-
20	0.9759	-1.8779	-	-	0.150	0.120
21	1.0475	-0.0288	-	-	-	-
22	0.9918	-1.5530	-	-	0.045	0.036
23	0.9918	-1.5530	-	-	0.045	0.036
24	1.0477	-0.0234	-	-	-	-
25	0.9761	-1.8697	-	-	0.150	0.120
26	1.0479	-0.0186	0.32198	0.23528	-	-
27	0.9922	-1.5415	-	-	0.045	0.036
28	1.0499	-0.0020	-	-	-	-
29	0.9830	-2.2875	-	-	0.375	0.300
30	1.0497	-0.0047	-	-	-	-
31	0.9941	-1.5221	-	-	0.045	0.036
32	0.9941	-1.5232	-	-	0.045	0.036
33	1.0496	-0.0074	-	-	-	-
34	0.9939	-1.5254	-	-	0.045	0.036
35	1.0495	-0.0090	-	-	-	-
36	0.9939	-1.5272	-	-	0.045	0.036
37	1.0494	-0.0097	-	-	-	-
38	0.9938	-1.5280	-	-	0.045	0.036
39	1.0496	-0.0071	-	-	-	-
40	0.9940	-1.5249	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.5 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 4 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
41	1.0494	-0.0093	-	-	-	-
42	0.9779	-1.8500	-	-	0.150	0.120
43	1.0486	-0.0228	-	-	-	-
44	0.9900	-1.1649	-	-	0.075	0.060
45	1.0485	-0.0250	-	-	-	-
46	0.9928	-1.5461	-	-	0.045	0.036
47	1.0484	-0.0269	-	-	-	-
48	0.9768	-1.8706	-	-	0.150	0.120
49	1.0481	-0.0315	-	-	-	-
50	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
51	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
52	1.0479	-0.0345	-	-	-	-
53	0.9922	-1.5574	-	-	0.045	0.036
54	1.0478	-0.0362	-	-	-	-
55	0.9921	-1.5594	-	-	0.045	0.036
56	1.0478	-0.0370	-	-	-	-
57	0.9921	-1.5603	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.6 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 5

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.0000	1.0692	0.85918	-	-
2	1.0499	-0.0030	-	-	-	-
3	0.9943	-1.5200	-	-	0.045	0.036
4	1.0498	-0.0038	-	-	-	-
5	0.9783	-1.8431	-	-	0.150	0.120
6	1.0497	-0.0063	-	-	-	-
7	0.9911	-1.1459	-	-	0.075	0.060
8	1.0497	-0.0064	-	-	-	-
9	0.9941	-1.5238	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.6 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 5 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
10	1.0498	-0.0063	-	-	-	-
11	0.9783	-1.8448	-	-	0.150	0.120
12	1.0500	-0.0027	0.85663	0.75097	-	-
13	0.9945	-1.5191	-	-	0.045	0.036
14	0.9945	-1.5191	-	-	0.045	0.036
15	1.0495	-0.0116	-	-	-	-
16	0.9939	-1.5297	-	-	0.045	0.036
17	1.0490	-0.0206	-	-	-	-
18	0.9933	-1.5404	-	-	0.045	0.036
19	1.0485	-0.0280	-	-	-	-
20	0.9769	-1.8713	-	-	0.150	0.120
21	1.0480	-0.0358	-	-	-	-
22	0.9923	-1.5584	-	-	0.045	0.036
23	0.9923	-1.5584	-	-	0.045	0.036
24	1.0477	-0.0421	-	-	-	-
25	0.9760	-1.8886	-	-	0.150	0.120
26	1.0476	-0.0428	-	-	-	-
27	0.9919	-1.5667	-	-	0.045	0.036
28	1.0499	-0.0020	-	-	-	-
29	0.9830	-2.2875	-	-	0.375	0.300
30	1.0497	-0.0047	-	-	-	-
31	0.9941	-1.5221	-	-	0.045	0.036
32	0.9941	-1.5232	-	-	0.045	0.036
33	1.0496	-0.0074	-	-	-	-
34	0.9939	-1.5254	-	-	0.045	0.036
35	1.0495	-0.0090	-	-	-	-
36	0.9939	-1.5272	-	-	0.045	0.036
37	1.0494	-0.0097	-	-	-	-
38	0.9938	-1.5280	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.6 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 5 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
39	1.0499	-0.0022	-	-	-	-
40	0.9943	-1.5191	-	-	0.045	0.036
41	1.0499	-0.0028	-	-	-	-
42	0.9784	-1.8418	-	-	0.150	0.120
43	1.0500	-0.0034	-	-	-	-
44	0.9914	-1.1425	-	-	0.075	0.060
45	1.0500	-0.0031	-	-	-	-
46	0.9944	-1.5198	-	-	0.045	0.036
47	1.0500	-0.0026	0.53584	0.48552	-	-
48	0.9786	-1.8402	-	-	0.150	0.120
49	1.0498	-0.0072	-	-	-	-
50	0.9942	-1.5245	-	-	0.045	0.036
51	0.9942	-1.5245	-	-	0.045	0.036
52	1.0496	-0.0102	-	-	-	-
53	0.9940	-1.5281	-	-	0.045	0.036
54	1.0495	-0.0119	-	-	-	-
55	0.9939	-1.5301	-	-	0.045	0.036
56	1.0494	-0.0127	-	-	-	-
57	0.9938	-1.5310	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.7 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 6

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.000	2.1810	1.8176	-	-
2	1.0495	-0.0088	-	-	-	-
3	0.9939	-1.5269	-	-	0.045	0.036
4	1.0494	-0.0116	-	-	-	-
5	0.9778	-1.8526	-	-	0.150	0.120
6	1.0484	-0.0299	-	-	-	-
7	0.9897	-1.1726	-	-	0.075	0.060

ตารางที่ ค.7 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 6 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
8	1.0482	-0.0330	-	-	-	-
9	0.9926	-1.5549	-	-	0.045	0.036
10	1.0481	-0.0358	-	-	-	-
11	0.9765	-1.8806	-	-	0.150	0.120
12	1.0477	-0.0439	-	-	-	-
13	0.9920	-1.5675	-	-	0.045	0.036
14	0.9920	-1.5675	-	-	0.045	0.036
15	1.0475	-0.0492	-	-	-	-
16	0.9917	-1.5735	-	-	0.045	0.036
17	1.0473	-0.0542	-	-	-	-
18	0.9915	-1.5791	-	-	0.045	0.036
19	1.0471	-0.0579	0.14091	0.13981	-	-
20	0.9754	-1.9065	-	-	0.150	0.120
21	1.0469	-0.0628	-	-	-	-
22	0.9911	-1.5889	-	-	0.045	0.036
23	0.9911	-1.5889	-	-	0.045	0.036
24	1.0468	-0.0656	-	-	-	-
25	0.9751	-1.9154	-	-	0.150	0.120
26	1.0469	-0.0646	0.14083	0.14011	-	-
27	0.9911	-1.5907	-	-	0.045	0.036
28	1.0499	-0.0020	-	-	-	-
29	0.9830	-2.2875	-	-	0.375	0.300
30	1.0497	-0.0047	-	-	-	-
31	0.9941	-1.5221	-	-	0.045	0.036
32	0.9941	-1.5232	-	-	0.045	0.036
33	1.0496	-0.0074	-	-	-	-
34	0.9939	-1.5254	-	-	0.045	0.036
35	1.0495	-0.0090	-	-	-	-
36	0.9939	-1.5272	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.7 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 6 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
37	1.0494	-0.0097	-	-	-	-
38	0.9938	-1.528	-	-	0.045	0.036
39	1.0496	-0.0071	-	-	-	-
40	0.9940	-1.5249	-	-	0.045	0.036
41	1.0494	-0.0093	-	-	-	-
42	0.9779	-1.8500	-	-	0.150	0.120
43	1.0486	-0.0228	-	-	-	-
44	0.9900	-1.1649	-	-	0.075	0.060
45	1.0485	-0.0250	-	-	-	-
46	0.9928	-1.5461	-	-	0.045	0.036
47	1.0484	-0.0269	-	-	-	-
48	0.9768	-1.8706	-	-	0.150	0.120
49	1.0481	-0.0315	-	-	-	-
50	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
51	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
52	1.0479	-0.0345	-	-	-	-
53	0.9922	-1.5574	-	-	0.045	0.036
54	1.0478	-0.0362	-	-	-	-
55	0.9921	-1.5594	-	-	0.045	0.036
56	1.0478	-0.0370	-	-	-	-
57	0.9921	-1.5603	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.8 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 7

