

การปรับปรุงระบบป้องกันและคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบไมโครกริดบ้านขุนแม่ในจังหวัดเชียงใหม่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF PROTECTION SYSTEM AND POWER QUALITY FOR BAN KHUN PAE
MICROGRID SYSTEM IN CHIANGMAI PROVINCE



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

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงระบบป้องกันและคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบ ไมโครกริดบ้านชุมชนแปะในจังหวัดเชียงใหม่
โดย	นายวันนพ คณานุสรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.วิโรจน์ บัวคลี่)

6070492221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Microgrid, Protection system, BESS, Virtual synchronous generator

Wannop Kananusorn : IMPROVEMENT OF PROTECTION SYSTEM AND POWER QUALITY FOR BAN KHUN PAE MICROGRID SYSTEM IN CHIANGMAI PROVINCE. Advisor: Assoc. Prof. SURAPONG SUWANKAWIN, D.Eng. Co-advisor: Asst. Prof. CHANNARONG BANMONKOL, D.Eng.

This thesis introduces improvement guidelines for the Ban-Khun-Pae microgrid in Chiang Mai Province. Two major issues are paid attention to: 1) Improvement of protection scheme inside the microgrid and 2) Strengthening the power quality. Regarding the improvement of protection scheme, both operating modes of microgrid are investigated. Reclosers are employed as the protection equipment, the zoning arrangement of load and the appropriate installation of reclosers. Additionally, the setting of protection scheme is proposed coordination among reclosers in each zone. Fault current is analyzed by DigSILENT Powerfactory and results give the group-setting parameters of reclosers which fit in with the operating modes of microgrid. The strengthening of power quality is studies for the islanding mode, where the fluctuations of load, photovoltaic distributed generation and hydro distributed generation are paid attention. This thesis applies the control technique of inverter for Battery Energy Storage System (BESS) to behave like a synchronous generator embedded with the control functions of power-frequency droop and Automatic Voltage Regulator (AVR) to alleviate the effects of aforementioned fluctuations on power quality; voltage and frequency, of microgrid. Simulation results show that BESS alleviate the effects of fluctuations and the power quality can be complied with the utility standard.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณภวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บัญมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ และ ดร.วิโรจน์ บัวคลี ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไข และเอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ได้อนุเคราะห์เงินทุนสนับสนุนการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนเพื่อนนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา ณ ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ภรรยา และครอบครัว ขอบคุณกองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ กองวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้ความรู้และให้การสนับสนุนแก่ผู้ทำวิจัยในทุกด้านมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

วันนพ คณานุสรณ์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.1.1 ระบบป้องกันของไมโครกริด	2
1.1.2 คุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดในกรณีทำงานแบบแยกโดด	3
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.3.1 ระบบป้องกันสำหรับไมโครกริด	4
1.3.2 การควบคุมคุณภาพไฟฟ้าเมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด	6
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ	7
บทที่ 2 ระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ	9
2.1 ข้อมูลระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ	9
2.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ.....	11
2.2.1 ชุดควบคุมไมโครกริด	11

2.2.2 ชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกล.....	12
2.2.3 ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	15
2.3 การทำงานของระบบไมโครกริดบ้านชุมชนแปะ	18
2.3.1 การทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	18
2.3.2 การทำงานแบบแยกโดด	19
2.4 ระบบป้องกันทางไฟฟ้าในปัจจุบัน	20
2.4.1 การทำงานของระบบป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก..	20
2.4.2 การทำงานของระบบป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด	21
2.5 ผลกระทบจากระบบป้องกันทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อระบบไมโครกริด.....	22
2.5.1 ข้อมูลสถิติไฟดับที่ไมโครกริดบ้านชุมชนแปะ	23
2.5.2 ข้อกำหนดของระบบป้องกันในปัจจุบัน	24
บทที่ 3 การปรับปรุงระบบป้องกันของระบบไมโครกริดบ้านชุมชนแปะ	26
3.1 การพิจารณาเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกัน	26
3.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันสำหรับไมโครกริดบ้านชุมชนแปะ	26
3.1.1.1 ปัจจัยการเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันจากการทำงานของระบบไมโครกริด.....	26
3.1.1.2 ปัจจัยการเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันของระบบไมโครกริดบ้านชุมชนแปะ	28
3.1.2 ชนิดอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมกับระบบไมโครกริดบ้านชุมชนแปะ	28
3.2 การแบ่งเขตป้องกัน (Zone of Protection).....	31
3.2.1 หลักการเบื้องต้นของการแบ่งเขตป้องกัน.....	31
3.2.2 การพิจารณาแบ่งเขตป้องกันและตำแหน่งติดตั้งรีโกลสเซอร์สำหรับระบบไมโครกริด บ้านชุมชนแปะ	32
3.2.2.1 การพิจารณากำหนดเขตป้องกันสำหรับไมโครกริดเมื่อทำงานแบบเชื่อมต่อกับ ระบบไฟฟ้าหลัก.....	32
3.2.2.2 การพิจารณากำหนดเขตป้องกันสำหรับไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดด ..	40

บทที่ 4 การปรับตั้งค่าระบบป้องกันทางไฟฟ้า	46
4.1 การวิเคราะห์หากระแสลัดวงจร.....	46
4.1.1 แบบจำลอง และข้อมูลรายละเอียดของอุปกรณ์ภายในระบบไมโครกริด	46
4.1.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์หากระแสลัดวงจร	48
4.2 การปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์	51
4.2.1 ขั้นตอนการปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์.....	51
4.2.2 การปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	53
4.2.2.1 การปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสเมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก.....	53
4.2.2.2 การปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	62
4.2.3 การปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด	69
4.2.3.1 การปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด	69
4.2.3.2 การปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด.....	75
4.3 ผลสรุปการปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์.....	80
บทที่ 5 การควบคุมระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สำหรับการทำงานแบบแยกโดด	83
5.1 คุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่และแรงดันไฟฟ้า	83
5.1.1 แรงดันไฟฟ้า.....	83
5.1.2 ความถี่ไฟฟ้า.....	83
5.2 ข้อมูลองค์ประกอบของระบบไมโครกริดที่ส่งผลต่อคุณภาพไฟฟ้า.....	84
5.2.1 การใช้กำลังไฟฟ้าของโหลด.....	84
5.2.2 กำลังการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำ.....	84
5.2.3 กำลังผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	86

5.2.4 การควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อช่วยควบคุมคุณภาพไฟฟ้า.....	88
5.2.4.1 การจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	90
5.2.4.2 การควบคุมความถี่ไฟฟ้า.....	91
5.2.4.3 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า.....	92
5.3 ผลการจำลองการทำงานของระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดด	92
5.3.1 ผลการจำลองระบบ ในกรณีโรงไฟฟ้าพลังน้ำไม่จ่ายกำลังผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ (กรณีศึกษาที่ 1).....	94
5.3.2 ผลการจำลองระบบ ในกรณีโรงไฟฟ้าพลังน้ำจ่ายกำลังผลิตไฟฟ้า 25 กิโลวัตต์เข้าสู่ระบบ (กรณีศึกษาที่ 2).....	100
5.3.3 ผลการจำลองระบบ ในกรณีโรงไฟฟ้าพลังน้ำจ่ายกำลังผลิตไฟฟ้า 55 กิโลวัตต์เข้าสู่ระบบ (กรณีศึกษาที่ 3).....	105
5.4 สรุปผลการจำลองระบบ.....	110
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	112
6.1 บทสรุปงานวิจัย	112
6.2 ข้อเสนอแนะ	113
บรรณานุกรม.....	114
ภาคผนวก ก การประสานการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Protection coordination).....	116
ภาคผนวก ข รีโคสเซอร์และหลักการทำงานเบื้องต้น.....	118
ภาคผนวก ค คุณลักษณะการทำงานของรีโคสเซอร์	120
ภาคผนวก ง การควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้มีคุณสมบัติเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	123
ประวัติผู้เขียน.....	128



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 – S3 แบบ SF6.....	14
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดสวิตช์สำหรับตัดโหลด S4 แบบฉนวนแข็ง	15
ตารางที่ 2.3 รายละเอียดอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	17
ตารางที่ 2.4 รายละเอียดอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่.....	18
ตารางที่ 2.5 ข้อมูลไฟดับที่ไมโครกริดบ้านขุนแปะ.....	24
ตารางที่ 3.1 สรุปการทำงานของรีโกลสเซอร์ที่ใช้สำหรับเขตป้องกันแบบปฐมภูมิ และการป้องกัน สำรองของไมโครกริดบ้านขุนแปะ เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	40
ตารางที่ 3.2 สรุปการทำงานของรีโกลสเซอร์ที่ใช้สำหรับเขตป้องกันแบบปฐมภูมิ และการป้องกัน สำรองของไมโครกริดบ้านขุนแปะ เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด.....	45
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้า.....	47
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ.....	47
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลสายส่ง	48
ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาสายส่งในระบบจำหน่าย	48
ตารางที่ 4.5 ค่ากระแสลัดวงจรด้านเฟสที่ไหลผ่านรีโกลสเซอร์ กรณีไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับ ระบบไฟฟ้าหลัก	49
ตารางที่ 4.6 ค่ากระแสลัดวงจรด้านกราวด์ที่ไหลผ่านรีโกลสเซอร์ กรณีไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับ ระบบไฟฟ้าหลัก	50
ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสลัดวงจรด้านเฟสที่ไหลผ่านรีโกลสเซอร์ กรณีไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด	50
ตารางที่ 4.8 ค่ากระแสลัดวงจรด้านกราวด์ที่ไหลผ่านรีโกลสเซอร์ กรณีไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด	51
ตารางที่ 4.9 ค่ากระแสไหลรวมที่ผ่านรีโกลสเซอร์แต่ละตัว และกระแสเริ่มทำงานของรีโกลสเซอร์ที่ ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	56

ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	57
ตารางที่ 4.11 ค่ากระแสเริ่มทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ทั้งหมด เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	63
ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	64
ตารางที่ 4.13 ค่ากระแสไหลรวมที่ผ่านรีโคลสเซอร์แต่ละตัว และกระแสเริ่มทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด	71
ตารางที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด.....	72
ตารางที่ 4.15 ค่ากระแสเริ่มทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ทั้งหมด เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด	76
ตารางที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด.....	76
ตารางที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์สำหรับปรับตั้งค่ารีโคลสเซอร์ ในกรณีไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	80
ตารางที่ 4.18 ค่าพารามิเตอร์ของรีโคลสเซอร์ ในกรณีไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด.....	81
ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	85
ตารางที่ 5.2 รายละเอียดเซลล์แบตเตอรี่.....	90
ตารางที่ 5.3 รายละเอียดการทำงานของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในแต่ละกรณีศึกษา	93
ตารางที่ 5.4 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT Powerfactory.....	93
ตารางที่ 5.5 ค่าเบี่ยงเบนความถี่ และค่าเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีศึกษา .	110

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 กระแสลัดวงจรที่ไหลเข้าสู่จุดที่เกิดความผิดปกติ เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	2
รูปที่ 1.2 กระแสลัดวงจรที่ไหลเข้าสู่จุดที่เกิดความผิดปกติ เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด.....	3
รูปที่ 1.3 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบไมโครกริดในงานวิจัย [7]	5
รูปที่ 2.1 แผนที่ GIS ของระบบจำหน่ายภายในบ้านขุนแปะ และการแบ่งกลุ่มโหลดตามโซนพื้นที่	10
รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ ณ ปัจจุบัน	10
รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมเส้นเดียวของการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภายในไมโครกริด.....	11
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ของชุดควบคุมไมโครกริด.....	12
รูปที่ 2.5 ชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกลของไมโครกริดบ้านขุนแปะ.....	13
รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	16
รูปที่ 2.7 ระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	19
รูปที่ 2.8 ระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดด.....	19
รูปที่ 2.9 กระแสลัดวงจรเมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	20
รูปที่ 2.10 การทำงานของระบบป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	21
รูปที่ 2.11 กระแสลัดวงจรเมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบแยกโดด	22
รูปที่ 2.12 การทำงานของระบบป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบแยกโดด.....	22
รูปที่ 2.13 พื้นที่ภายนอกและภายในระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ.....	23
รูปที่ 3.1 ทิศทางการไหลของกระแสลัดวงจรในสายส่งช่วง A – B เมื่อเกิดความผิดปกติที่โซน 3.2	27
รูปที่ 3.2 ทิศทางการไหลของกระแสลัดวงจรในสายส่งช่วง A – B เมื่อเกิดความผิดปกติที่โซน 3.1	27
รูปที่ 3.3 ถนนภายในบ้านขุนแปะ	28

รูปที่ 3.4 การเลือกค่าการทำงานรีโกลสเซอร์เมื่อทิศทางไหลของกระแสตัวจรต่างกัน.....	30
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างชุดควบคุมรีโกลสเซอร์.....	30
รูปที่ 3.6 หลักการแบ่งเขตป้องกันของระบบไฟฟ้า	32
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งและทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ตามขั้นตอนที่ 1 ในกรณีไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก.....	34
รูปที่ 3.8 ผลกระทบจากการทำงานของรีโกลสเซอร์ตามขั้นตอนที่ 1 เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในพื้นที่โซน 1 ในกรณีไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	34
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งติดตั้ง และทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ทั้งหมดจากการกำหนดเขตป้องกันปฐมภูมิ ในกรณีไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก.....	35
รูปที่ 3.10 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 3.2 เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	36
รูปที่ 3.11 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 2 เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	37
รูปที่ 3.12 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone DER เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	37
รูปที่ 3.13 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 3.1 เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	38
รูปที่ 3.14 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 1 เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก	38
รูปที่ 3.15 ตำแหน่งติดตั้งพร้อมทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ และเขตป้องกันเมื่อไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก.....	39
รูปที่ 3.16 ตำแหน่งติดตั้ง และทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ทั้งหมดจากการกำหนดเขตป้องกันปฐมภูมิ ในกรณีไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด	41
รูปที่ 3.17 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 3.2 เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด.....	42
รูปที่ 3.18 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 2 เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด.....	43

รูปที่ 3.19 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 3.1 เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด.....	43
รูปที่ 3.20 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 1 เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด.....	44
รูปที่ 3.21 ตำแหน่งติดตั้งพร้อมทิศทางการทำงานรีโคลสเซอร์ และเขตป้องกันเมื่อไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด	45
รูปที่ 4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าไม่โครกริตบ้านขุนแปะ	46
รูปที่ 4.2 กระบวนการตั้งค่าเวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส เมื่อไม่โครกริตทำงานในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก.....	55
รูปที่ 4.3 เวลาทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อระบบไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก.....	56
รูปที่ 4.4 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก.....	61
รูปที่ 4.5 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ทั้งหมด เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก.....	68
รูปที่ 4.6 กระบวนการตั้งค่าเวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส เมื่อไม่โครกริตทำงานในรูปแบบแยกโดด.....	70
รูปที่ 4.7 เวลาทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อระบบไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด	71
รูปที่ 4.8 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด	74
รูปที่ 4.9 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ทั้งหมด เมื่อไม่โครกริตทำงานแบบแยกโดด	79
รูปที่ 5.1 ค่าประมาณโหลดรวมรายนาทีย ของระบบไม่โครกริตบ้านขุนแปะ	84
รูปที่ 5.2 ฝ่ายกักเก็บน้ำ.....	85
รูปที่ 5.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสภายในโรงไฟฟ้าพลังน้ำ.....	86
รูปที่ 5.4 กำลังไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำผลิตได้ในแต่ละเดือน	86