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0499	0.0000	1.3301	1.1668	-	-
2	1.0499	0.0005	0.30897	0.18495	-	-
3	0.9943	-1.5164	-	-	0.045	0.036
4	1.0498	-0.0005	-	-	-	-
5	0.9783	-1.8397	-	-	0.150	0.120

ตารางที่ ค.8 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 7 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
6	1.0497	-0.0048	-	-	-	-
7	0.9911	-1.1444	-	-	0.075	0.060
8	1.0497	-0.0052	-	-	-	-
9	0.9942	-1.5226	-	-	0.045	0.036
10	1.0498	-0.0054	-	-	-	-
11	0.9783	-1.8439	-	-	0.150	0.120
12	1.0500	-0.0030	0.52396	0.47791	-	-
13	0.9944	-1.5196	-	-	0.045	0.036
14	0.9944	-1.5196	-	-	0.045	0.036
15	1.0498	-0.0074	-	-	-	-
16	0.9942	-1.5246	-	-	0.045	0.036
17	1.0496	-0.0113	-	-	-	-
18	0.9940	-1.5292	-	-	0.045	0.036
19	1.0494	-0.0141	-	-	-	-
20	0.9779	-1.8539	-	-	0.150	0.120
21	1.0494	-0.0145	-	-	-	-
22	0.9938	-1.5328	-	-	0.045	0.036
23	0.9938	-1.5328	-	-	0.045	0.036
24	1.0496	-0.0120	-	-	-	-
25	0.9781	-1.8511	-	-	0.150	0.120
26	1.0499	-0.0086	0.29864	0.2661	-	-
27	0.9943	-1.5256	-	-	0.045	0.036
28	1.0498	-0.0020	-	-	-	-
29	0.9829	-2.2879	-	-	0.375	0.300
30	1.0496	-0.0047	-	-	-	-
31	0.9940	-1.5224	-	-	0.045	0.036
32	0.9940	-1.5235	-	-	0.045	0.036
33	1.0495	-0.0074	-	-	-	-
34	0.9938	-1.5257	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.8 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณี 7 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
35	1.0494	-0.0090	-	-	-	-
36	0.9937	-1.5275	-	-	0.045	0.036
37	1.0493	-0.0097	-	-	-	-
38	0.9937	-1.5283	-	-	0.045	0.036
39	1.0495	-0.0071	-	-	-	-
40	0.9939	-1.5252	-	-	0.045	0.036
41	1.0493	-0.0093	-	-	-	-
42	0.9778	-1.8503	-	-	0.150	0.120
43	1.0485	-0.0228	-	-	-	-
44	0.9899	-1.1652	-	-	0.075	0.060
45	1.0484	-0.0250	-	-	-	-
46	0.9927	-1.5464	-	-	0.045	0.036
47	1.0483	-0.0269	-	-	-	-
48	0.9767	-1.8710	-	-	0.150	0.120
49	1.0480	-0.0315	-	-	-	-
50	0.9923	-1.5542	-	-	0.045	0.036
51	0.9923	-1.5542	-	-	0.045	0.036
52	1.0478	-0.0345	-	-	-	-
53	0.9921	-1.5577	-	-	0.045	0.036
54	1.0477	-0.0362	-	-	-	-
55	0.9920	-1.5597	-	-	0.045	0.036
56	1.0477	-0.0370	-	-	-	-
57	0.9920	-1.5606	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.9 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณี 8

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.0000	2.2551	1.8892	-	-
2	1.0495	-0.0094	-	-	-	-
3	0.9939	-1.5276	-	-	0.045	0.036
4	1.0493	-0.0124	-	-	-	-
5	0.9777	-1.8537	-	-	0.150	0.120
6	1.0482	-0.0324	-	-	-	-
7	0.9895	-1.1755	-	-	0.075	0.060
8	1.0480	-0.0357	-	-	-	-
9	0.9923	-1.5583	-	-	0.045	0.036
10	1.0479	-0.0388	-	-	-	-
11	0.9762	-1.8846	-	-	0.150	0.120
12	1.0474	-0.0482	-	-	-	-
13	0.9916	-1.5728	-	-	0.045	0.036
14	0.9916	-1.5728	-	-	0.045	0.036
15	1.0471	-0.0545	-	-	-	-
16	0.9913	-1.5801	-	-	0.045	0.036
17	1.0468	-0.0606	-	-	-	-
18	0.9910	-1.5871	-	-	0.045	0.036
19	1.0466	-0.0654	0.070206	0.070896	-	-
20	0.9748	-1.9161	-	-	0.150	0.120
21	1.0463	-0.0703	0.067931	0.068629	-	-
22	0.9905	-1.5982	-	-	0.045	0.036
23	0.9905	-1.5982	-	-	0.045	0.036
24	1.0461	-0.0749	-	-	-	-
25	0.9743	-1.9274	-	-	0.150	0.120
26	1.0461	-0.0748	0.069977	0.069477	-	-
27	0.9903	-1.6033	-	-	0.045	0.036
28	1.0499	-0.0020	-	-	-	-
29	0.9830	-2.2875	-	-	0.375	0.300

ตารางที่ ค.9 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณี 8 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
30	1.0497	-0.0047	-	-	-	-
31	0.9941	-1.5221	-	-	0.045	0.036
32	0.9941	-1.5232	-	-	0.045	0.036
33	1.0496	-0.0074	-	-	-	-
34	0.9939	-1.5254	-	-	0.045	0.036
35	1.0495	-0.0090	-	-	-	-
36	0.9939	-1.5272	-	-	0.045	0.036
37	1.0494	-0.0097	-	-	-	-
38	0.9938	-1.5280	-	-	0.045	0.036
39	1.0496	-0.0071	-	-	-	-
40	0.9940	-1.5249	-	-	0.045	0.036
41	1.0494	-0.0093	-	-	-	-
42	0.9779	-1.8500	-	-	0.150	0.120
43	1.0486	-0.0228	-	-	-	-
44	0.9900	-1.1649	-	-	0.075	0.060
45	1.0485	-0.0250	-	-	-	-
46	0.9928	-1.5461	-	-	0.045	0.036
47	1.0484	-0.0269	-	-	-	-
48	0.9768	-1.8706	-	-	0.150	0.120
49	1.0481	-0.0315	-	-	-	-
50	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
51	0.9924	-1.5538	-	-	0.045	0.036
52	1.0479	-0.0345	-	-	-	-
53	0.9922	-1.5574	-	-	0.045	0.036
54	1.0478	-0.0362	-	-	-	-
55	0.9921	-1.5594	-	-	0.045	0.036
56	1.0478	-0.0370	-	-	-	-
57	0.9921	-1.5603	-	-	0.045	0.036

ตารางที่ ค.10 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณี 9

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	1.0500	0.0000	1.7595	1.4425	-	-
2	1.0495	-0.0082	-	-	-	-
3	0.9939	-1.5263	-	-	0.045	0.036
4	1.0494	-0.0108	-	-	-	-
5	0.9778	-1.8518	-	-	0.150	0.120
6	1.0484	-0.0275	-	-	-	-
7	0.9897	-1.1702	-	-	0.075	0.060
8	1.0482	-0.0302	-	-	-	-
9	0.9926	-1.5522	-	-	0.045	0.036
10	1.0481	-0.0327	-	-	-	-
11	0.9765	-1.8776	-	-	0.150	0.120
12	1.0477	-0.0397	-	-	-	-
13	0.9920	-1.5633	-	-	0.045	0.036
14	0.9920	-1.5633	-	-	0.045	0.036
15	1.0475	-0.0440	-	-	-	-
16	0.9917	-1.5683	-	-	0.045	0.036
17	1.0473	-0.0478	-	-	-	-
18	0.9915	-1.5728	-	-	0.045	0.036
19	1.0471	-0.0505	-	-	-	-
20	0.9754	-1.8992	-	-	0.150	0.120
21	1.0471	-0.0508	-	-	-	-
22	0.9914	-1.5762	-	-	0.045	0.036
23	0.9914	-1.5762	-	-	0.045	0.036
24	1.0473	-0.0482	-	-	-	-
25	0.9756	-1.8960	-	-	0.150	0.120
26	1.0475	-0.0446	0.29976	0.26429	-	-
27	0.9918	-1.5688	-	-	0.045	0.036
28	1.0499	-0.0018	-	-	-	-
29	0.9830	-2.2871	-	-	0.375	0.300

ตารางที่ ค.10 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณี 9 (ต่อ)

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
30	1.0498	-0.0036	-	-	-	-
31	0.9943	-1.5207	-	-	0.045	0.036
32	0.9942	-1.5218	-	-	0.045	0.036
33	1.0498	-0.0050	-	-	-	-
34	0.9942	-1.5221	-	-	0.045	0.036
35	1.0499	-0.0054	-	-	-	-
36	0.9943	-1.5223	-	-	0.045	0.036
37	1.0500	-0.0050	0.11522	0.1291	-	-
38	0.9944	-1.5217	-	-	0.045	0.036
39	1.0498	-0.0045	-	-	-	-
40	0.9942	-1.5218	-	-	0.045	0.036
41	1.0497	-0.0058	-	-	-	-
42	0.9781	-1.8456	-	-	0.150	0.120
43	1.0493	-0.0124	-	-	-	-
44	0.9907	-1.1529	-	-	0.075	0.060
45	1.0493	-0.0132	-	-	-	-
46	0.9937	-1.5320	-	-	0.045	0.036
47	1.0493	-0.0139	-	-	-	-
48	0.9777	-1.8543	-	-	0.150	0.120
49	1.0494	-0.0133	-	-	-	-
50	0.9937	-1.5318	-	-	0.045	0.036
51	0.9937	-1.5318	-	-	0.045	0.036
52	1.0496	-0.0106	-	-	-	-
53	0.9940	-1.5285	-	-	0.045	0.036
54	1.0498	-0.0075	-	-	-	-
55	0.9942	-1.5248	-	-	0.045	0.036
56	1.0500	-0.0040	0.28768	0.26074	-	-
57	0.9945	-1.5205	-	-	0.045	0.036

ค.2 ผลการคำนวณกระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกัน

ตารางที่ ค.11 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณีฐาน

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
1	-	-	-	-	-	-	-
2	0.6241	-	-	-	-	-	-
3	0.0233	-	-	-	-	-	0.0237
4	0.6219	-	-	-	-	-	-
5	0.0587	-	-	-	-	-	0.0596
6	0.6048	-	-	-	-	-	-
7	0.0383	-	-	-	-	-	0.0386
8	0.6017	-	-	-	-	-	-
9	0.0232	-	-	-	-	-	0.0237
10	0.5987	-	-	-	-	-	-
11	0.0585	-	-	-	-	-	0.0594
12	0.5866	-	-	-	-	-	-
13	0.0232	-	-	-	-	-	0.0237
14	0.0232	-	-	-	-	-	0.0237
15	0.5769	-	-	0.5793	-	-	-
16	0.0232	-	-	0.0233	-	-	0.0236
17	0.5665	-	-	0.5689	-	-	-
18	0.0232	-	-	0.0233	-	-	0.0236
19	0.5574	-	-	0.5597	-	-	-
20	0.0580	-	-	0.0583	-	-	0.0590
21	0.5432	-	-	0.5455	-	-	-
22	0.0231	-	-	0.0232	-	-	0.0236
23	0.0231	-	-	0.0232	-	-	0.0236
24	0.5273	-	-	0.5295	-	-	-
25	0.0577	-	-	0.0579	-	-	0.0586
26	0.5200	-	-	0.5222	-	-	-

ตารางที่ ค.11 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณีฐาน (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
27	0.0231	-	-	0.0233	-	-	0.0235
28	-	0.6313	-	-	-	-	-
29	-	0.1265	-	-	-	-	0.1307
30	-	0.6235	-	-	-	-	-
31	-	0.0234	-	-	-	-	0.0237
32	-	0.0234	-	-	-	-	0.0237
33	-	0.6106	-	-	0.6116	-	-
34	-	0.0234	-	-	0.0234	-	0.0237
35	-	0.6001	-	-	0.6011	-	-
36	-	0.0234	-	-	0.0234	-	0.0237
37	-	0.5910	-	-	0.5920	-	-
38	-	0.0233	-	-	0.0234	-	0.0237
39	-	-	0.6255	-	-	-	-
40	-	-	0.0233	-	-	-	0.0237
41	-	-	0.6233	-	-	-	-
42	-	-	0.0589	-	-	-	0.0596
43	-	-	0.6061	-	-	-	-
44	-	-	0.0384	-	-	-	0.0386
45	-	-	0.6030	-	-	-	-
46	-	-	0.0233	-	-	-	0.0237
47	-	-	0.5999	-	-	-	-
48	-	-	0.0587	-	-	-	0.0594
49	-	-	0.5878	-	-	0.5896	-
50	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
51	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
52	-	-	0.5752	-	-	0.5769	-
53	-	-	0.0233	-	-	0.0233	0.0236
54	-	-	0.5648	-	-	0.5665	-

ตารางที่ ค.11 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติพื้นฐาน (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
55	-	-	0.0232	-	-	0.0233	0.0236
56	-	-	0.5557	-	-	0.5574	-
57	-	-	0.0232	-	-	0.0233	0.0236

ตารางที่ ค.12 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 1

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.0629	-	-	-	-	-	-
2	0.6241	-	-	-	-	-	-
3	0.0214	-	-	-	-	-	0.0238
4	0.6217	-	-	-	-	-	-
5	0.0543	-	-	-	-	-	0.0601
6	0.6032	-	-	-	-	-	-
7	0.0353	-	-	-	-	-	0.0388
8	0.5998	-	-	-	-	-	-
9	0.0214	-	-	-	-	-	0.0238
10	0.5965	-	-	-	-	-	-
11	0.0541	-	-	-	-	-	0.0599
12	0.5835	-	-	-	-	-	-
13	0.0213	-	-	-	-	-	0.0237
14	0.0213	-	-	-	-	-	0.0237
15	0.5730	-	-	0.6287	-	-	-
16	0.0213	-	-	0.0234	-	-	0.0237
17	0.5619	-	-	0.6165	-	-	-
18	0.0213	-	-	0.0234	-	-	0.0237
19	0.5521	-	-	0.6058	-	-	-
20	0.0536	-	-	0.0588	-	-	0.0594
21	0.5370	-	-	0.5892	-	-	-