รูปที่ 5.5 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของไมโครกริดบ้านขุนแปะ	87
รูปที่ 5.6 ค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในการศึกษา	87
รูปที่ 5.7 แผนภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะสมบัติเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	89
รูปที่ 5.8 แบบจำลองระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่	89
รูปที่ 5.9 โครงสร้างส่วนประกอบของแบตเตอรี่.....	91
รูปที่ 5.10 กราฟคุณลักษณะดรูปของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า.....	91
รูปที่ 5.11 แบบจำลองระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดดสำหรับใช้ในกรณีศึกษา	94
รูปที่ 5.12 ผลการจำลองระบบของกรณีศึกษาที่ 1	97
รูปที่ 5.13 แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และจุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 – S4 ของกรณีศึกษาที่ 1	98
รูปที่ 5.14 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อช่วยชดเชยความผันผวนของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของกรณีศึกษาที่ 1.....	99
รูปที่ 5.15 จุดทำงานที่เกิดความเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดในกราฟคุณลักษณะดรูปของกรณีศึกษาที่ 1	99
รูปที่ 5.16 ผลการจำลองระบบของกรณีศึกษาที่ 2	102
รูปที่ 5.17 แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และจุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 – S4 ของกรณีศึกษาที่ 2	103
รูปที่ 5.18 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อช่วยชดเชยความผันผวนของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของกรณีศึกษาที่ 2.....	104
รูปที่ 5.19 จุดทำงานที่เกิดความเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดในกราฟคุณลักษณะดรูปของกรณีศึกษาที่ 2	104
รูปที่ 5.20 ผลการจำลองระบบของกรณีศึกษาที่ 3	107
รูปที่ 5.21 แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และจุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 – S4 ของกรณีศึกษาที่ 2	108
รูปที่ 5.22 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อช่วยชดเชยความผันผวนของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของกรณีศึกษาที่ 3.....	109

รูปที่ 5.23 จุดทำงานที่เกิดความเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดในกราฟคุณลักษณะद्रรูปของกรณีศึกษาที่ 3

..... 110



บทที่ 1

บทนำ

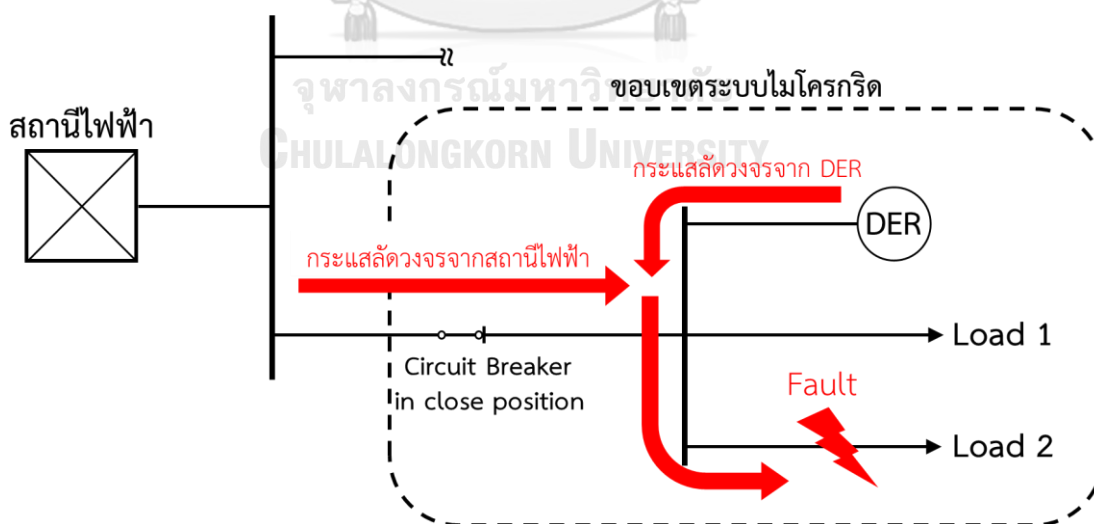
ตามนโยบายของรัฐบาลที่พยายามพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าและสายจำหน่ายไฟฟ้าให้กับชุมชนที่อยู่ห่างไกลให้มากขึ้น การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) จึงได้จัดทำแผนพัฒนาระบบไฟฟ้าที่มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาระบบไฟฟ้าให้มีความมั่นคง เพียงพอและทั่วถึง และพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคให้เป็นโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ หรือ PEA Smart Grid เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟ ความเชื่อถือได้ และคุณภาพของระบบไฟฟ้า รวมทั้งพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าให้มีความพร้อมในการรองรับการใช้พลังงานทดแทนในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Energy Resources, DER) ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ซึ่งจะนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่ปัจจุบันใช้ในการผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่ของประเทศไทย และกำลังจะหมดไป ในขณะที่ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่งผลให้เกิดสภาวะโลกร้อนอีกด้วย จากแผนพัฒนาดังกล่าวโครงการไมโครกริดบ้านขุนแปะ จังหวัดเชียงใหม่จึงเกิดขึ้นเพื่อยกระดับคุณภาพไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

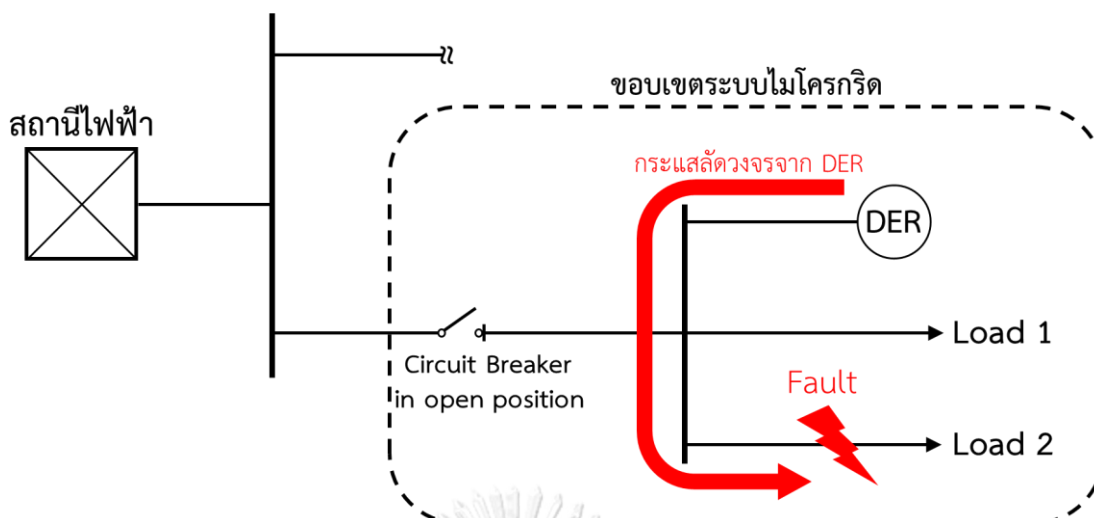
โครงการไมโครกริดบ้านขุนแปะ [1] อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่เป็นโครงการนำร่องการพัฒนาระบบไมโครกริดเพื่อความมั่นคงด้านพลังงานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งระบบไมโครกริดเป็นระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กที่ประกอบไปด้วยแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้า ระบบควบคุม ระบบกักเก็บพลังงาน และโหลด ระบบไมโครกริดสามารถทำงานได้ 2 รูปแบบ คือ แบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก (Grid-connected Mode) และ แบบแยกโดด (Islanding Mode) ซึ่งจะแยกตัวเป็นอิสระจากระบบไฟฟ้าหลัก โดยในการทำงานแบบแยกโดดแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย และ/หรือจากระบบกักเก็บพลังงานจากแบตเตอรี่ (Battery Energy Storages System, BESS) จะจ่ายไฟฟ้าให้แก่โหลดภายในระบบเอง จากการที่ระบบไมโครกริดสามารถทำงานได้ 2 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบการทำงานมีลักษณะสมบัติของระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกันทำให้การพิจารณาระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะมีสิ่งที่เป็นปัญหาส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า คือ 1) ระบบป้องกันของไมโครกริด และ 2) คุณภาพไฟฟ้าในด้านแรงดันและความถี่ไฟฟ้าของไมโครกริดในกรณีทำงานแบบแยกโดด โดยแต่ละปัญหามีรายละเอียด ดังนี้

1.1.1 ระบบป้องกันของไมโครกริด

ระบบป้องกันของไมโครกริดเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญ เนื่องจากระบบไมโครกริดสามารถทำงานได้ 2 รูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไมโครกริดค่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าแตกต่างกัน โดยเมื่อระบบไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักกระแสลัดวงจรจะมาจากสถานีไฟฟ้า และจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวไหลเข้าสู่จุดที่เกิดความผิดปกติ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แต่ในขณะที่ระบบไมโครกริดทำงานแบบแยกโดดกระแสลัดวงจรจะมาจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเท่านั้นที่ไหลเข้าสู่จุดที่เกิดความผิดปกติ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรจะน้อยกว่าค่ากระแสลัดวงจรจากการทำงานในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักจึงส่งผลให้การตั้งค่าระบบป้องกันแบบดั้งเดิมอาจทำให้ระบบป้องกันทำงานผิดพลาดได้ ระบบป้องกันสำหรับไมโครกริดจะต้องมีการปรับตั้งค่าโดยเฉพาะให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องในทั้งสองรูปแบบการทำงานของไมโครกริด โดยจากการพิจารณาของระบบป้องกันเดิมของระบบไมโครกริดบ้านชุมชนพบว่ายังไม่มีระบบป้องกันเฉพาะสำหรับระบบไมโครกริดและขาดระบบป้องกันภายในทำให้เมื่อเกิดความผิดปกติในไมโครกริดในพื้นที่ใดก็ตามจะส่งผลให้ไฟฟ้าดับทั้งระบบ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาปรับปรุงระบบป้องกันให้เหมาะสมกับระบบไมโครกริด และเพิ่มระบบป้องกันภายในซึ่งจะแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) การกำหนดเขตป้องกัน และเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันพร้อมตำแหน่งติดตั้ง และ 2) การหาค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน



รูปที่ 1.1 กระแสลัดวงจรที่ไหลเข้าสู่จุดที่เกิดความผิดปกติ เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก



รูปที่ 1.2 กระแสลัดวงจรที่ไหลเข้าสู่จุดที่เกิดความผิดปกติ เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

1.1.2 คุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดในกรณีทำงานแบบแยกโดด

เมื่อระบบไมโครกริดทำงานแบบแยกโดดจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่และแรงดันไฟฟ้า โดยคุณภาพไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของโหลด และกำลังผลิตไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวภายในระบบซึ่งไมโครกริด ซึ่งในไมโครกริดบ้านชุมชนประกอบไปด้วย 1) ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ 2) โรงไฟฟ้าพลังน้ำ และ 3) ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยจากการศึกษาผลกระทบจากความผันผวนของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อระบบไฟฟ้าอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน [2] พบว่า เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด การเปลี่ยนแปลงของโหลดและความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ส่งผลให้คุณภาพไฟฟ้าไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งปัญหาคุณภาพไฟฟ้าดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นกับระบบไมโครกริดบ้านชุมชน เนื่องจากมีรูปแบบแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่คล้ายกัน และระบบไมโครกริดทั้ง 2 แห่งอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งความไม่สม่ำเสมอของแสงแดดมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาวิธีการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดดให้อยู่ในมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [3] โดยการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่

1.2 วัตถุประสงค์

1) นำเสนอการปรับปรุงระบบป้องกันของระบบไมโครกริดให้สามารถทำงานแบบปรับตัวได้ตามรูปแบบการทำงานของไมโครกริด

2) ศึกษาการทำงานของระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดด ในกรณีมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด การเปลี่ยนแปลงของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำตามฤดูกาล และความผันผวน

จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้การควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อควบคุมความถี่ และแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.1 ระบบป้องกันสำหรับไมโครกริด

งานวิจัย [4] นำรูปแบบวิธีการป้องกันที่สามารถใช้ได้กับไมโครกริด โดยชี้ให้เห็นถึงข้อเสียของการใช้วิธีการป้องกันแบบดั้งเดิม เช่น รีเลย์กระแสเกิน รีเลย์แรงดัน เป็นต้น อันเนื่องมาจากไมโครกริดมีคุณลักษณะสมบัติที่แตกต่างจากระบบไฟฟ้าแบบเดิมเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น เช่น ทิศทางไหลของกระแสลัดวงจร ขนาดของกระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบการทำงานของไมโครกริด เป็นต้น และนำเสนอรูปแบบการป้องกันแบบใหม่ที่เหมาะสมกับระบบไมโครกริด เช่น อุปกรณ์ป้องกันแบบปรับค่าได้ การชดเชยกระแสลัดวงจรด้วยระบบกักเก็บพลังงาน เป็นต้น

งานวิจัย [5] นำเสนอแนวทางการตั้งค่าระบบป้องกันของไมโครกริด โดยใช้อุปกรณ์ป้องกันที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของการป้องกัน และทิศทางการตรวจจับกระแสลัดวงจรให้เหมาะสมกับรูปแบบการทำงานของไมโครกริด เนื่องจากในแต่ละรูปแบบการทำงานของไมโครกริดจะมีแหล่งจ่ายที่ต่างกัน ทำให้ขนาดและทิศทางการไหลของกระแสลัดวงจรของแต่ละรูปแบบการทำงานมีความแตกต่างกัน

งานวิจัย [6] นำเสนอรูปแบบการป้องกันทางไฟฟ้าสำหรับไมโครกริดที่สามารถปรับเปลี่ยนการตรวจจับค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นตามรูปแบบการทำงานของไมโครกริด เพื่อส่งให้อุปกรณ์ป้องกันตัดออกจากระบบ ในรูปแบบการป้องกันนี้จะแบ่งเขตป้องกันเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มโหลด และกลุ่มแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระจายตัวภายในไมโครกริด โดยในแต่ละกลุ่มมีการจับค่าพารามิเตอร์เมื่อเกิดความผิดปกติ ดังนี้

1) กลุ่มโหลด

- ตรวจจับกระแสเกิน ในกรณีไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก
- ตรวจจับแรงดันตกพร้อมกับข้อมูลกระแสที่ไหลผ่านเพื่อระบุพื้นที่ๆ เกิดความผิดปกติ

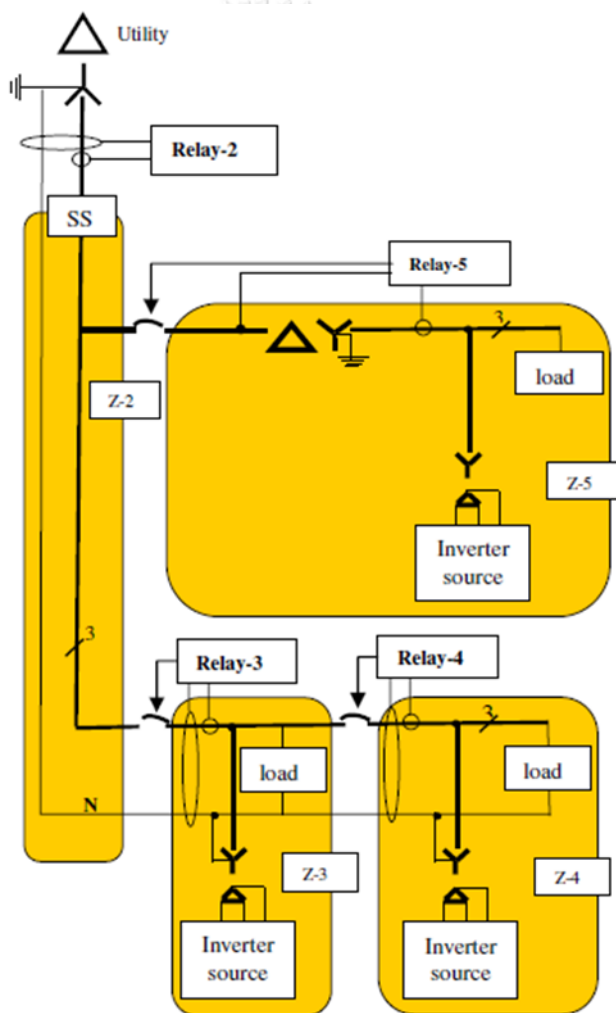
ในกรณีไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

2) กลุ่มแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระจายตัว

- ตรวจจับแรงดัน, ความถี่ และกระแสเกิน ในกรณีไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

- ตรวจจับแรงดัน, ความถี่ และกระแสเกินแบบมีทิศทาง ในกรณีไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