ตารางที่ ค.12 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 1 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
22	0.0213	-	-	0.0233	-	-	0.0236
23	0.0213	-	-	0.0233	-	-	0.0236
24	0.5201	-	-	0.5706	-	-	-
25	0.0533	-	-	0.0584	-	-	0.0590
26	0.5124	-	-	0.5621	-	-	-
27	0.0212	-	-	0.0233	-	-	0.0236
28	-0.0627	0.6888	-	-	-	-	-
29	-	0.1288	-	-	-	-	0.1330
30	-0.0619	0.6796	-	-	-	-	-
31	-	0.0235	-	-	-	-	0.0238
32	-	0.0235	-	-	-	-	0.0238
33	-0.0605	0.6643	-	-	0.6654	-	-
34	-	0.0235	-	-	0.0235	-	0.0238
35	-0.0593	0.6520	-	-	0.6530	-	-
36	-	0.0234	-	-	0.0235	-	0.0237
37	-0.0584	0.6413	-	-	0.6423	-	-
38	-	0.0234	-	-	0.0235	-	0.0237
39	-0.0622	-	0.6822	-	-	-	-
40	-	-	0.0234	-	-	-	0.0238
41	-0.0620	-	0.6796	-	-	-	-
42	-	-	0.0594	-	-	-	0.0601
43	-0.0601	-	0.6593	-	-	-	-
44	-	-	0.0386	-	-	-	0.0388
45	-0.0598	-	0.6557	-	-	-	-
46	-	-	0.0234	-	-	-	0.0238
47	-0.0595	-	0.6520	-	-	-	-
48	-	-	0.0591	-	-	-	0.0599
49	-0.0582	-	0.6378	-	-	0.6395	-

ตารางที่ ค.12 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 1 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
50	-	-	0.0234	-	-	0.0234	0.0237
51	-	-	0.0234	-	-	0.0234	0.0237
52	-0.0568	-	0.6230	-	-	0.6247	-
53	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
54	-0.0557	-	0.6109	-	-	0.6125	-
55	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
56	-0.0548	-	0.6003	-	-	0.6019	-
57	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237

ตารางที่ ค.13 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 2

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.0626	-	-	-	-	-	-
2	0.6241	-	-	-	-	-	-
3	0.0214	-	-	-	-	-	0.0238
4	0.6219	-	-	-	-	-	-
5	0.0543	-	-	-	-	-	0.0601
6	0.6048	-	-	-	-	-	-
7	0.0352	-	-	-	-	-	0.0388
8	0.6017	-	-	-	-	-	-
9	0.0213	-	-	-	-	-	0.0238
10	0.5987	-	-	-	-	-	-
11	0.0539	-	-	-	-	-	0.0599
12	0.5866	-	-	-	-	-	-
13	0.0213	-	-	-	-	-	0.0237
14	0.0213	-	-	-	-	-	0.0237
15	0.5760	-	-	0.6352	-	-	-
16	0.0212	-	-	0.0234	-	-	0.0237

ตารางที่ ค.13 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 2 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
17	0.5647	-	-	0.6228	-	-	-
18	0.0212	-	-	0.0234	-	-	0.0237
19	0.5548	-	-	0.6118	-	-	-
20	0.0534	-	-	0.0588	-	-	0.0595
21	0.5395	-	-	0.5950	-	-	-
22	0.0212	-	-	0.0233	-	-	0.0237
23	0.0212	-	-	0.0233	-	-	0.0237
24	0.5224	-	-	0.5760	-	-	-
25	0.0531	-	-	0.0585	-	-	0.0591
26	0.5146	-	-	0.5675	-	-	-
27	0.0211	-	-	0.0233	-	-	0.0236
28	-0.0623	0.6885	-	-	-	-	-
29	-	0.1288	-	-	-	-	0.1330
30	-0.0615	0.6793	-	-	-	-	-
31	-	0.0235	-	-	-	-	0.0238
32	-	0.0235	-	-	-	-	0.0238
33	-0.0601	0.6640	-	-	0.6650	-	-
34	-	0.0235	-	-	0.0235	-	0.0238
35	-0.0590	0.6517	-	-	0.6527	-	-
36	-	0.0234	-	-	0.0235	-	0.0237
37	-0.0580	0.6409	-	-	0.6420	-	-
38	-	0.0234	-	-	0.0235	-	0.0237
39	-0.0619	-	0.6818	-	-	-	-
40	-	-	0.0234	-	-	-	0.0238
41	-0.0616	-	0.6792	-	-	-	-
42	-	-	0.0594	-	-	-	0.0601
43	-0.0598	-	0.6590	-	-	-	-
44	-	-	0.0386	-	-	-	0.0388

ตารางที่ ค.13 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 2 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
45	-0.0595	-	0.6553	-	-	-	-
46	-	-	0.0234	-	-	-	0.0238
47	-0.0591	-	0.6517	-	-	-	-
48	-	-	0.0591	-	-	-	0.0599
49	-0.0578	-	0.6375	-	-	0.6392	-
50	-	-	0.0234	-	-	0.0234	0.0237
51	-	-	0.0234	-	-	0.0234	0.0237
52	-0.0565	-	0.6227	-	-	0.6243	-
53	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
54	-0.0554	-	0.6106	-	-	0.6122	-
55	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
56	-0.0544	-	0.6000	-	-	0.6016	-
57	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237

ตารางที่ ค.14 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 3

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.017	-	-	-	-	-	-
2	0.6241	-	-	-	-	-	-
3	0.0229	-	-	-	-	-	0.0237
4	0.6219	-	-	-	-	-	-
5	0.0578	-	-	-	-	-	0.0597
6	0.6048	-	-	-	-	-	-
7	0.0376	-	-	-	-	-	0.0387
8	0.6017	-	-	-	-	-	-
9	0.0228	-	-	-	-	-	0.0237
10	0.5987	-	-	-	-	-	-
11	0.0575	-	-	-	-	-	0.0595

ตารางที่ ค.14 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 3 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
12	0.5866	-	-	-	-	-	-
13	0.0228	-	-	-	-	-	0.0237
14	0.0228	-	-	-	-	-	0.0237
15	0.5769	-	-	0.5793	-	-	-
16	0.0228	-	-	0.0229	-	-	0.0237
17	0.5665	-	-	0.5689	-	-	-
18	0.0227	-	-	0.0229	-	-	0.0236
19	0.5574	-	-	0.5597	-	-	0
20	0.0570	-	-	0.0573	-	-	0.05909
21	0.5432	-	-	0.5455	-	-	0
22	0.0227	-	-	0.0228	-	-	0.0236
23	0.0227	-	-	0.0228	-	-	0.0236
24	0.5273	-	-	0.5295	-	-	-
25	0.0567	-	-	0.0569	-	-	0.0587
26	0.5200	-	-	0.5222	-	-	-
27	0.0226	-	-	0.0227	-	-	0.0236
28	-0.0165	0.6428	-	-	-	-	-
29	-	0.1270	-	-	-	-	0.1312
30	-0.0163	0.6347	-	-	-	-	-
31	-	0.0234	-	-	-	-	0.0237
32	-	0.0234	-	-	-	-	0.0237
33	-0.0160	0.6213	-	-	0.6224	-	-
34	-	0.0234	-	-	0.0234	-	0.0237
35	-0.0158	0.6105	-	-	0.6115	-	-
36	-	0.0234	-	-	0.0234	-	0.0237
37	-0.0154	0.6010	-	-	0.6021	-	-
38	-	0.0234	-	-	0.0234	-	0.0237
39	-0.0164	-	0.6368	-	-	-	-

ตารางที่ ค.14 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 3 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
40	-	-	0.0234	-	-	-	0.0237
41	-0.0163	-	0.6345	-	-	-	-
42	-	-	0.0590	-	-	-	0.0597
43	-0.0159	-	0.6168	-	-	-	-
44	-	-	0.0384	-	-	-	0.0387
45	-0.0158	-	0.6135	-	-	-	-
46	-	-	0.0233	-	-	-	0.0237
47	-0.0157	-	0.6103	-	-	-	-
48	-	-	0.0588	-	-	-	0.0595
49	-0.0154	-	0.5978	-	-	0.59955	-
50	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
51	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
52	-0.0150	-	0.5847	-	-	0.5864	-
53	-	-	0.0233	-	-	0.0233	0.0236
54	-	-	0.5741	-	-	0.5757	0
55	-	-	0.0233	-	-	0.0233	0.0236
56	-	-	0.5646	-	-	0.5663	0
57	-	-	0.0232	-	-	0.0233	0.0236

ตารางที่ ค.15 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 4

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.0745	-	-	-	-	-	-
2	0.6241	-	-	-	-	-	-
3	0.0211	-	-	-	-	-	0.0238
4	0.6217	-	-	-	-	-	-
5	0.0535	-	-	-	-	-	0.0602
6	0.6032	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ค.15 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 4 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
7	0.0347	-	-	-	-	-	0.0388
8	0.5998	-	-	-	-	-	-
9	0.0210	-	-	-	-	-	0.0236
10	0.5965	-	-	-	-	-	-
11	0.0532	-	-	-	-	-	0.0600
12	0.5835	-	-	-	-	-	-
13	0.0210	-	-	-	-	-	0.0237
14	0.0210	-	-	-	-	-	0.0237
15	0.5730	-	-	0.6287	-	-	-
16	0.0210	-	-	0.0230	-	-	0.0237
17	0.5619	-	-	0.6165	-	-	-
18	0.0209	-	-	0.0230	-	-	0.0237
19	0.5521	-	-	0.6058	-	-	-
20	0.0527	-	-	0.0578	-	-	0.0595
21	0.5370	-	-	0.5892	-	-	-
22	0.0209	-	-	0.0229	-	-	0.0237
23	0.0209	-	-	0.0229	-	-	0.0237
24	0.5201	-	-	0.5706	-	-	-
25	0.0524	-	-	0.0574	-	-	0.0592
26	0.5124	-	-	0.5621	-	-	-
27	0.0208	-	-	0.0228	-	-	0.0236
28	-0.0742	0.7003	-	-	-	-	-
29	-	0.1292	-	-	-	-	0.1334
30	-0.0732	0.6908	-	-	-	-	-
31	-	0.0235	-	-	-	-	0.0238
32	-	0.0235	-	-	-	-	0.0238
33	-0.0715	0.6750	-	-	0.6760	-	-
34	-	0.0235	-	-	0.0235	-	0.0238

ตารางที่ ค.15 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 4 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
35	-0.0702	0.6623	-	-	0.6633	-	-
36	-	0.0235	-	-	0.0235	-	0.0238
37	-0.0690	0.6512	-	-	0.6522	-	-
38	-	0.0234	-	-	0.0235	-	0.0237
39	-0.0736	-	0.6935	-	-	-	-
40	-	-	0.0234	-	-	-	0.0238
41	-0.0733	-	0.69077	-	-	-	-
42	-	-	0.0595	-	-	-	0.0602
43	-0.0711	-	0.6699	-	-	-	-
44	-	-	0.0386	-	-	-	0.0388
45	-0.0707	-	0.6661	-	-	-	-
46	-	-	0.0234	-	-	-	0.0238
47	-0.0703	-	0.6623	-	-	-	-
48	-	-	0.0592	-	-	-	0.0600
49	-0.0688	-	0.6477	-	-	0.6494	-
50	-	-	0.0234	-	-	0.0234	0.0237
51	-	-	0.0234	-	-	0.0234	0.0237
52	-0.0671	-	0.6324	-	-	0.6341	-
53	-	-	0.0234	-	-	0.0234	0.0237
54	-0.0658	-	0.6199	-	-	0.6216	-
55	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
56	-0.0647	-	0.6090	-	-	0.6106	-
57	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237

ตารางที่ ค.16 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 5

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.0626	-	-0.0325	-	-	-	-
2	0.6524	-	-0.0321	-	-	-	-
3	0.0215	-	-	-	-	-	0.0238
4	0.6500	-	-0.0320	-	-	-	-
5	0.0547	-	-	-	-	-	0.0603
6	0.6315	-	-0.0311	-	-	-	-
7	0.0354	-	-	-	-	-	0.0389
8	0.6281	-	-0.0309	-	-	-	-
9	0.0214	-	-	-	-	-	0.0238
10	0.6247	-	-0.0308	-	-	-	-
11	0.0543	-	-	-	-	-	0.0601
12	0.6117	-	-0.0301	-	-	-	-
13	0.0214	-	-	-	-	-	0.0238
14	0.0214	-	-	-	-	-	0.0238
15	0.6002	-	-0.0296	0.6593	-	-	-
16	0.0214	-	-	0.0234	-	-	0.0238
17	0.5880	-	-0.0290	0.6460	-	-	-
18	0.0213	-	-	0.0234	-	-	0.0237
19	0.5773	-	-0.0284	0.6342	-	-	-
20	0.0538	-	-	0.0591	-	-	0.0597
21	0.5609	-	-0.0276	0.6161	-	-	-
22	0.0213	-	-	0.0234	-	-	0.0237
23	0.0213	-	-	0.0234	-	-	0.0237
24	0.5424	-	-0.0267	0.5959	-	-	-
25	0.0535	-	-	0.0587	-	-	0.0593
26	0.5340	-	-0.0263	0.5867	-	-	-
27	0.0213	-	-	0.0233	-	-	0.0236
28	-0.0623	0.7172	-0.0324	-	-	-	-

ตารางที่ ค.16 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 5 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
29	-	0.1298	-	-	-	-	0.1340
30	-0.0615	0.7072	-0.0319	-	-	-	-
31	-	0.0235	-	-	-	-	0.0238
32	-	0.0235	-	-	-	-	0.0238
33	-0.0600	0.6907	-0.0312	-	0.6917	-	-
34	-	0.0235	-	-	0.0235	-	0.0238
35	-0.0589	0.6774	-0.0306	-	0.6785	-	-
36	-	0.0235	0.0000	-	0.0235	-	0.0238
37	-0.0579	0.6659	-0.0300	-	0.6669	-	-
38	-	0.0235	-	-	0.0235	-	0.0238
39	-0.0619	-	0.6818	-	-	-	-
40	-	-	0.0225	-	-	-	0.0238
41	-0.0616	-	0.6792	-	-	-	-
42	-	-	0.0572	-	-	-	0.0603
43	-0.0598	-	0.6590	-	-	-	-
44	-	-	0.0371	-	-	-	0.0389
45	-0.0595	-	0.6553	-	-	-	-
46	-	-	0.0225	-	-	-	0.0238
47	-0.0591	-	0.6517	-	-	-	-
48	-	-	0.0569	-	-	-	0.0601
49	-0.0578	-	0.6369	-	-	0.6669	-
50	-	-	0.0224	-	-	0.0235	0.0238
51	-	-	0.0224	-	-	0.0235	0.0238
52	-0.0564	-	0.6215	-	-	0.6508	-
53	-	-	0.0224	-	-	0.0234	0.0237
54	-0.0553	-	0.6090	-	-	0.6377	-
55	-	-	0.0224	-	-	0.0234	0.0237
56	-0.0543	-	0.5980	-	-	0.6262	-
57	-	-	0.0224	-	-	0.0234	0.0237

ตารางที่ ค.17 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 6

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.0282	-	-	-0.0255	-	-	-
2	0.6241	-	-	-0.0256	-	-	-
3	0.0225	-	-	-	-	-	0.0237
4	0.6219	-	-	-0.0256	-	-	-
5	0.0569	-	-	-	-	-	0.0598
6	0.6048	-	-	-0.0256	-	-	-
7	0.0370	-	-	-	-	-	0.0387
8	0.6017	-	-	-0.0256	-	-	-
9	0.0224	-	-	-	-	-	0.0237
10	0.5987	-	-	-0.0256	-	-	-
11	0.0566	-	-	-	-	-	0.0596
12	0.5866	-	-	-0.0257	-	-	-
13	0.0224	-	-	-	-	-	0.0237
14	0.0224	-	-	-	-	-	0.0237
15	0.5769	-	-	0.5793	-	-	-
16	0.0224	-	-	0.0225	-	-	0.0237
17	0.5665	-	-	0.5689	-	-	-
18	0.0223	-	-	0.0224	-	-	0.0237
19	0.5574	-	-	0.5597	-	-	-
20	0.0560	-	-	0.0563	-	-	0.0592
21	0.5430	-	-	0.5453	-	-	-
22	0.0223	-	-	0.0224	-	-	0.0236
23	0.0223	-	-	0.0224	-	-	0.0236
24	0.5267	-	-	0.5290	-	-	-
25	0.0556	-	-	0.0559	-	-	0.0588
26	0.5194	-	-	0.5216	-	-	-
27	0.0222	-	-	0.0223	-	-	0.0236
28	-0.0280	0.6542	-	-0.0255	-	-	-