งานวิจัย [7] นำเสนอการเทคนิคการป้องกันโดยระบบไมโครกริด จะแบ่งเป็นเขตป้องกันตามกลุ่มโหลดซึ่งมีแหล่งจ่ายแบบกระจายตัวอยู่ด้วย (Z-2, Z-3, Z-4, Z-5) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 และกำหนดให้เขตป้องกันที่อยู่ไกลจากแหล่งจ่ายทำงานเร็วที่สุด โดยที่แต่ละเขตป้องกันจะมีรีเลย์กระแสเกิน และรีเลย์แรงดันทำงานร่วม เมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงขึ้นในไมโครกริดสแตติกสวิตช์ (Static Switch; SS) ที่เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระบบไมโครกริดกับระบบไฟฟ้าหลัก จะทำการเปิดวงจรทันทีเพื่อให้ไมโครกริดทำงานในรูปแบบแยกโดด รีเลย์ในแต่ละเขตป้องกันจะตรวจสอบความผิดปกติและทำการตัดกลุ่มโหลดที่เกิดความผิดปกติออกไปจากระบบ เมื่อความผิดปกติถูกกำจัดไปแล้ว สแตติกสวิตช์จะปิดวงจรเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักอีกครั้ง



รูปที่ 1.3 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบไมโครกริดในงานวิจัย [7]

1.3.2 การควบคุมคุณภาพไฟฟ้าเมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

จากรายงานการศึกษา [1] นำเสนอการจัดทำระบบไมโครกริดในพื้นที่บ้านขุนแปะ โดยการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้แก่โหลดร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำที่มีติดตั้งอยู่เดิม ซึ่งยังขาดการศึกษาการทำงานของระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดด เพื่อพิจารณาคุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่ และแรงดันไฟฟ้าในกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลง และมีความผันผวนจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

งานวิจัย [8] ได้นำเสนอวิธีการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่และการปรับตั้งระบบป้องกันสำหรับเอซีไมโครกริดของจังหวัดแม่ฮ่องสอน ในส่วนการควบคุมอินเวอร์เตอร์จะให้ทำงานเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ที่มีส่วนการควบคุมแบบดรู๊ป และส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติสำหรับควบคุมความถี่ และแรงดันไฟฟ้าของระบบไมโครกริด

งานวิจัย [2] ได้นำเสนอแนวทางการควบคุมระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก เพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด และความผันผวนจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อระบบไฟฟ้าของไมโครกริดในพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ให้สามารถรักษาคุณภาพความถี่ และแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยการศึกษาผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหลดที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดที่ทำงานแบบแยกโดดพบว่า ระบบไม่สามารถตอบสนองต่อความผันผวนที่เกิดขึ้นได้ทำให้ไม่สามารถควบคุมแรงดัน และความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้

งานวิจัย [9] นำเสนอวิธีการรีซิงโครไนซ์ของระบบไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ด้วยระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่โดยหลักการรูปความถี่กำลังจริงซึ่งทำงานเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในการปรับความถี่ และแรงดันไฟฟ้าให้สอดคล้องกับระบบไฟฟ้าหลัก

งานวิจัย [10] นำเสนอการทำงานของไมโครกริดในการทำงานแบบแยกโดดของอำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ที่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความผันผวนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีผลต่อการควบคุมความถี่และแรงดันไฟฟ้าของไมโครกริด โดยนำเสนอวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่โดยใช้การควบคุมเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อช่วยควบคุมคุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่และแรงดันของระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดดให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

งานวิจัย [11] – [12] นำเสนอโครงสร้างต่าง ๆ สำหรับการควบคุมการทำงาน เพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของไมโครกริดเมื่อทำงานในรูปแบบแยกโดดและเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

- 1) ระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะเป็นระบบไฟฟ้าที่ใช้พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้
- 2) การปรับปรุงระบบป้องกันจะพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันและตำแหน่งติดตั้งที่ทำให้ระบบป้องกันมีความสามารถในการป้องกันที่ดีที่สุด
- 3) เมื่อระบบไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด (Islanding mode) แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวภายในระบบไมโครกริดสามารถทำงานได้ทั้งหมด
- 4) ระบบไมโครกริดที่พิจารณามีชุดควบคุมไมโครกริด และระบบสื่อสารเพื่อควบคุมการทำงานของระบบป้องกันให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง
- 5) การศึกษาการทำงานของระบบไมโครกริด เพื่อพิจารณาคุณภาพไฟฟ้า เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดดเท่านั้น
- 6) เกณฑ์คุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่ และแรงดันไฟฟ้า พิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนไม่เกินมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) แนวทางการปรับปรุงระบบป้องกันให้สามารถแยกเฉพาะส่วนที่เกิดความผิดปกติ และสามารถทำงานแบบปรับตัวได้ตามรูปแบบการทำงานของไมโครกริด เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบไมโครกริด
- 2) แนวทางการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน และกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อนำค่าปรับตั้งค่าให้กับอุปกรณ์ป้องกันให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามรูปแบบการทำงานของไมโครกริด
- 3) แนวทางการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่มีคุณลักษณะเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อให้ระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดดมีคุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่ และแรงดันไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

- 1) ศึกษาบทความทางวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษา และรวบรวมข้อมูลของระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ

3) นำเสนอแนวทางการกำหนดเขตการป้องกันภายในระบบไมโครกริด และเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมกับระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ พร้อมทั้งตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม

4) วิเคราะห์หาค่ากระแสลัดวงจรจากแบบจำลองระบบไฟฟ้าของระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ โดยใช้โปรแกรม DigSILENT Powerfactory

5) นำเสนอกระบวนการปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามรูปแบบการทำงานของระบบไมโครกริด

6) ศึกษาวิธีการควบคุมการทำงานอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่

7) พิจารณาคุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่ และแรงดันไฟฟ้าของระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดดที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความผันผวนจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้โปรแกรม DigSILENT Powerfactory

8) วิเคราะห์ผลทดสอบ และสรุปผล

บทที่ 2

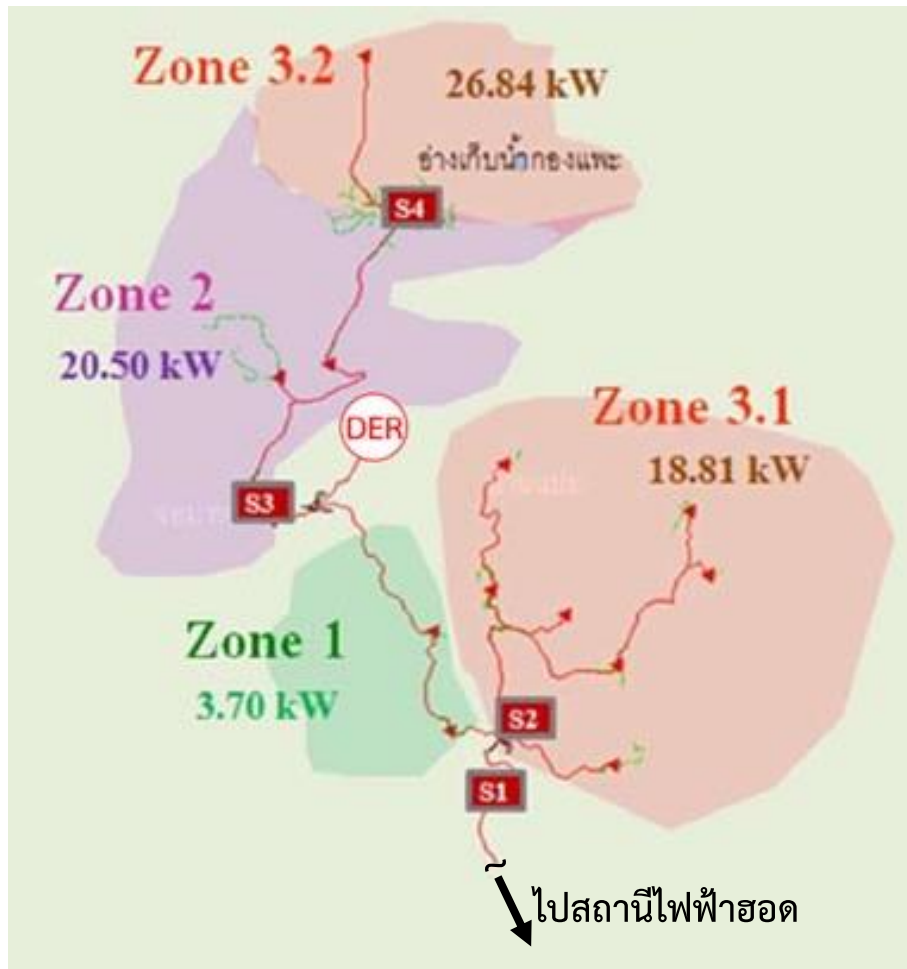
ระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ

โครงการไมโครกริดบ้านขุนแปะ [1] ตั้งอยู่หมู่ที่ 2 ตำบลบ้านแปะ อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ มีลักษณะภูมิประเทศอยู่บนภูเขาสูง บ้านขุนแปะมีผู้ใช้ไฟประมาณ 483 คริวเรือน ประชาชนในพื้นที่ส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม โดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ร่วมกันวิจัยและพัฒนาระบบไฟฟ้าของบ้านขุนแปะเป็นระบบไมโครกริด เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบผลิตและจ่ายไฟฟ้าให้กับประชาชนในชุมชนที่อยู่ห่างไกลได้อย่างมั่นคง

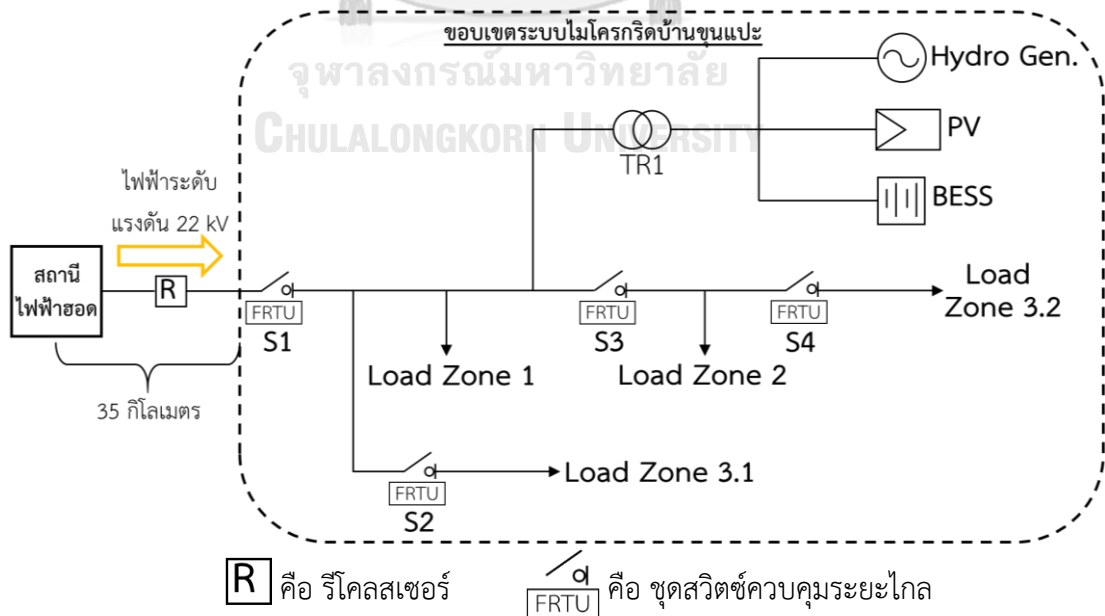
2.1 ข้อมูลระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ

ระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะมีโหลดสูงสุด 160 kW (ข้อมูล ณ เดือน เมษายน 2561) รับไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 kV จากสถานีไฟฟ้าฮอดซึ่งอยู่ห่างจากบ้านขุนแปะเป็นระยะทาง 35 กิโลเมตร ระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะแบ่งกลุ่มโหลดตามความสำคัญของโหลด โดยแบ่งออกเป็น 4 โชน ตามตำแหน่งที่ตั้งของชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกล (Remote-control switch) S1 – S4 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่งโหลดในพื้นที่โชนที่ 2 เป็นกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากเป็นพื้นที่ตั้งโครงการหลวง, โรงพยาบาล และโรงเรียน โดยภายในไมโครกริดมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (DER; Distributed energy resources) ติดตั้งอยู่ในโชนที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งผลิตไฟฟ้าดังนี้

- 1) ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (BESS; Battery energy storages system) ขนาด 100 kW/100 kWh
- 2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (PV; Photovoltaic) ขนาด 100 kW
- 3) โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydro Gen.; Hydro synchronous generator) ขนาด 100 kW



รูปที่ 2.1 แผนที่ GIS ของระบบจำหน่ายภายในบ้านชุมชนแปะ และการแบ่งกลุ่มโหลดตามโซนพื้นที่

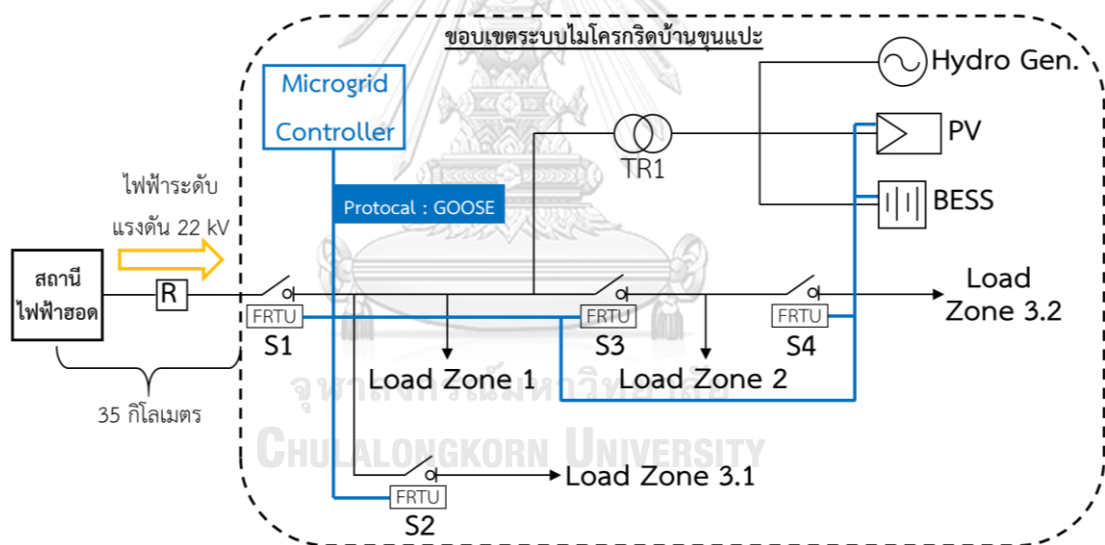


รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบไมโครกริดบ้านชุมชนแปะ ณ ปัจจุบัน

2.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ

2.2.1 ชุดควบคุมไมโครกริด

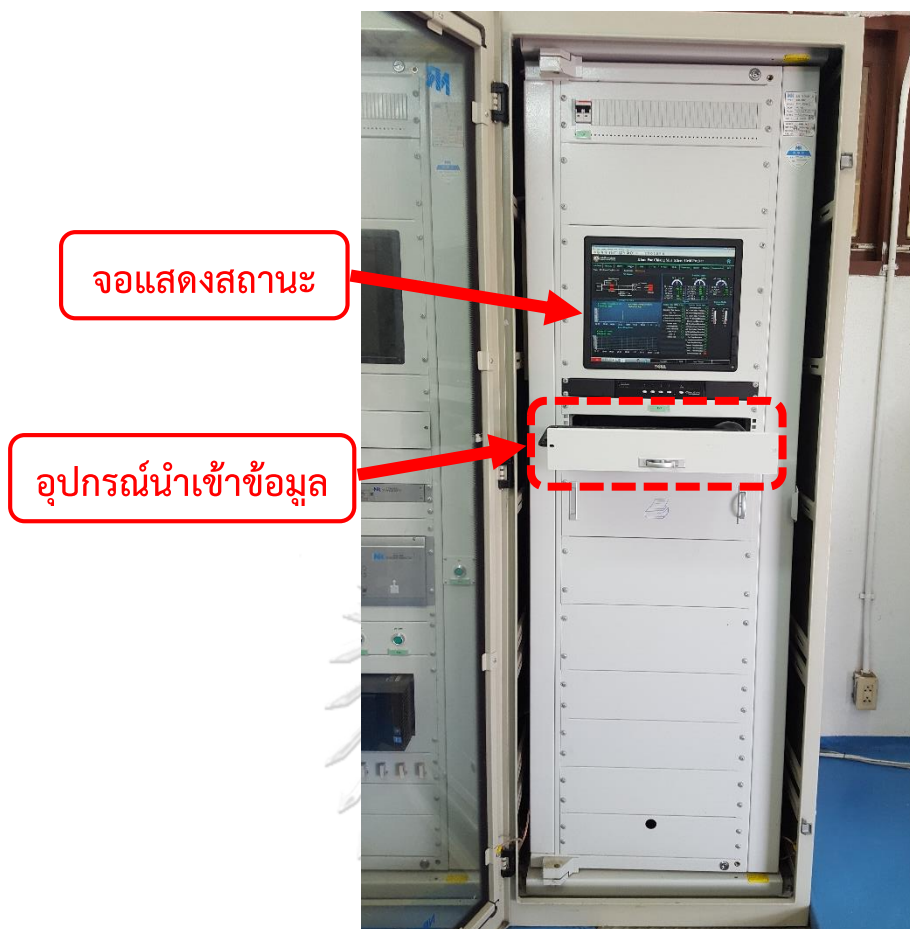
การทำงานของระบบไมโครกริดจะมีชุดควบคุมไมโครกริดเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการบริหารจัดการพลังงานในระบบไมโครกริด โดยทำหน้าที่ควบคุมและประสานการทำงานระหว่างอุปกรณ์ภายในระบบไมโครกริดเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการจ่ายไฟ ซึ่งการบริหารจัดการพลังงานดังกล่าว ชุดควบคุมไมโครกริดจะรับข้อมูลจากอุปกรณ์ต่างๆ ในไมโครกริดมาประมวลผล และทำการส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ในไมโครกริดผ่านโครงข่ายของระบบสื่อสารทางสายใยแก้วนำแสง (Fiber optic cable) โดยใช้โปรโตคอล GOOSE ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยชุดควบคุมไมโครกริดติดตั้งอยู่ที่ห้องควบคุมในบริเวณเดียวกับแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยที่อุปกรณ์ของชุดควบคุมไมโครกริดจะมีหน้าจอแสดงสถานการณ์ทำงานของระบบไมโครกริด และมีอุปกรณ์นำเข้าข้อมูล คือ เมาส์และคีย์บอร์ดสำหรับสั่งการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไมโครกริดผ่านทางหน้าจอแสดงสถานะ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



R คือ รีโกลสเซอร์ α คือ ชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกล

— คือ การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ผ่านสายใยแก้วนำแสง

รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมเส้นเดียวของการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภายในไมโครกริด



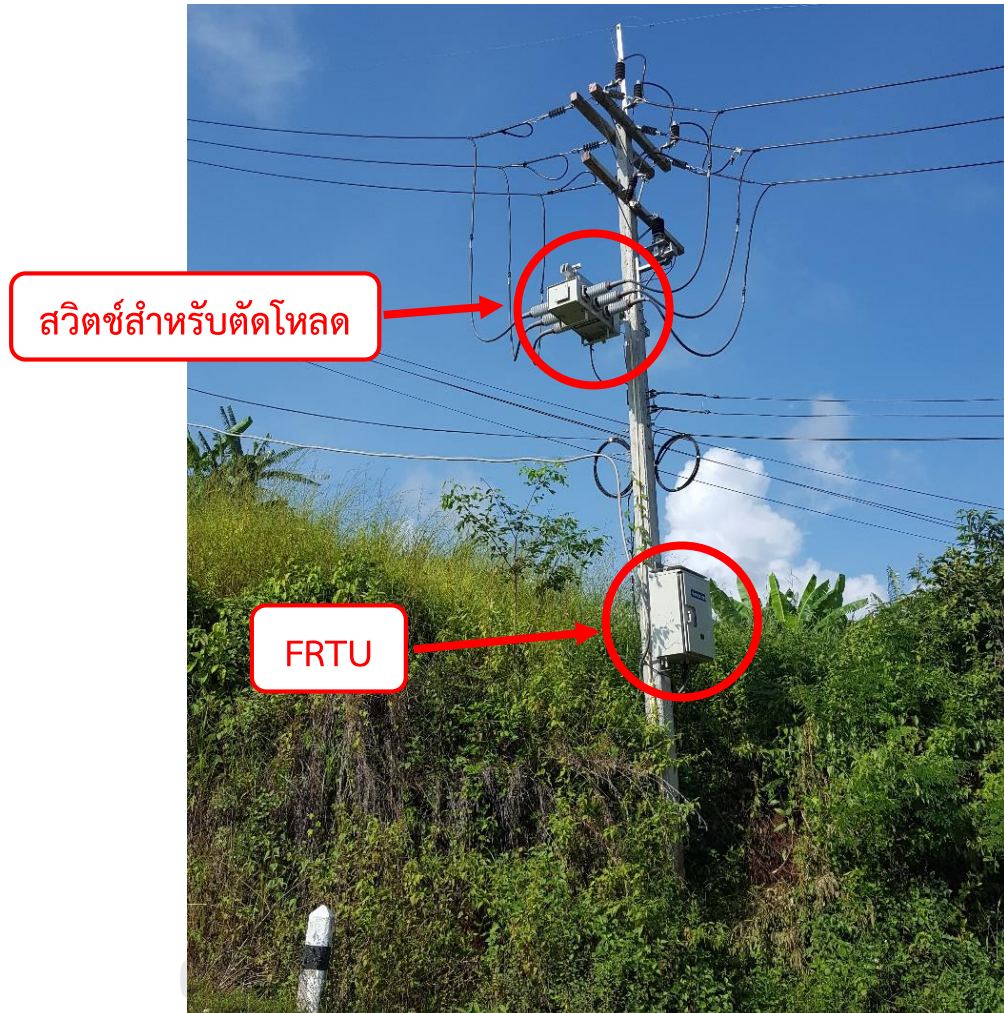
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ของชุดควบคุมไมโครกริด

2.2.2 ชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกล

ชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกลเป็นชุดอุปกรณ์ที่ควบคุมโดยชุดควบคุมไมโครกริดทำหน้าที่ตัด/ต่อโหลดออกจากระบบไฟฟ้าเพื่อควบคุมการจ่ายไฟให้เหมาะสม ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 2 ส่วน คือ 1) สวิตช์สำหรับตัดโหลด (Load-break switch) และ 2) FRTU (Feeder remote terminal unit) โดยอุปกรณ์ทั้ง 2 ส่วนจะติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้าต้นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5

สวิตช์สำหรับตัดโหลดทำหน้าที่ตัด/ต่อวงจร และสามารถตัดวงจรขณะที่มีกระแสไหลผ่านอยู่ได้ โดยในระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะมีสวิตช์สำหรับตัดโหลดอยู่ 2 ชนิด คือ 1) สวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 – S3 เป็นแบบ SF6 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.1 และ 2) สวิตช์สำหรับตัดโหลด S4 เป็นแบบฉนวนแข็งดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.2 ในส่วนของ FRTU ทำหน้าที่ส่งข้อมูลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า เช่น ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น ไปยังชุดควบคุมไมโครกริดและอีกหน้าที่หนึ่งของ FRTU คือ ควบคุมการทำงานของสวิตช์สำหรับตัดโหลดตามคำสั่งจากชุดควบคุมไมโครกริด

ชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกลแต่ละตัวจะทำหน้าที่แตกต่างกัน โดยชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกล S1 ทำหน้าที่ในการแยกโดระบบไมโครกริดกับระบบไฟฟ้าหลัก และชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกล S2 – S4 ทำหน้าที่ในการปลดโหลด (Load shedding) และการกู้คืนระบบไฟฟ้า (Black start)



รูปที่ 2.5 ชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกลของไมโครกริดบ้านขุนแปะ

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 – S3 แบบ SF6

Description	Data
Manufacturer	Precise
Model	ORAP 21 – 396 – 20 MT
Rated voltage	24 kV
System voltage	22 kV
Rated frequency	50 Hz
*** Rated normal current	630 A
Rated symmetrical interrupting current	630 A
Rated short-time withstand current, 1-second	12.5 kA _{rms}
Rated short-time making current	31.5 kA _{peak}
Rated power frequency withstand voltage, 1-minute	50 kV _{rms}
Rated impulse withstand voltage	125 kV _{peak}
Rated mainly active load breaking capacity	630 A
Rated transformer off-load breaking capacity	21 A
Rated cable-charging breaking capacity	10 A
*** Time to open, at rated normal current	< 2 seconds
Time to close	< 5 seconds

หมายเหตุ รายละเอียดสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 – S3 ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบป้องกันมีดังนี้

- รองรับการตัดกระแสไฟฟ้าไม่เกิน 630 A
- ใช้เวลาในการเปิดวงจรน้อยกว่า 2 วินาที

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดสวิตช์สำหรับตัดโหลด S4 แบบฉนวนแข็ง

Description	Data
Manufacturer	Precise
Model	SLBS-24
Rated voltage	24 kV
Rated frequency	50 Hz
*** Rated normal current	630 A
Rated symmetrical interrupting current	630 A
Rated short-time withstand current, 1-second	16 kA _{rms}
Rated short-time making current	40 kA _{peak}
Rated power frequency withstand voltage (dry), 1-minute	50 kV _{rms}
Rated power frequency withstand voltage (wet), 10-second	50 kV _{rms}
Rated impulse withstand voltage	125 kV _{peak}

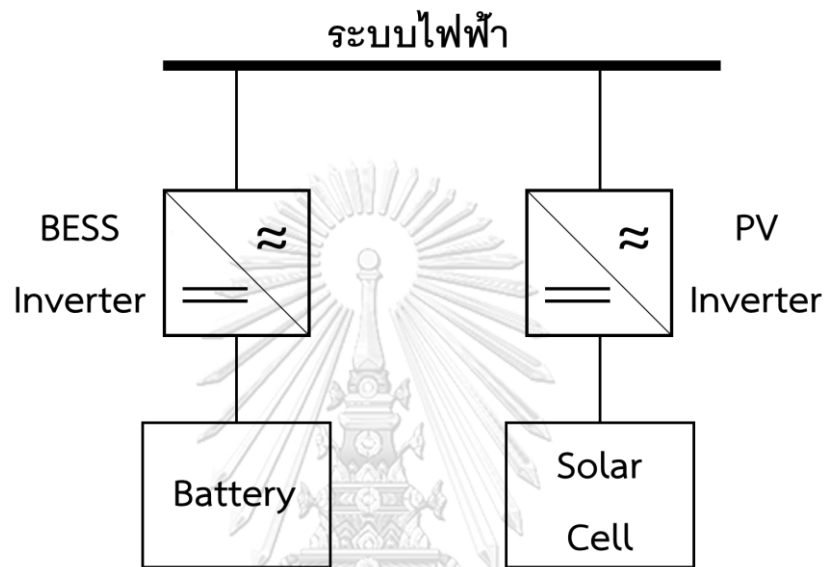
หมายเหตุ รายละเอียดสวิตช์สำหรับตัดโหลด S4 ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบป้องกันมีดังนี้

- รองรับการตัดกระแสไฟฟ้าไม่เกิน 630 A

2.2.3 ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระแสตรง การนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้จะต้องผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อนจ่ายเข้าสู่ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (PV Inverter) ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังระบบไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้ามีการไหลทิศทางเดียว คือ จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ออกไปยังระบบไฟฟ้า รายละเอียดของอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงในตารางที่ 2.3 ส่วนอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (BESS Inverter) ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ไปเป็นกระแสสลับเพื่อส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังระบบไฟฟ้าหรือในทางตรงกันข้ามสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบไฟฟ้าไปเป็นกระแสตรงเพื่อส่งพลังงานไปเก็บไว้ยังแบตเตอรี่ รายละเอียดอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่แสดงในตารางที่ 2.4

อินเวอร์เตอร์ของทั้ง 2 แหล่งผลิตไฟฟ้าควบคุมโดยชุดควบคุมไมโครกริดซึ่งสามารถสั่งควบคุมการจ่ายไฟฟ้าตามปริมาณและเวลาที่ต้องการเพื่อนำไปใช้กับฟังก์ชันที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบไฟฟ้า เช่น Peak sheving, Load shifting เป็นต้น และอินเวอร์เตอร์ยังทำหน้าที่ส่งข้อมูลสถานะการผลิตไฟฟ้าไปยังชุดควบคุมไมโครกริดเพื่อเป็นข้อมูลในการบริหารจัดการพลังงานในระบบไมโครกริด



รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

DC Side	
Range of input operating voltage	500 – 880 V
Maximum input operating current	220 A
Nominal output voltage	500 V
Nominal input current	200 A
AC Side	
Output – Grid configurations	Three-phase three-wire system
Nominal (line-line/line-neutral) output voltage	315 V
Nominal output frequency	50/60 Hz
*** Maximum continuous output current	183 A_{rms.}
Maximum Efficiency	98.4%
Maximum continuous output power	100 kW
Maximum output	110 kVA
Maximum continuous input current	202 A
Output power Factor	-0.9(Lading) ~ +0.9(Lagging)
Operating voltage range	283.5 – 346.5 V
Operating frequency range	47 – 52 Hz / 57 – 62 Hz

หมายเหตุ ค่ากระแสขาออกต่อเนื่องสูงสุด (Maximum continuous output current) คือ ค่ากระแสสูงสุดที่อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งจะนำไปใช้คำนวณหา ค่ากระแสลัดวงจรในบทที่ 3

ตารางที่ 2.4 รายละเอียดอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่

DC Side	
Maximum recommended DC input power	110 kW
Maximum voltage of PV (absolute maximum)	1000 V
Maximum DC input current	220 A
Maximum power point tracking (MPPT) voltage range	500 – 850 V
PV input operating voltage range	500 – 1000 V
Start-up voltage	550 V
AC Side	
Rated output power	100 kW
Maximum output apparent power	110 kVA
*** Maximum output AC current	202 A_{rms}
Power Factor range	-0.9(Lading) ~ +0.9(Lagging)
Maximum Efficiency	98.7%
Rated grid voltage	315 V
Permitted grid voltage range	280 – 350 V
Rated grid frequency	50 Hz
Permitted grid frequency range	49.5 – 50.2 Hz

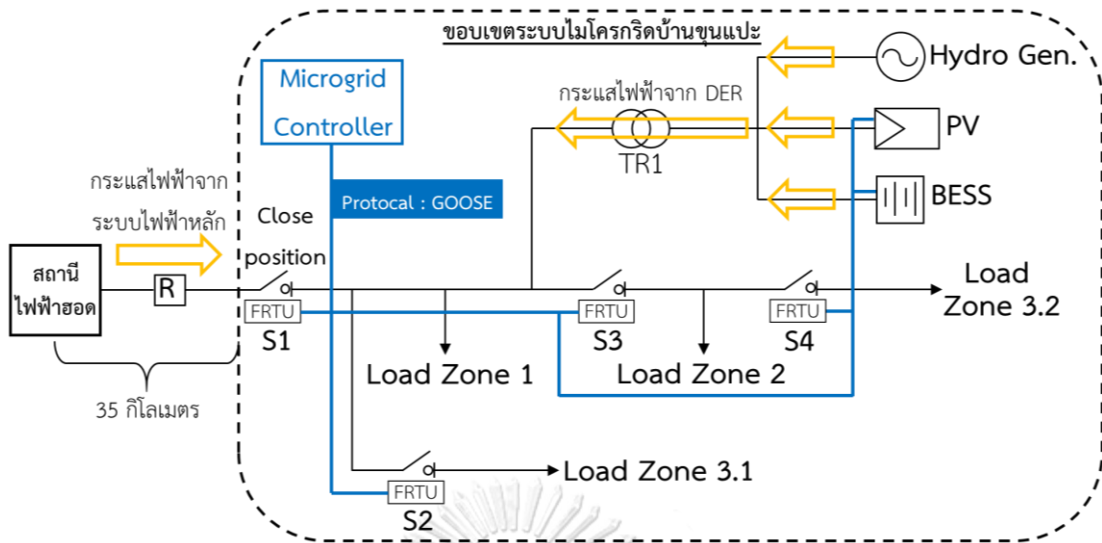
หมายเหตุ ค่า Maximum output AC current คือ ค่ากระแสสูงสุดที่อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งจะนำไปใช้คำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรในบทที่ 3