ตารางที่ ค.17 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 6 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
29	-	0.1275	-	-	-	-	0.1317
30	-0.0276	0.6459	-	-0.0252	-	-	-
31	-	0.0234	-	-	-	-	0.0237
32	-	0.0234	-	-	-	-	0.0237
33	-0.0270	0.6320	-	-0.0246	0.6331	-	-
34	-	0.0234	-	-	0.0235	-	0.0237
35	-0.0265	0.6208	-	-0.0242	0.6219	-	-
36	-	0.0234	-	-	0.0234	-	0.0237
37	-0.0261	0.6111	-	-0.0238	0.6121	-	-
38	-	0.0234	-	-	0.0234	-	0.0237
39	-0.0278	-	0.6480	-0.0253	-	-	-
40	-	-	0.0234	-	-	-	0.0237
41	-0.0277	-	0.6457	-0.0252	-	-	-
42	-	-	0.0591	-	-	-	0.0598
43	-0.0269	-	0.6274	-0.0245	-	-	-
44	-	-	0.0385	-	-	-	0.0387
45	-0.0267	-	0.6240	-0.0244	-	-	-
46	-	-	0.0233	-	-	-	0.0237
47	-0.0266	-	0.6207	-0.0242	-	-	-
48	-	-	0.0589	-	-	-	0.0596
49	-0.0260	-	0.6078	-0.0237	-	0.6095	-
50	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
51	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
52	-0.0255	-	0.5943	-0.0232	-	0.5960	-
53	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
54	-0.0250	-	0.5832	-0.0228	-	0.5849	-
55	-	-	0.0233	-	-	0.0233	0.0236
56	-0.0246	-	0.5735	-0.0224	-	0.5752	-
57	-	-	0.0233	-	-	0.0233	0.0236

ตารางที่ ค.18 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 7

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.0570	-	-	-0.0140	-	-	-
2	0.6241	-	-	-0.0140	-	-	-
3	0.0216	-	-	-	-	-	0.0238
4	0.6218	-	-	-0.0140	-	-	-
5	0.0547	-	-	-	-	-	0.0601
6	0.6045	-	-	-0.0140	-	-	-
7	0.0355	-	-	-	-	-	0.0388
8	0.6014	-	-	-0.0140	-	-	-
9	0.0215	-	-	-	-	-	0.0238
10	0.5982	-	-	-0.0140	-	-	-
11	0.0544	-	-	-	-	-	0.0599
12	0.5860	-	-	-0.0141	-	-	-
13	0.0215	-	-	-	-	-	0.0237
14	0.0215	-	-	-	-	-	0.0237
15	0.5757	-	-	0.6172	-	-	-
16	0.0214	-	-	0.0230	-	-	0.0237
17	0.5647	-	-	0.6054	-	-	-
18	0.0214	-	-	0.0229	-	-	0.0237
19	0.5550	-	-	0.5951	-	-	-
20	0.0539	-	-	0.0577	-	-	0.0594
21	0.5401	-	-	0.5791	-	-	-
22	0.0214	-	-	0.0229	-	-	0.0237
23	0.0214	-	-	0.0229	-	-	0.0237
24	0.5234	-	-	0.5611	-	-	-
25	0.0535	-	-	0.0573	-	-	0.0591
26	0.5158	-	-	0.5530	-	-	-
27	0.0213	-	-	0.0228	-	-	0.0236
28	-0.0567	0.6829	-	-0.0139	-	-	-

ตารางที่ ค.18 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 7 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
29	-0.0107	0.1286	-	-	-	-	0.1328
30	-0.0560	0.6738	-	-0.0138	-	-	-
31	-	0.0235	-	-	-	-	0.0238
32	-	0.0235	-	-	-	-	0.0238
33	-0.0547	0.6588	-	-0.0134	0.6598	-	-
34	-	0.0235	-	-	0.0235	-	0.0238
35	-0.0537	0.6467	-	-0.0132	0.6477	-	-
36	-	0.0234	-	-	0.0235	-	0.0237
37	-0.0528	0.6361	-	-0.0130	0.6371	-	-
38	-	0.0234	-	-	0.0235	-	0.0237
39	-0.0563	-	0.6763	-0.0138	-	-	-
40	-	-	0.0234	-	-	-	0.0238
41	-0.0561	-	0.6738	-0.0138	-	-	-
42	-	-	0.0593	-	-	-	0.0601
43	-0.0544	-	0.6539	-0.0134	-	-	-
44	-	-	0.0386	-	-	-	0.0388
45	-0.0541	-	0.6502	-0.0133	-	-	-
46	-	-	0.0234	-	-	-	0.0237
47	-0.0538	-	0.6467	-0.0132	-	-	-
48	-	-	0.0591	-	-	-	0.0598
49	-0.0527	-	0.6326	-0.0129	-	0.6344	-
50	-	-	0.0234	-	-	0.0234	0.0237
51	-	-	0.0234	-	-	0.0234	0.0237
52	-0.0515	-	0.6180	-0.0126	-	0.6197	-
53	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
54	-0.0505	-	0.6062	-0.0124	-	0.6078	-
55	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
56	-0.0496	-	0.5957	-0.0122	-	0.5973	-
57	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237

ตารางที่ ค.19 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 8

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.0144	-	-	-0.0113	-	-	-
2	0.6241	-	-	-0.0113	-	-	-
3	0.0230	-	-	-	-	-	0.0237
4	0.6219	-	-	-0.0113	-	-	-
5	0.0580	-	-	-	-	-	0.0597
6	0.6048	-	-	-0.0114	-	-	-
7	0.0378	-	-	-	-	-	0.0387
8	0.6017	-	-	-0.0114	-	-	-
9	0.0229	-	-	-	-	-	0.0237
10	0.5987	-	-	-0.0114	-	-	-
11	0.0578	-	-	-	-	-	0.0595
12	0.5866	-	-	-0.0114	-	-	-
13	0.0229	-	-	-	-	-	0.0237
14	0.0229	-	-	-	-	-	0.0237
15	0.5769	-	-	0.5793	-	-	-
16	0.0229	-	-	0.0230	-	-	0.0237
17	0.5665	-	-	0.5689	-	-	-
18	0.0228	-	-	0.0230	-	-	0.0236
19	0.5574	-	-	0.5597	-	-	-
20	0.0573	-	-	0.0575	-	-	0.0591
21	0.5432	-	-	0.5455	-	-	-
22	0.0228	-	-	0.0229	-	-	0.0236
23	0.0228	-	-	0.0229	-	-	0.0236
24	0.5271	-	-	0.5293	-	-	-
25	0.0569	-	-	0.0571	-	-	0.0587
26	0.5197	-	-	0.5219	-	-	-
27	0.0227	-	-	0.0228	-	-	0.0235
28	-0.0137	0.6400	-	-0.0113	-	-	-

ตารางที่ ค.19 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 8 (ต่อ)

Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
29	-	0.1269	-	-	-	-	0.1311
30	-0.0135	0.6320	-	-0.0111	-	-	-
31	-	0.0234	-	-	-	-	0.0237
32	-	0.0234	-	-	-	-	0.0237
33	-0.0133	0.6187	-	-0.0109	0.6198	-	-
34	-	0.0234	-	-	0.0234	-	0.0237
35	-0.0130	0.6080	-	-0.0107	0.6090	-	-
36	-	0.0234	-	-	0.0234	-	0.0237
37	-0.0128	0.5986	-	-0.0105	0.5996	-	-
38	-	0.0234	-	-	0.0234	-	0.0237
39	-0.0136	-	0.6340	-0.0112	-	-	-
40	-	-	0.0234	-	-	-	0.0237
41	-0.0136	-	0.6318	-0.0111	-	-	-
42	-	-	0.0590	-	-	-	0.0597
43	-0.0132	-	0.6142	-0.0108	-	-	-
44	-	-	0.0384	-	-	-	0.0386
45	-0.0131	-	0.6110	-0.0107	-	-	-
46	-	-	0.0233	-	-	-	0.0237
47	-0.0130	-	0.6078	-0.0107	-	-	-
48	-	-	0.0587	-	-	-	0.0595
49	-0.0128	-	0.5954	-0.0105	-	0.5971	-
50	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
51	-	-	0.0233	-	-	0.0234	0.0237
52	-0.0125	-	0.5824	-0.0102	-	0.5841	-
53	-	-	0.0233	-	-	0.0233	0.0236
54	-0.0123	-	0.5718	-0.0100	-	0.5735	-
55	-	-	0.0232	-	-	0.0233	0.0236
56	-0.0121	-	0.5625	-	-	0.5641	-
57	-	-	0.0232	-	-	0.0233	0.0236

ตารางที่ ค.20 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 9

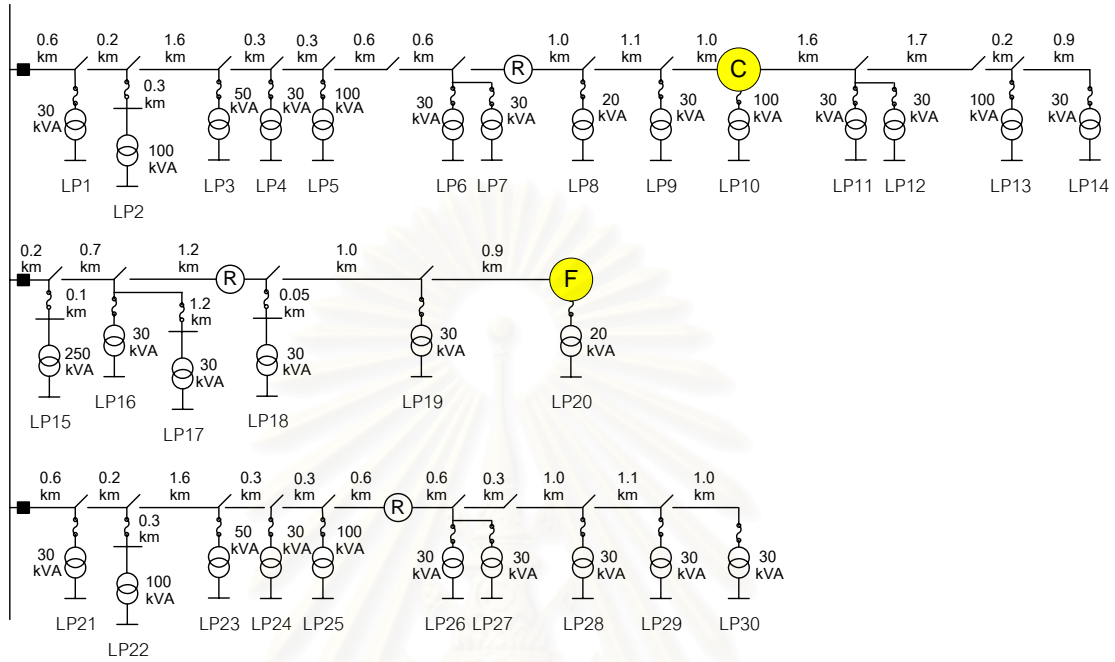
Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
1	-0.0170	-0.0138	-0.0153	-0.0141	-0.0127	-0.0133	-
2	0.6468	-0.0136	-0.0150	-0.0141	-0.0125	-0.0132	-
3	0.0229	-	-	-	-	-	0.0238
4	0.6444	-0.0135	-0.0149	-0.0141	-0.0125	-0.0132	-
5	0.0580	-	-	-	-	-	0.0599
6	0.6262	-0.0132	-0.0145	-0.0141	-0.0121	-0.0128	-
7	0.0377	-	-	-	-	-	0.0387
8	0.6229	-0.0131	-0.0144	-0.0141	-0.0121	-0.0127	-
9	0.0229	-	-	-	-	-	0.0237
10	0.6196	-0.0130	-0.0143	-0.0141	-0.0120	-0.0127	-
11	0.0578	-	-	-	-	-	0.0597
12	0.6067	-0.0127	-0.0140	-0.0141	-0.0118	-0.0124	-
13	0.0228	-	-	-	-	-	0.0237
14	0.0228	-	-	-	-	-	0.0237
15	0.5963	-0.0125	-0.0138	0.5987	-0.0116	-0.0122	-
16	0.0228	-	-	0.0229	-	-	0.0237
17	0.5852	-0.0123	-0.0135	0.5876	-0.0113	-0.0120	-
18	0.0228	-	-	0.0229	-	-	0.0237
19	0.5755	-0.0121	-0.0133	0.5778	-0.0111	-0.0118	-
20	0.0572	-	-	0.0575	-	-	0.0593
21	0.5605	-0.0118	-0.0130	0.5627	-0.0109	-0.0115	-
22	0.0227	-	-	0.0228	-	-	0.0236
23	0.0227	-	-	0.0228	-	-	0.0236
24	0.5435	-0.0114	-0.0126	0.5457	-0.0105	-0.0111	-
25	0.0568	-	-	-	-	-	0.0589
26	0.5358	-0.0113	-0.0124	0.5380	-0.0104	-0.0109	-
27	0.0227	-	-	-	-	-	0.0236
28	-0.0165	0.6543	-0.0151	-0.0141	-0.0127	-0.0133	-

ตารางที่ ค.20 กระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี 9 (ต่อ)