2.3 การทำงานของระบบไมโครกริดบ้านชุมชนแปะ

ชุดควบคุมไมโครกริดจะควบคุมรูปแบบการทำงานของไมโครกริดให้เหมาะสมกับสถานะการจ่ายกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหลัก โดยแต่ละรูปแบบการทำงานมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

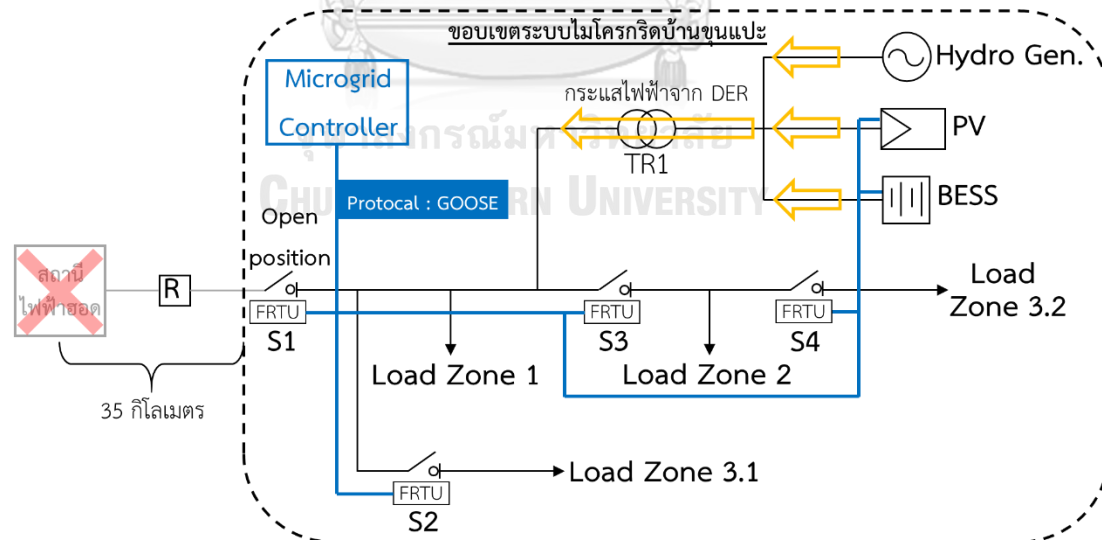
การทำงานของระบบไมโครกริดแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก คือ การทำงานที่ระบบไมโครกริดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก โหลดภายในไมโครกริดจะรับไฟฟ้าจาก 2 แหล่ง คือ ระบบไฟฟ้าหลัก และแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวภายในไมโครกริด ดังแสดงรายละเอียดการทำงานในรูปที่ 2.7 โดยในรูปแบบการทำงานนี้สวิตช์สำหรับตัดโหลดของชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกล S1 จะอยู่ในสถานะปิดวงจร (Close position)



รูปที่ 2.7 ระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

2.3.2 การทำงานแบบแยกโดด

การทำงานของระบบไมโครกริดแบบแยกโดด คือ การทำงานที่ระบบไมโครกริดตัดการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก โหลดภายในไมโครกริดจะรับไฟฟ้าเพียงแหล่งเดียว คือ แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวภายในไมโครกริด ดังแสดงรายละเอียดการทำงานในรูปที่ 2.8 โดยในรูปแบบการทำงานนี้สวิตช์สำหรับตัดโหลดของชุดสวิตช์ควบคุมระยะไกล S1 จะอยู่ในสถานะเปิดวงจร (Open position)



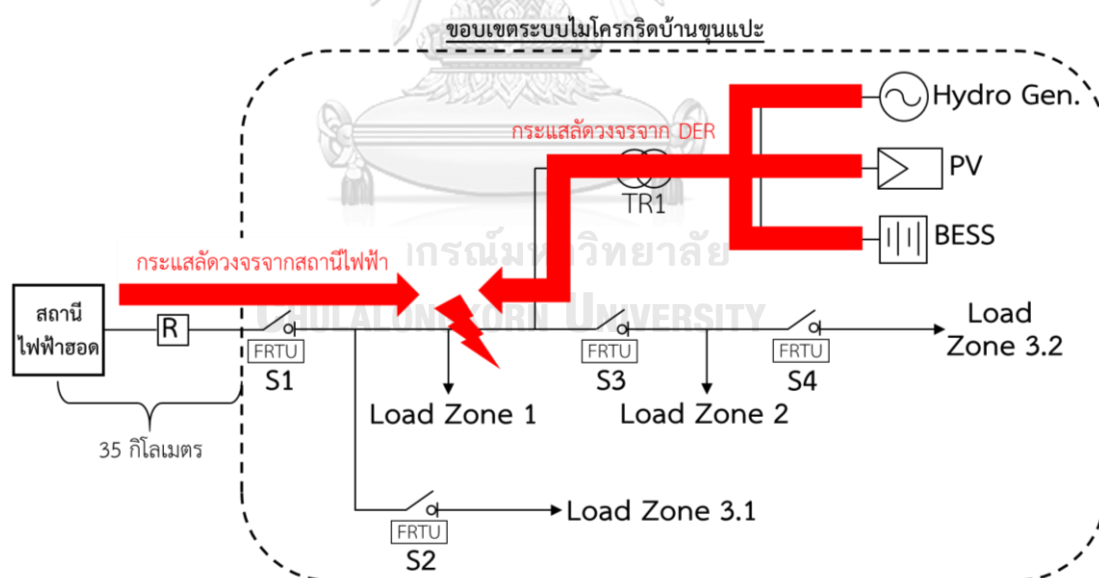
รูปที่ 2.8 ระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดด

2.4 ระบบป้องกันทางไฟฟ้าในปัจจุบัน

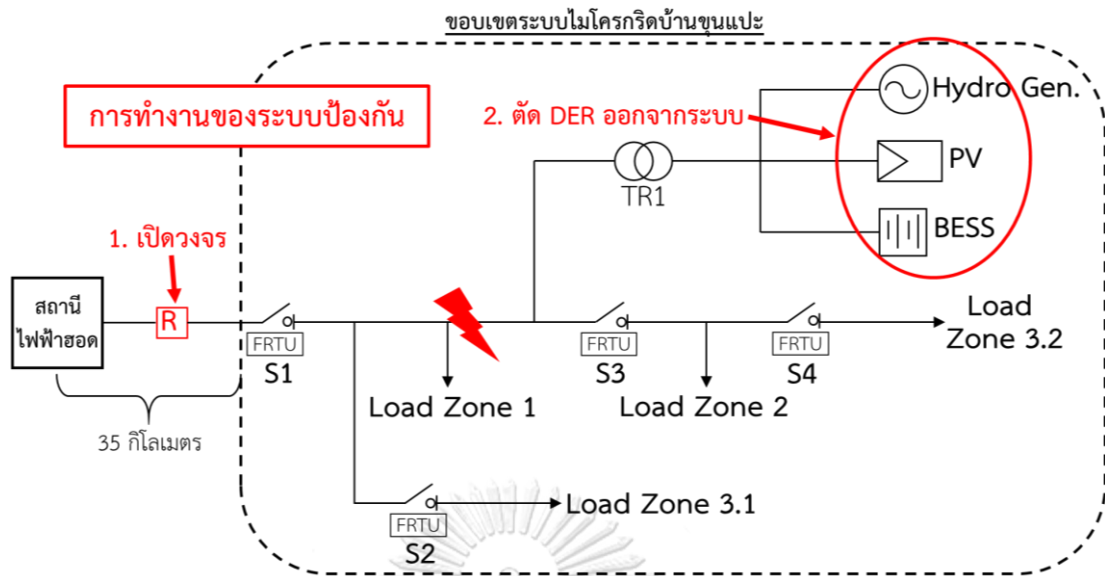
ระบบป้องกันทางไฟฟ้าในปัจจุบันของระบบไมโครกริดบ้านชุมชนแปะประกอบด้วย การป้องกัน 2 ส่วน คือ 1) รีโคลสเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ในระบบจำหน่ายก่อนมาถึงยังโครงการ (สัญลักษณ์ $\square R$ ในรูปที่ 2.2 – 2.3 และ 2.7 – 2.8) และ 2) ระบบป้องกันภายในของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยการทำงานของระบบป้องกันในแต่ละรูปแบบการทำงานของไมโครกริดมีรายละเอียด ดังนี้

2.4.1 การทำงานของระบบป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

การทำงานของระบบป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักจะใช้ การป้องกันทั้ง 2 ส่วน โดยเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นภายในระบบไมโครกริดจะมีกระแสลัดวงจรจาก สถานีไฟฟ้าฮอต และแหล่งจ่ายกระจายตัวไหลเข้าสู่จุดที่เกิดความผิดปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยรีโคลสเซอร์จะเปิดวงจรเพื่อตัดกระแสลัดวงจรที่มาจากสถานีไฟฟ้าฮอต ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังน้ำและอินเวอร์เตอร์ของ PV และ BESS เมื่อตรวจเจอความผิดปกติที่เกิดขึ้นระบบป้องกัน ภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำและอินเวอร์เตอร์จะตัดการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ และอินเวอร์เตอร์ออกจากระบบไมโครกริด จากการทำงานของระบบป้องกันส่งผลให้เกิดไฟดับในระบบไมโครกริด เนื่องจากแหล่งผลิตไฟฟ้าทั้งหมดถูกตัดออกจากระบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.10



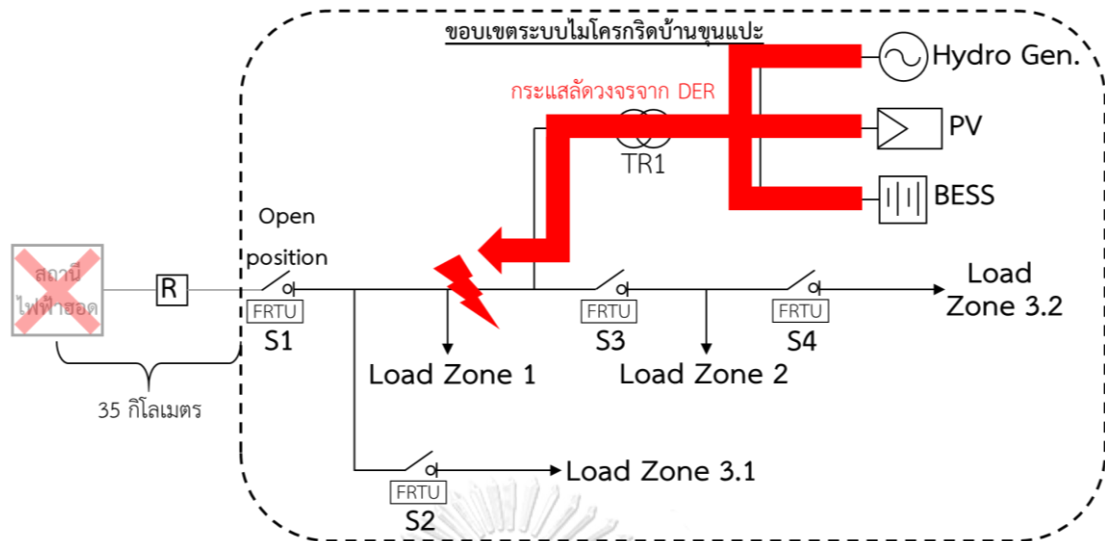
รูปที่ 2.9 กระแสลัดวงจรเมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก



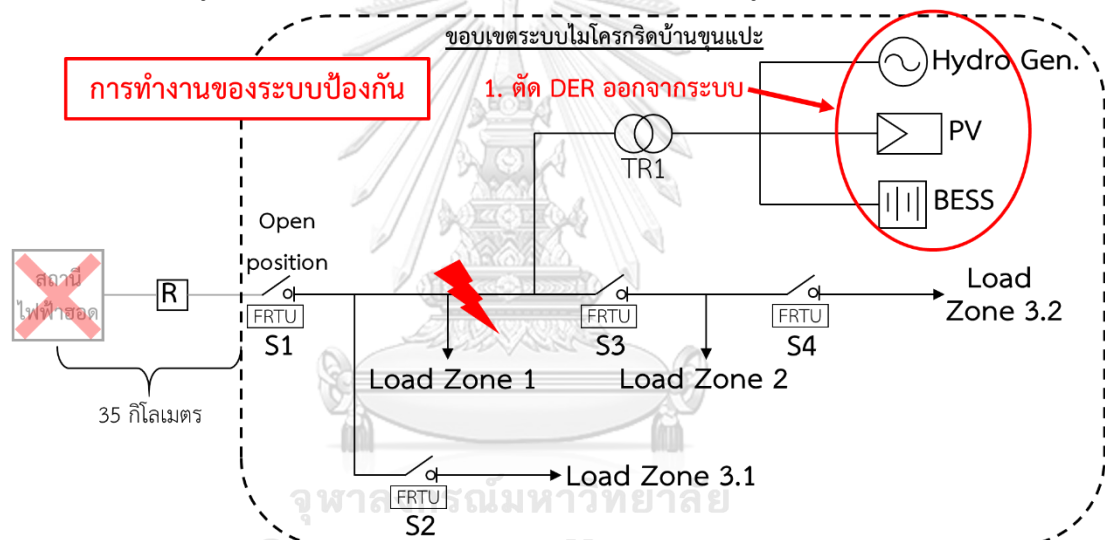
รูปที่ 2.10 การทำงานของระบบป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

2.4.2 การทำงานของระบบป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

การทำงานของระบบป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดดจะใช้การป้องกันในส่วน
ของระบบป้องกันภายในของแหล่งจ่ายกระจายตัว โดยเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นภายในระบบ
ไมโครกริดจะมีกระแสลัดวงจรจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเท่านั้นที่ไหลเข้าสู่จุดที่เกิดความ
ผิดปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำและอินเวอร์เตอร์ของ PV และ BESS
เมื่อตรวจเจอความผิดปกติที่เกิดขึ้นระบบป้องกันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำและ
อินเวอร์เตอร์จะทำการตัดการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำและอินเวอร์เตอร์ออกจากระบบ
ไมโครกริด จากการทำงานของระบบป้องกันส่งผลให้ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดดับ เนื่องจากแหล่งผลิต
ไฟฟ้าทั้งหมดถูกตัดออกจากระบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ส่วนรีโคลเซอร์จะไม่ทำงานเนื่องจาก
ระบบไมโครกริดไม่ได้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก



รูปที่ 2.11 กระแสลัดวงจรเมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบแยกโดด



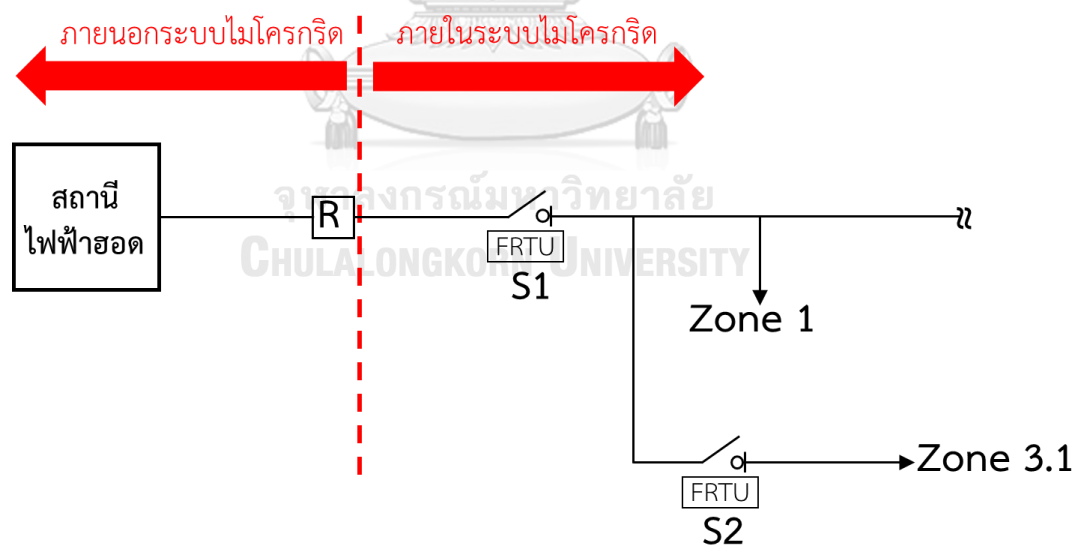
รูปที่ 2.12 การทำงานของระบบป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบแยกโดด

2.5 ผลกระทบจากระบบป้องกันทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อระบบไมโครกริด

จากการทำงานของระบบป้องกันตามหัวข้อที่ 2.4 พบว่า เมื่อเกิดความผิดปกติหรือขึ้นในพื้นที่โซนใดก็ตามในระบบไมโครกริดทั้ง 2 รูปแบบการทำงาน ระบบป้องกันจะทำการกำจัดความผิดปกติที่เกิดขึ้นโดยการตัดแหล่งผลิตไฟฟ้าทั้งหมดออกจากระบบทำให้เกิดปัญหาไฟดับทั้งระบบไมโครกริด ส่งผลให้ระดับความเชื่อถือได้ของระบบลดลง และดัชนีชี้วัดความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า คือ SAIFI และ SAIDI มีค่าสูงซึ่งบ่งบอกถึงคุณภาพการจ่ายไฟฟ้าที่ไม่ดี

2.5.1 ข้อมูลสถิติไฟดับที่ไม่โครกริตบ้านขุนแปะ

จากรายงานโครงการวิจัยและพัฒนาระบบบริหารจัดการแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสานขนาดเล็กมากและสายจำหน่ายไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกล [1] ได้บันทึกสถิติการเกิดปัญหาไฟดับในระบบไมโครกริตบ้านขุนแปะ สรุปได้ตามตารางที่ 2.5 โดยการเกิดปัญหาไฟดับนั้นมีสาเหตุจากทั้งปัญหาภายนอกระบบไมโครกริต และจากปัญหาภายในระบบไมโครกริตเอง ซึ่งพื้นที่ภายนอกและภายในระบบไมโครกริตแสดงในรูปที่ 2.13 ทั้งนี้จากการศึกษาข้อมูลสถิติการเกิดไฟดับพบว่า ประมาณ 30% ของการเกิดไฟดับมีสาเหตุมาจากปัญหาภายนอกระบบไมโครกริต โดยสาเหตุอาจเกิดจากปัญหาขาดข้องของสถานีไฟฟ้า หรือ เกิดความผิดพลาดระหว่างสถานีไฟฟ้ากับรีโวลูเตอร์ ส่งผลให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าจ่ายมายังระบบไมโครกริต และสาเหตุของการเกิดปัญหาไฟดับอีกประมาณ 70% มีสาเหตุมาจากปัญหาภายในระบบไมโครกริตเอง โดยสาเหตุการเกิดไฟดับมีแนวโน้มมาจากการทำงานของระบบป้องกันทางไฟฟ้าที่จะตัดแหล่งผลิตไฟฟ้าออกจากระบบทั้งหมดเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นภายในไมโครกริต ดังนั้นการปรับปรุงระบบป้องกันจึงมีความสำคัญเพื่อที่จะลดปัญหาการเกิดไฟดับจากการทำงานของระบบป้องกันของระบบไมโครกริต ซึ่งการลดปัญหาการเกิดไฟดับจะทำให้ผู้ใช้ไฟมีไฟฟ้าใช้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความเชื่อถือได้ของระบบสูงขึ้น และดัชนีชี้วัดความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า คือ SAIFI และ SAIDI มีค่าต่ำลงซึ่งบอถึงคุณภาพการจ่ายไฟฟ้าที่ดีขึ้น



รูปที่ 2.13 พื้นที่ภายนอกและภายในระบบไมโครกริตบ้านขุนแปะ

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลไฟดับที่ไม่โครกริตบ้านขุนแปะ

เดือน/ปี	จำนวนไฟดับ (ครั้ง)	เวลาที่ไฟดับ
มีนาคม 2561	7	40 ชั่วโมง 10 นาที
เมษายน 2561	11	52 ชั่วโมง 33 นาที
พฤษภาคม 2561	6	16 ชั่วโมง 44 นาที
มิถุนายน 2561	15	98 ชั่วโมง 37 นาที
กรกฎาคม 2561	6	50 ชั่วโมง 19 นาที
สิงหาคม 2561	-	-
กันยายน 2561	1	2 ชั่วโมง 27 นาที
ตุลาคม 2561	2	1 ชั่วโมง 47 นาที
พฤศจิกายน 2561	4	43 นาที
ธันวาคม 2561	2	8 ชั่วโมง 58 นาที
มกราคม 2562	-	-

หมายเหตุ - ข้อมูลไฟดับที่แสดงในตารางเป็นสถิติการเกิดไฟดับที่มีสาเหตุจากภายนอกระบบ
ไมโครกริตและภายในไมโครกริตรวมกัน

- ประมาณ 30% ของปัญหาไฟดับมีสาเหตุจากภายนอกระบบไมโครกริต โดยมีสาเหตุจากปัญหาของสถานีไฟฟ้า หรือเกิดความผิดปกติระหว่างสถานีไฟฟ้ากับรีโวลูชันเซอร์
- ประมาณ 70% ของปัญหาไฟดับมีสาเหตุจากภายในระบบไมโครกริต โดยสาเหตุมีแนวโน้มมาจากการทำงานของระบบป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติในไมโครกริต

2.5.2 ข้อจำกัดของระบบป้องกันในปัจจุบัน

การทำงานของระบบป้องกันในปัจจุบันส่งผลให้เกิดปัญหาไฟดับทั้งระบบ โดยปัญหาดังกล่าวเกิดจากข้อจำกัดของระบบป้องกันในปัจจุบัน ดังนี้

1) อุปกรณ์ตัด/ต่อวงจรที่ติดตั้งอยู่ภายในระบบ คือ สวิตช์สำหรับตัดโหลดสามารถตัดกระแสไฟฟ้าได้ 630 A และใช้เวลาในการตัดวงจรน้อยกว่า 2 วินาที ซึ่งความสามารถในการตัดกระแสไฟฟ้าได้ไม่เกิน 630 A อาจไม่รองรับกระแสลัดวงจรที่โดยปกติแล้วจะมีค่าสูง และเวลาที่ใช้ในการตัดวงจรค่อนข้างช้า ซึ่งการที่ไม่สามารถตัดกระแสลัดวงจรได้ หรือการเปิดวงจรช้าของสวิตช์สำหรับตัดโหลดจะส่งผลให้กระแสลัดวงจรสร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ

ทั้งนี้สวิตช์สำหรับตัดโหลดออกแบบมาให้ตัดวงจรในสภาวะปกติ เพื่อเป็นการซ่อมบำรุงระบบไฟฟ้าหรือปลดโหลดออกตามฟังก์ชันการทำงานของชุดควบคุมไมโครกริด จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในด้านระบบป้องกัน

2) ระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะเมื่อเกิดความผิดปกติในพื้นที่โซนใดก็ตาม ระบบป้องกันในปัจจุบันจะทำการตัดไฟฟ้าทั้งหมดที่จ่ายเข้าสู่ระบบไมโครกริด ทำให้พื้นที่ที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติได้รับผลกระทบจากไฟดับด้วย ซึ่งปัญหานี้เกิดจากที่ระบบไมโครกริดไม่มีการกำหนดเขตป้องกัน (Zone of protection) โดยเขตป้องกันภายในระบบไมโครกริดจะเป็นการแบ่งโหลดเป็นกลุ่มๆ และจัดให้มีอุปกรณ์ป้องกันในการทำหน้าที่ดูแลโหลดในเขตการป้องกันนั้นๆ เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในเขตการป้องกันใด อุปกรณ์ป้องกันของเขตการป้องกันนั้นจะแยกเขตการป้องกันที่ดูแลออกจากระบบไมโครกริด ส่งผลให้กลุ่มโหลดในพื้นที่โซนอื่นๆ จะไม่ได้รับผลกระทบและยังสามารถใช้ไฟฟ้าได้

3) ชุดควบคุมไมโครกริดและ FRTU มีความสามารถในการประมวลผลด้านระบบป้องกันอย่างจำกัด คือ มีเพียงฟังก์ชันการทำงานเมื่อแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเกินกว่าค่าปรับตั้งที่กำหนดไว้ ซึ่งไม่เพียงพอต่อการออกแบบระบบป้องกันที่ควรต้องมีความสามารถดังนี้

- การเปลี่ยนค่าปรับตั้งเมื่อไมโครกริดเปลี่ยนรูปแบบการทำงาน
- ความสามารถในการตรวจจับทิศทางของกระแสลัดวงจรที่แตกต่างกันไปตามตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติ
- ความสามารถในการประสานการทำงานระหว่างอุปกรณ์ป้องกัน
- ความสามารถในการรองรับการแบ่งเขตป้องกันตามโซนพื้นที่

จากปัญหาและข้อจำกัดของระบบป้องกันในปัจจุบันจึงต้องมีการปรับปรุงระบบป้องกันให้สามารถแยกเฉพาะโซนที่เกิดความผิดปกติของจากระบบเพื่อช่วยลดปัญหาไฟดับ และรองรับกับรูปแบบการทำงานของระบบไมโครกริดทั้ง 2 รูปแบบ โดยแนวทางการปรับปรุงระบบป้องกันจะแบ่งเป็นส่วนของการกำหนดเขตป้องกัน, การเลือกชนิดและตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน และการปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 3 และ 4 ต่อไป

บทที่ 3

การปรับปรุงระบบป้องกันของระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ

ระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะยังขาดระบบป้องกันภายในไมโครกริด เมื่อเกิดความผิดปกติหรือขึ้น จะไม่สามารถแยกเฉพาะส่วนที่เกิดความผิดปกติขึ้นได้ส่งผลให้ไฟดับทั้งระบบ ระบบป้องกันภายในจึงมีความสำคัญในการช่วยลดปัญหาไฟดับ เป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบไมโครกริด โดยการออกแบบระบบป้องกันภายในมีส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณา คือ 1) ชนิดของอุปกรณ์ป้องกันที่นำมาใช้ให้เหมาะกับระบบไมโครกริด และ 2) การแบ่งเขตป้องกันเพื่อให้สามารถแยกเฉพาะส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบได้

3.1 การพิจารณาเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกัน

การปรับปรุงระบบป้องกันให้ดีขึ้นต้องคำนึงถึงอุปกรณ์ป้องกันที่จะนำมาติดตั้งเพื่อทำเป็นระบบป้องกันภายในไมโครกริด ซึ่งต้องมีคุณสมบัติสามารถรองรับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไมโครกริดที่แตกต่างจากระบบไฟฟ้าแบบเรเดียลทั่วไป โดยการออกแบบระบบป้องกันภายในต้องศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันเพื่อให้ได้อุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมกับระบบไมโครกริด

3.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันสำหรับไมโครกริดบ้านขุนแปะ

ปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาในการเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันสำหรับระบบไมโครกริดบ้าน ขุนแปะแบ่งเป็น 2 ส่วน

1) ปัจจัยการทำงานของระบบไมโครกริดที่มีความแตกต่างจากระบบไฟฟ้าแบบเรเดียลทั่วไป คือ ระบบไมโครกริดมีแหล่งผลิตไฟฟ้าอยู่ภายในระบบไมโครกริด และความสามารถในการทำงานได้ 2 รูปแบบ

2) ลักษณะเฉพาะตัวและข้อจำกัดของระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะที่ส่งผลต่อการเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกัน

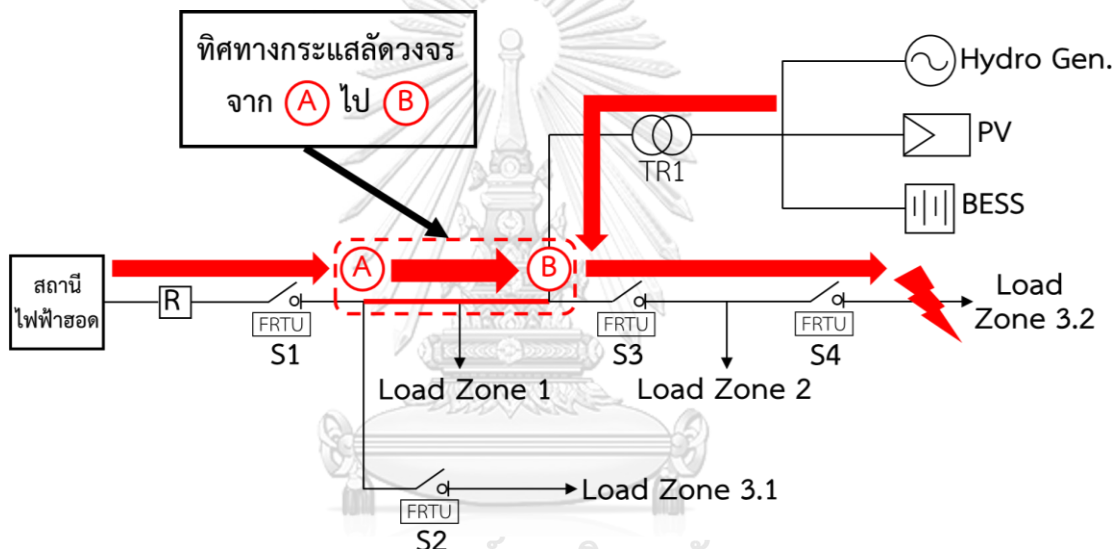
ดังนั้นการเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันที่จะนำมาใช้จะต้องพิจารณาจากปัจจัย 2 ส่วนนี้ ประกอบกัน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกอุปกรณ์ป้องกันมีรายละเอียด ดังนี้

3.1.1.1 ปัจจัยการเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันจากการทำงานของระบบไมโครกริด

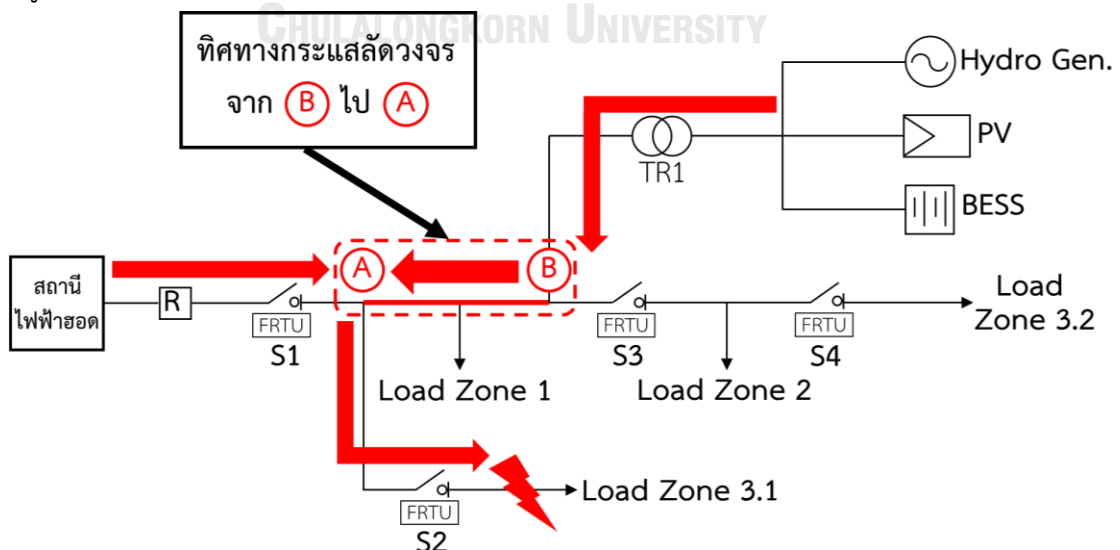
1) ค่ากระแสลัดวงจร ระบบไมโครกริดสามารถทำงานได้ 2 รูปแบบ คือ แบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก และแบบแยกโดด ซึ่งแต่ละรูปแบบการทำงานมีลักษณะสมบัติ และแหล่งผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จากความต่างต่างนี้ส่งผลให้เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกระแสลัดวงจรที่มายังจุดที่เกิดความผิดปกติของทั้ง 2 รูปแบบการทำงานจะมีค่าแตกต่างกัน แม้ความผิดปกติที่เกิดขึ้นจะเกิด

ในตำแหน่งเดียวกันก็ตาม ดังแสดงการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรของทั้ง 2 รูปแบบการทำงาน เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมกัน ในตำแหน่งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.11

2) **ทิศทางการไหลของกระแสลัดวงจร** ระบบไมโครกริดประกอบด้วยแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวติดตั้งอยู่ภายใน เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นจะมีกระแสลัดวงจรจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจ่ายออกมาด้วยเสมอ ซึ่งส่งผลให้ทิศทางการไหลของกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่งในช่วงเดียวกันมีโอกาสไหลกลับทิศทางกันเมื่อเกิดความผิดปกติในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ดังนั้นอุปกรณ์ป้องกันจะต้องสามารถตรวจจับกระแสลัดวงจรได้ทั้ง 2 ทิศทาง ตัวอย่างทิศทางการไหลของกระแสลัดวงจรที่ต่างกันในสายส่งช่วง A – B เมื่อเกิดความผิดปกติในพื้นที่โซน 3.2 แสดงในรูปที่ 3.1 และเมื่อเกิดความผิดปกติในพื้นที่โซน 3.1 แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ทิศทางการไหลของกระแสลัดวงจรในสายส่งช่วง A – B เมื่อเกิดความผิดปกติที่โซน 3.2



รูปที่ 3.2 ทิศทางการไหลของกระแสลัดวงจรในสายส่งช่วง A – B เมื่อเกิดความผิดปกติที่โซน 3.1

3.1.1.2 ปัจจัยการเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันของระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ

1) **โซนพื้นที่ของกลุ่มโหลด** ระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะแบ่งโหลดออกเป็น 4 โซนตามความสำคัญของกลุ่มโหลด โดยโหลดในพื้นที่โซนที่ 2 เป็นกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากเป็นพื้นที่ตั้งโครงการหลวง, โรงพยาบาล และโรงเรียน

2) **ความผิดพลาด** ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะส่วนมากจะเป็นความผิดพลาดแบบชั่วคราว เนื่องจากสายระบบจำหน่ายบางส่วนพาดผ่านพื้นที่ป่าที่มีต้นไม้อยู่อย่างหนาแน่น และมีสัตว์ป่าอาศัยอยู่ ดังนั้นจึงมีโอกาสสูงที่จะเกิดความผิดพลาดแบบชั่วคราวอันเนื่องมาจากกิ่งไม้ หรือสัตว์ขนาดเล็กมาสัมผัสสายระบบจำหน่าย

3) **สภาพพื้นที่ และความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน** บ้านขุนแปะตั้งอยู่ในภูเขาสูงพื้นที่มีความลาดเอียง อีกทั้งการคมนาคมยังไม่สะดวก ถนนค่อนข้างเล็ก และบางส่วนยังเป็นถนนลูกรัง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จึงควรเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีชิ้นส่วนอุปกรณ์น้อย และติดตั้งสะดวก



รูปที่ 3.3 ถนนภายในบ้านขุนแปะ

3.1.2 ชนิดอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมกับระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ

จากปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกันสำหรับไมโครกริดบ้านขุนแปะ และการศึกษาข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันชนิดต่างๆ ได้ข้อสรุปว่า ระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะควรเลือกใช้

รีโคลสเซอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกัน [ภาคผนวก ข] เนื่องจากมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะรองรับการทำงาน ของระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ ดังนี้

1) ความสามารถในการตั้งค่าการทำงานแบบแบ่งกลุ่ม (Group Setting) คือ ความสามารถในการตั้งค่าให้อุปกรณ์ทำงานได้หลายค่า โดยการเลือกใช้ค่าใดในการทำงานจะเป็นไป ตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมจะนำมาใช้ตั้งค่าการทำงานตามกระแสลัดวงจรที่ ต่างกันในแต่ละรูปแบบการทำงานของระบบไมโครกริด โดยตั้งค่าการทำงานสำหรับไมโครกริดเมื่อ ทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักไว้กลุ่มหนึ่ง และตั้งค่าการทำงานสำหรับไมโครกริดเมื่อทำงาน แบบแยกโดดอีกกลุ่มหนึ่ง

2) ความสามารถในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ คือ ความสามารถในการส่งหรือรับ ข้อมูล/คำสั่งระหว่างอุปกรณ์มากกว่า 2 ตัวขึ้นไป โดยความสามารถนี้จะนำมาใช้ในการสื่อสารกับ ชุดควบคุมไมโครกริดเพื่อรับข้อมูลสถานะรูปแบบการทำงานของไมโครกริด ซึ่งจะนำไปใช้เป็นเงื่อนไข ในการเลือกค่าการทำงานแบบแบ่งกลุ่มของรีโคลสเซอร์ต่อไป

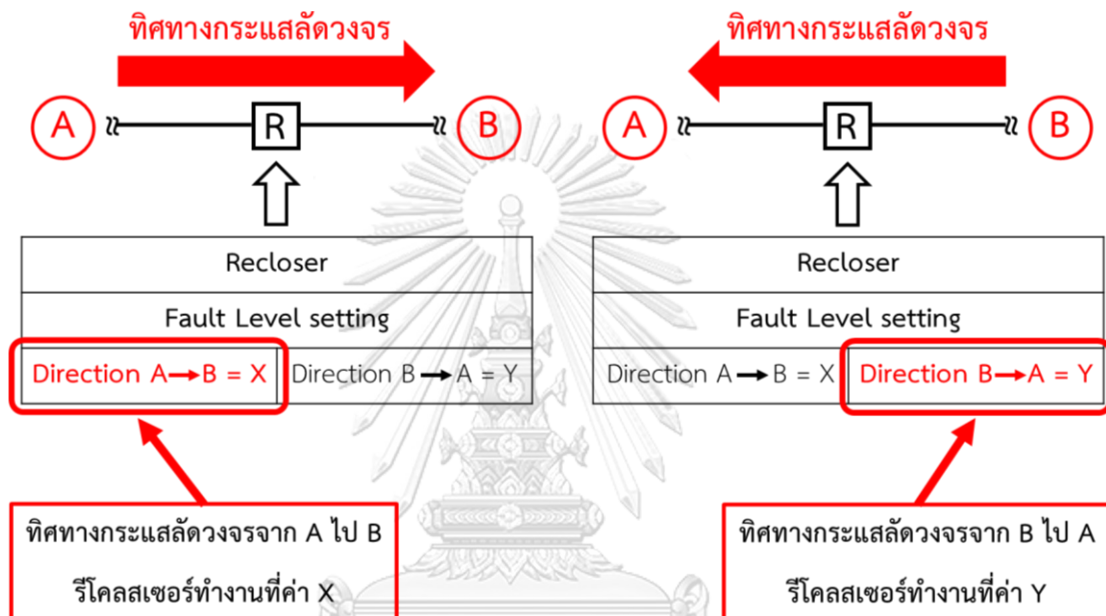
3) ความสามารถในการทำงานตามทิศทางกระแสลัดวงจร คือ ความสามารถในการ แยกแยะทิศทางกระแสที่ไหลผ่านรีโคลสเซอร์ โดยในแต่ละทิศทางของกระแสจะมีตั้งค่าการทำงาน เป็นของตัวเอง ดังแสดงแนวคิดการทำงานดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจะช่วยให้รีโคลสเซอร์ทำงานได้อย่างถูกต้อง ตามทิศทางของกระแสลัดวงจรที่ในสายส่งบางช่วงจะมีการไหลกลับทิศทางกันตามตำแหน่งที่เกิด ความผิดปกติ โดยความสามารถนี้อาศัยการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบทิศทาง (Directional Overcurrent Relay) ที่มีอยู่ในชุดควบคุมรีโคลสเซอร์

4) รูปแบบลักษณะเส้นโค้งการทำงานของรีเลย์มีให้เลือกใช้หลายรูปแบบ คือ รีเลย์ซึ่ง ควบคุมการทำงานของรีโคลสเซอร์มีรูปแบบลักษณะเส้นโค้งเพื่อนำไปใช้ตั้งค่าการทำงานให้เลือก หลายมาตรฐาน เช่น เส้นโค้งมาตรฐาน IEC, เส้นโค้งมาตรฐาน IEEE เป็นต้น โดยรีเลย์ที่มีรูปแบบ ลักษณะเส้นโค้งให้เลือกใช้มากจะทำให้สะดวกต่อการออกแบบการประสานการทำงานระหว่าง อุปกรณ์ป้องกันหลายๆ ตัวในระบบไมโครกริด ซึ่งเหมาะสมกับระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะที่มีการใช้ รีโคลสเซอร์หลายตัว เนื่องจากมีการแบ่งพื้นที่ออกเป็น 4 โซน ซึ่งแต่ละโซนจะมีอุปกรณ์ป้องกันที่จะ ทำหน้าที่ป้องกันในโซนที่อุปกรณ์นั้นรับผิดชอบ

5) ช่วยลดปัญหาไฟดับจากการเกิดความผิดปกติแบบชั่วคราว เนื่องจากรีโคลสเซอร์ เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่มีฟังก์ชันการปิดวงจรกลับอย่างรวดเร็วตามเวลาที่กำหนดไว้เพื่อให้สามารถใช้ ไฟฟ้าได้ตามปกติ โดยเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นจะมีกระแสลัดวงจรไหลผ่านรีโคลสเซอร์ รีโคลสเซอร์จะ เปิดวงจรเพื่อตัดกระแสลัดวงจร และต่อมาจะปิดกลับวงจร หากปิดวงจรกลับแล้วไม่มีกระแสลัดวงจร

ไหลผ่าน รีโคลสเซอร์จะให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังโหลดตามปกติ (ภาคผนวก ข) การทำงานของ รีโคลสเซอร์จะช่วยลดปัญหาไฟดับจากความผิดพลาดแบบชั่วคราวที่ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งมีแนวโน้มพบมากในระบบไมโครกริดบ้านชุมชนแปะ

6) ความสะดวกในการติดตั้ง เนื่องจากรีโคลสเซอร์มีลักษณะเป็นชุดอุปกรณ์ประกอบสำเร็จ (Complete set) มีส่วนประกอบไม่มาก ทำให้สามารถติดตั้งบนเสาไฟฟ้าเดิมที่มีอยู่ได้สะดวก ตัวอย่างชุดควบคุมรีโคลสเซอร์แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 การเลือกค่าการทำงานรีโคลสเซอร์เมื่อทิศทางกระแสลัดวงจรต่างกัน



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างชุดควบคุมรีโคลสเซอร์

[Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., "SEL-351R-4 Data Sheet", 2016]

3.2 การแบ่งเขตป้องกัน (Zone of Protection)

เขตป้องกันเป็นการแบ่งโหลดในระบบไฟฟ้าออกเป็นกลุ่ม โดยในแต่ละกลุ่มโหลดจะติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมเพื่อป้องกันกลุ่มโหลดนั้น เพื่อที่จะสามารถตัดกลุ่มโหลดที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้าเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าส่วนอื่นที่เหลือ ทำให้โหลดกลุ่มอื่นยังสามารถใช้ไฟฟ้าได้ตามปกติ ซึ่งการพิจารณาแบ่งเขตป้องกันเป็นส่วนสำคัญของการออกแบบหรือปรับปรุงระบบป้องกันทางไฟฟ้า

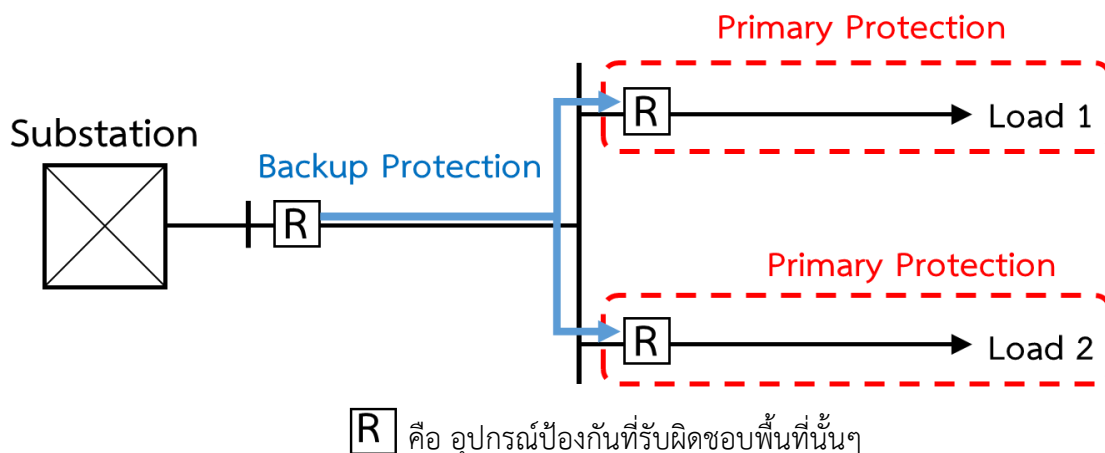
3.2.1 หลักการเบื้องต้นของการแบ่งเขตป้องกัน

การแบ่งเขตป้องกันจะแบ่งโหลดในระบบไฟฟ้าออกเป็นกลุ่มๆ โดยแต่ละกลุ่มจะมีอุปกรณ์ป้องกันที่รับผิดชอบในการป้องกันโหลดในกลุ่มนั้นๆ เป็นหลัก หรือเรียกว่าเขตป้องกันปฐมภูมิ (Primary protection) และในกรณีที่เขตป้องกันปฐมภูมิไม่ทำงานจะมีการป้องกันสำรอง (Backup protection) เพื่อกำจัดความผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้าแทน โดยเขตป้องกันทั้ง 2 รูปแบบ คือ เขตป้องกันปฐมภูมิ และการป้องกันสำรอง มีหลักพิจารณา ดังนี้

1) **เขตป้องกันปฐมภูมิ** เป็นการป้องกันลำดับแรก เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นภายในพื้นที่รับผิดชอบอุปกรณ์ป้องกันจะทำงานกำจัดความผิดปกติให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งเป็นการแยกเฉพาะกลุ่มโหลดส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้า เพื่อเป็นการจำกัดบริเวณที่จะได้รับผลกระทบจากความผิดปกติที่เกิดขึ้น ซึ่งการแยกเฉพาะกลุ่มโหลดส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้าจะทำให้ระบบไฟฟ้าส่วนที่เหลือยังสามารถใช้ไฟฟ้าได้ตามปกติ ลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าให้น้อยที่สุด อีกทั้งการป้องกันปฐมภูมิยังทำให้ผู้ควบคุมดูแลระบบไฟฟ้าสามารถทราบโซนบริเวณที่เกิดความผิดปกติขึ้นได้ เนื่องจากการป้องกันแบบปฐมภูมิของพื้นที่ใดทำงานแสดงว่าเกิดความผิดปกติขึ้นในพื้นที่นั้นๆ ซึ่งเป็นการจำกัดพื้นที่ให้ผู้ควบคุมดูแลระบบสามารถหาจุดที่เกิดความผิดปกติได้รวดเร็วขึ้น

2) **การป้องกันสำรอง** เป็นการป้องกันอีกชุดหนึ่งที่อยู่ถัดออกมาจากเขตป้องกันปฐมภูมิ โดยกำหนดเวลาทำงานให้ช้ากว่าการป้องกันปฐมภูมิ การป้องกันสำรองจะทำงานในกรณีที่มีปัญหาเกิดขึ้นกับเขตป้องกันปฐมภูมิส่งผลให้การป้องกันปฐมภูมิไม่ทำงาน เพื่อกำจัดความผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้าแทน โดยการทำงานของ การป้องกันสำรองที่อยู่ถัดออกมาจากเขตป้องกันปฐมภูมิจะส่งผลให้กลุ่มโหลดที่ถูกแยกออกมามีมากกว่าการป้องกันแบบปฐมภูมิ ทำให้ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ามากขึ้น

การแบ่งเขตป้องกันทั้งสองแบบ คือ เขตป้องกันปฐมภูมิ และการป้องกันสำรองมีความสัมพันธ์กันตามตัวอย่างการแบ่งเขตป้องกันในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 หลักการแบ่งเขตป้องกันของระบบไฟฟ้า

3.2.2 การพิจารณาแบ่งเขตป้องกันและตำแหน่งติดตั้งรีโกลสเซอร์สำหรับระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ

ระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะแบ่งโหลดออกเป็น 4 โซน ตามความสำคัญของกลุ่มโหลด โดยโหลดในพื้นที่โซนที่ 1, 3.1, 3.2 เป็นกลุ่มโหลดบ้านเรือนของประชาชนในพื้นที่ ในขณะที่โหลดในพื้นที่โซนที่ 2 เป็นกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากเป็นพื้นที่ตั้งโครงการหลวง, โรงพยาบาล และโรงเรียน โดยการกำหนดเขตป้องกัน และตำแหน่งติดตั้งรีโกลสเซอร์จะยึดตามการแบ่งโซนที่ได้กำหนดไว้ เนื่องจากเป็นการแบ่งโซนตามความสำคัญของกลุ่มโหลดแล้ว โดยหลักการพื้นฐานคือ เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในพื้นที่โซนใดแล้วจะแยกเฉพาะกลุ่มโหลดโซนพื้นที่นั้นออก โดยไม่ให้ส่งผลกระทบต่อพื้นที่โซนอื่น และพยายามให้พื้นที่โซน 2 ได้รับความกระทบน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากเป็นกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญที่สุดในบ้านขุนแปะ โดยการแบ่งเขตป้องกันจะต้องพิจารณาทั้ง 2 รูปแบบการทำงานของไมโครกริดเนื่องจากขนาด และทิศทางทางไหลของกระแสลัดวงจรนั้นมีความแตกต่างกัน

3.2.2.1 การพิจารณากำหนดเขตป้องกันสำหรับไมโครกริดเมื่อทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

1) การพิจารณากำหนดเขตป้องกันปฐมภูมิ

เขตป้องกันปฐมภูมิจะทำงานกำจัดความผิดปกติที่เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ และแยกเฉพาะส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้า โดยไมโครกริดบ้านขุนแปะมีการแบ่งกลุ่มโหลดตามความสำคัญออกเป็น 4 โซน จึงมีความเหมาะสมที่จะนำพื้นที่ทั้ง 4 โซน มาจัดทำเป็นเขตป้องกันปฐมภูมิ นอกจากนี้ได้เพิ่มโซนพื้นที่ที่ตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเป็นอีกโซนหนึ่ง (เขตป้องกัน Zone DER) เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่สามารถเกิดความผิดปกติขึ้นทำให้มีกระแสลัดวงจรไหลเข้า

มาในพื้นที่นี้ได้ และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเองยังสามารถผลิตกระแสลัดวงจรไปยังไมโครกริดบ้านขุนแปะได้อีกด้วยเช่นกัน จึงต้องจัดทำเป็นเขตป้องกันปฐมภูมิอีกเขตป้องกันหนึ่ง ทั้งนี้ไมโครกริดบ้านขุนแปะจะมีเขตป้องกันปฐมภูมิตั้งรวมทั้งหมด 5 เขตป้องกัน

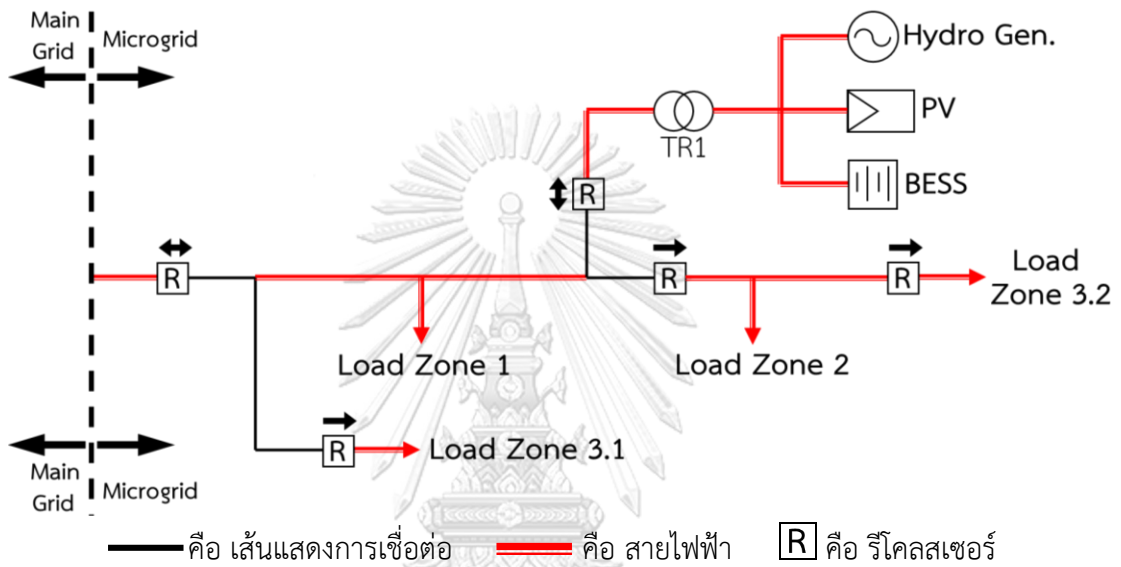
เขตป้องกันแบบปฐมภูมิจะต้องมีการติดตั้งรีโคสเซอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำหรับเขตป้องกันนั้นๆ โดยการเลือกตำแหน่งติดตั้งมีหลักการพิจารณา คือ 1) สามารถป้องกันกลุ่มโหลดภายในเขตป้องกันได้ทั้งหมด และ 2) สามารถแยกเฉพาะเขตป้องกันที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้า เพื่อให้ส่วนอื่นยังสามารถทำงานได้ตามปกติ จากหลักการดังกล่าวจึงสามารถกำหนดตำแหน่งติดตั้งรีโคสเซอร์ และทิศทางการทำงานของรีโคสเซอร์ตามทิศทางของกระแสลัดวงจร โดยพิจารณาตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ติดตั้งรีโคสเซอร์บริเวณสวิตช์สำหรับตัดโหลดเนื่องจากเป็นจุดแบ่งโซนพื้นที่เพื่อให้สามารถป้องกันกลุ่มโหลดภายในโซนพื้นที่นั้นๆ สำหรับทิศทางการทำงานของรีโคสเซอร์เป็นไปตามทิศทางของกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านรีโคสเซอร์ตัวนั้นๆ ที่ได้จากการจำลองให้เกิดความผิดปกติขึ้นในพื้นที่โซนต่างๆ และรีโคสเซอร์ที่ติดตั้งบริเวณสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 จะต้องกำหนดทิศทางการทำงานในทิศทางตรวจจับกระแสลัดวงจรที่ไหลออกจากระบบไมโครกริดไปยังระบบไฟฟ้าหลักด้วย เพื่อรองรับการเกิดความผิดปกติที่อาจเกิดบนสายระบบจำหน่ายของระบบไฟฟ้าหลักตั้งแต่รีโคสเซอร์ภายนอกไมโครกริดถึงจุดติดตั้งรีโคสเซอร์บริเวณสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 โดยตำแหน่งติดตั้งและทิศทางการทำงานของรีโคสเซอร์แสดงในรูปที่ 3.7

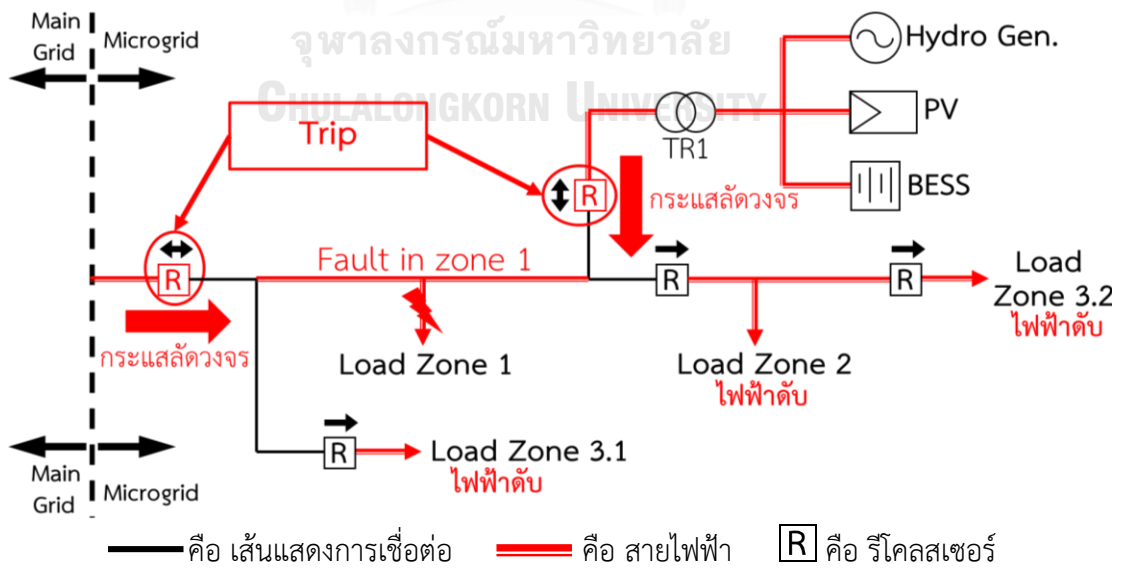
ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาการทำงานของรีโคสเซอร์ที่ติดตั้งไว้บริเวณสวิตช์สำหรับตัดโหลด โดยพิจารณาว่าเมื่อเกิดความผิดปกติในพื้นที่โซนใด พื้นที่โซนนั้นสามารถแยกออกจากระบบไมโครกริดได้หรือไม่ ซึ่งพบว่า มีเฉพาะพื้นที่โซน 1 ที่เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นจะไม่สามารถแยกเฉพาะพื้นที่โซนนั้นออกจากระบบไฟฟ้าได้ โดยเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในพื้นที่โซน 1 จะมีกระแสลัดวงจรจากระบบไฟฟ้าหลัก และจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวไหลเข้าสู่จุดที่เกิดความผิดปกติ ซึ่งจะทำให้รีโคสเซอร์ที่ติดตั้งบริเวณสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 และ Zone DER เปิดวงจร (Trip) ส่งผลกระทบให้เกิดปัญหาไฟดับทั้งระบบ ดังแสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปที่ 3.8

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาติดตั้งรีโคสเซอร์เพิ่มเพื่อให้สามารถแยกเฉพาะพื้นที่โซน 1 ออกจากระบบไมโครกริด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นภายในพื้นที่ โดยพิจารณาจากกระแสลัดวงจรที่ไหลเข้าพื้นที่โซน 1 พบว่าเป็นกระแสลัดวงจรจากระบบไฟฟ้าหลัก และแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ดังนั้นจึงต้องติดตั้งรีโคสเซอร์เพิ่มอีก 2 จุด โดยรีโคสเซอร์ตัวที่ 1 ติดตั้งที่บริเวณหลังจุดแยกสายระบบจำหน่ายไปพื้นที่โซน 3.1 โดยมีทิศทางการทำงานตามทิศทางของกระแสลัดวงจร คือ

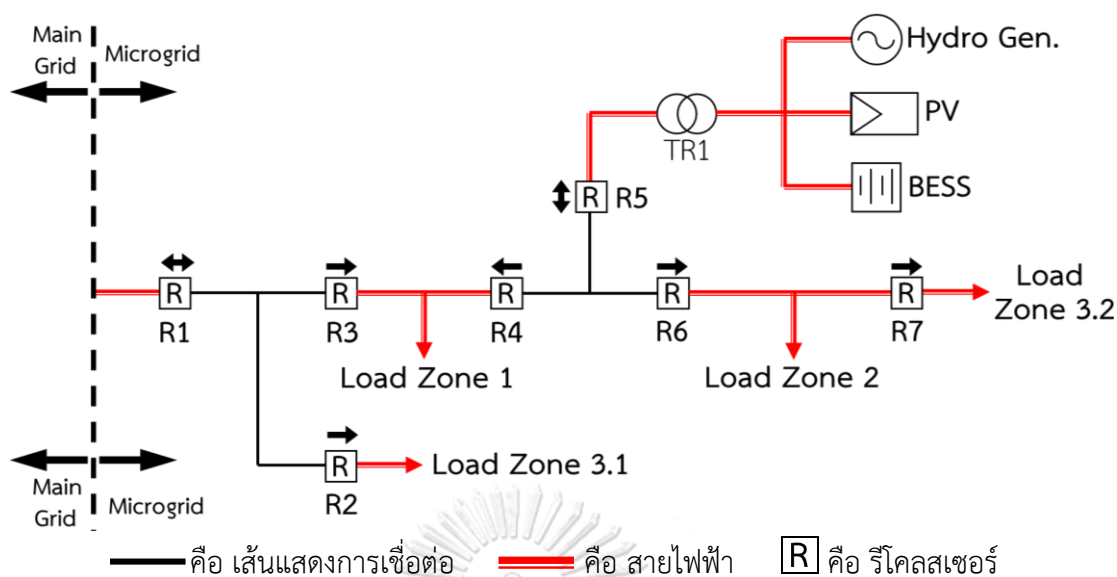
ทิศทางไหลเข้าพื้นที่โซน 1 และรีโกลสเซอร์ตัวที่ 2 ติดตั้งที่บริเวณก่อนถึงจุดทางแยกสายระบบ
 จำหน่ายไปพื้นที่ โซน 2 และพื้นที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยมีทิศทางการทำงานของ
 รีโกลสเซอร์เป็นไปตามทิศทางของกระแสลัดวงจร คือ ทิศทางไหลเข้าพื้นที่โซน 1 ดังนั้นระบบ
 ไมโครกริดบ้านขุนแปะเมื่อทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักจะติดตั้งรีโกลสเซอร์ทั้งหมด 7 ตัว
 โดยกำหนดชื่อรีโกลสเซอร์เป็น R1 – R7 เพื่อให้สามารถแยกเฉพาะโซนพื้นที่ๆ เกิดความผิดปกติได้
 ตำแหน่งติดตั้งและทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งและทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ตามขั้นตอนที่ 1 ในกรณีไมโครกริดทำงาน
 แบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก



รูปที่ 3.8 ผลกระทบจากการทำงานของรีโกลสเซอร์ตามขั้นตอนที่ 1 เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในพื้นที่
 โซน 1 ในกรณีไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งติดตั้ง และทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ทั้งหมดจากการกำหนดเขตป้องกัน
ปฐมภูมิ ในกรณีไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

2) การพิจารณากำหนดการป้องกันสำรอง

การป้องกันสำรองจะอยู่ถัดออกมาจากเขตป้องกันปฐมภูมิซึ่งจะทำงานในกรณีที่เขตป้องกันปฐมภูมิไม่ทำงาน เพื่อทำการกำจัดความผิดปกติรบกวน โดยการพิจารณากำหนดการป้องกันสำรองมีหลักการเบื้องต้น ดังนี้

- 1) การป้องกันสำรองจะอยู่ที่อยู่ถัดออกมาจากเขตป้องกันที่เกิดความผิดปกติ
- 2) พิจารณากำหนดการป้องกันสำรองจากเขตป้องกันที่อยู่ปลายสายส่งก่อน และไล่

พิจารณาเขตป้องกันที่อยู่ถัดเข้ามาเป็นลำดับต่อไปจนครบทุกเขตป้องกัน

จากหลักการดังกล่าวจึงสามารถกำหนดการป้องกันสำรองสำหรับไมโครกริดบ้าน
ขุนแปะเมื่อทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักได้ ดังนี้