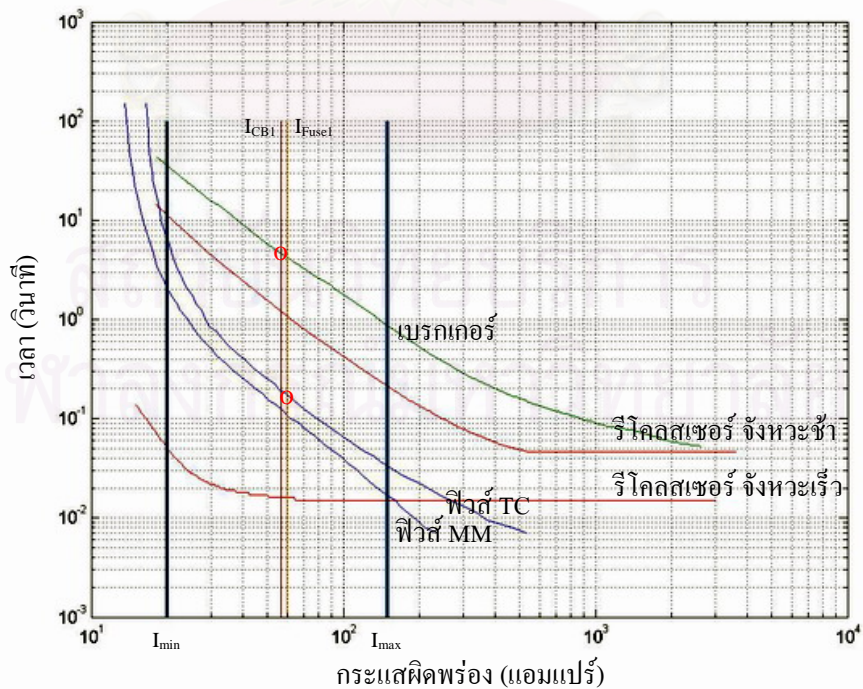
Fault Bus no	I CB_1 (kA)	I CB_2 (kA)	I CB_3 (kA)	I R_1 (kA)	I R_2 (kA)	I R_3 (kA)	I fuse (kA)
29	-	0.1258	-	-	-	-	0.1321
30	-0.0163	0.6459	-0.0149	-0.0138	-0.0127	-0.0131	-
31	-	0.0230	-	-	-	-	0.0238
32	-	0.0230	-	-	-	-	0.0237
33	-0.0159	0.6321	-0.0146	-0.0135	0.6331	-0.0129	-
34	-	0.0230	-	-	0.0231	-	0.0237
35	-0.0156	0.6209	-0.0143	-0.0133	0.6219	-0.0126	-
36	-	0.0230	-	-	0.0230	-	0.0237
37	-0.0154	0.6111	-0.0141	-0.0131	0.6121	-0.0124	-
38	-	0.0230	-	-	0.0230	-	0.0237
39	-0.0164	-0.0136	0.6481	-0.0139	-0.0125	-0.0134	-
40	-	-	0.0230	-	-	-	0.0238
41	-0.0163	-0.0135	0.6458	-0.0139	-0.0125	-0.0134	-
42	-	-	0.0582	-	-	-	0.0599
43	-0.0158	-0.0132	0.6274	-0.0135	-0.0121	-0.0134	-
44	-	-	0.0378	-	-	-	0.0387
45	-0.0158	-0.0131	0.6241	-0.0134	-0.0121	-0.0134	-
46	-	-	0.0229	-	-	-	0.0237
47	-0.0157	-0.0130	0.6208	-0.0133	-0.0120	-0.0134	-
48	-	-	0.0579	-	-	-	0.0597
49	-0.0153	-0.0127	0.6078	-0.0130	-0.0118	0.6096	-
50	-	-	0.0229	-	-	0.0230	0.0237
51	-	-	0.0229	-	-	0.0230	0.0237
52	-0.0150	-0.0125	0.5943	-0.0127	-0.0115	0.5960	-
53	-	-	0.0229	-	-	0.0229	0.0237
54	-0.0147	-0.0122	0.5833	-0.0125	-0.0113	0.5850	-
55	-	-	0.0229	-	-	0.0229	0.0237
56	-0.0145	-0.0120	0.5736	-0.0123	-0.0111	0.5753	-
57	-	-	0.0228	-	-	0.0229	0.0236

ค.3 ตัวอย่างลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

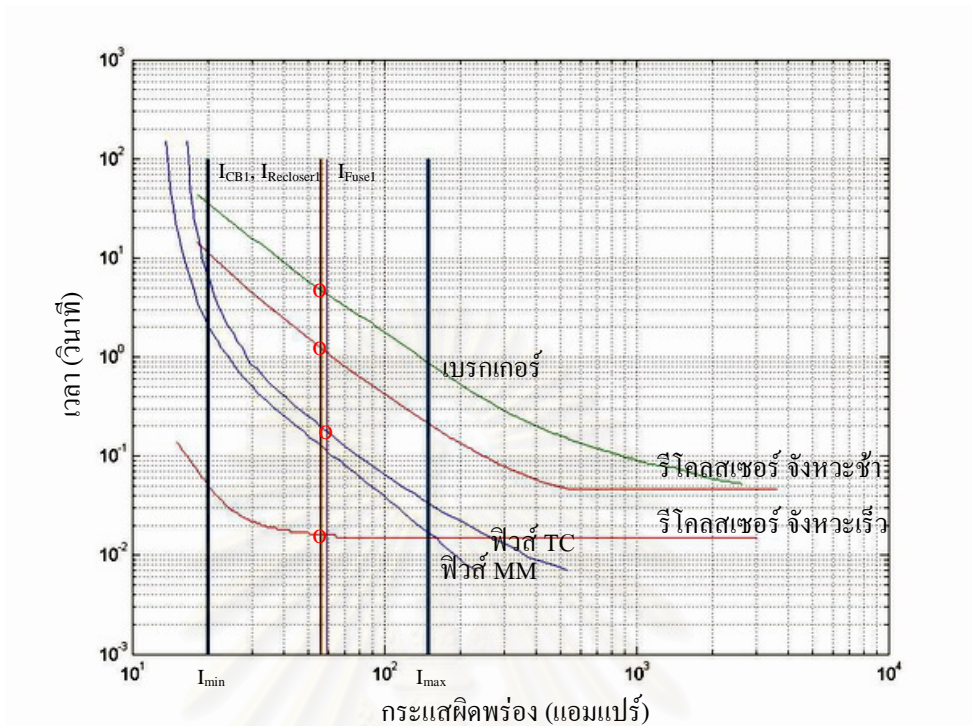
กรณีติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ตำแหน่ง C และ F (กรณีที่ 6)



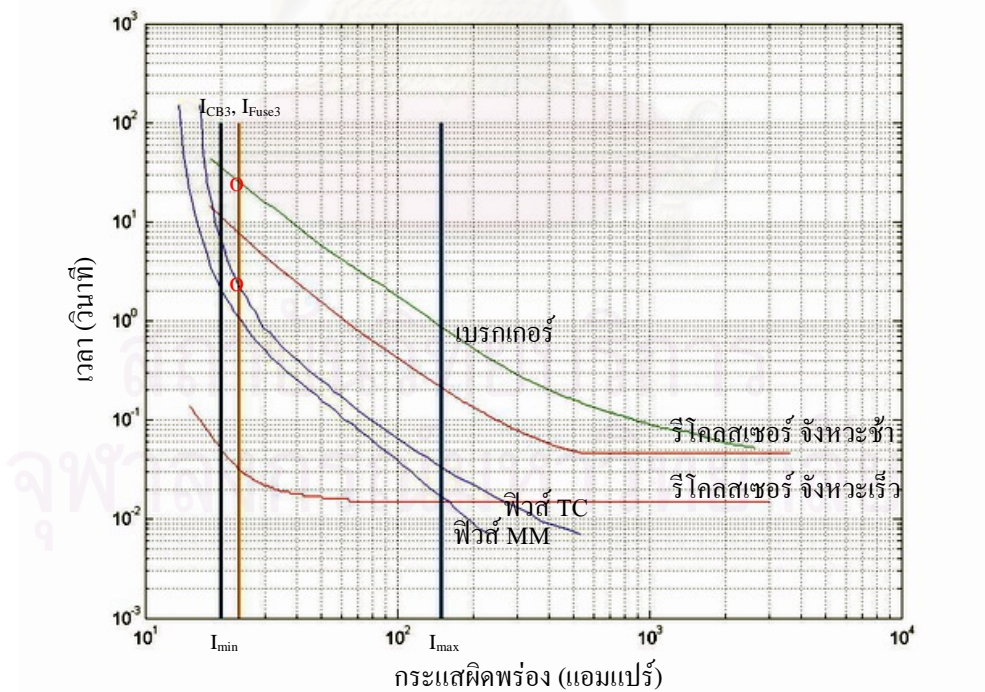
รูปที่ ค.1 ระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กรณีติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ตำแหน่ง C และ F (กรณีที่ 6)



รูปที่ ค.2 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่งโหลดที่ 5 (บัสที่ 11)



รูปที่ ค.3 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่งโหลดที่ 10 (บัสที่ 20)



รูปที่ ค.4 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่งโหลดที่ 21 (บัสที่ 40)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสิริภา จุลกาญจน์ เกิดเมื่อวันที่ 18 สิงหาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดเลย สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2547 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย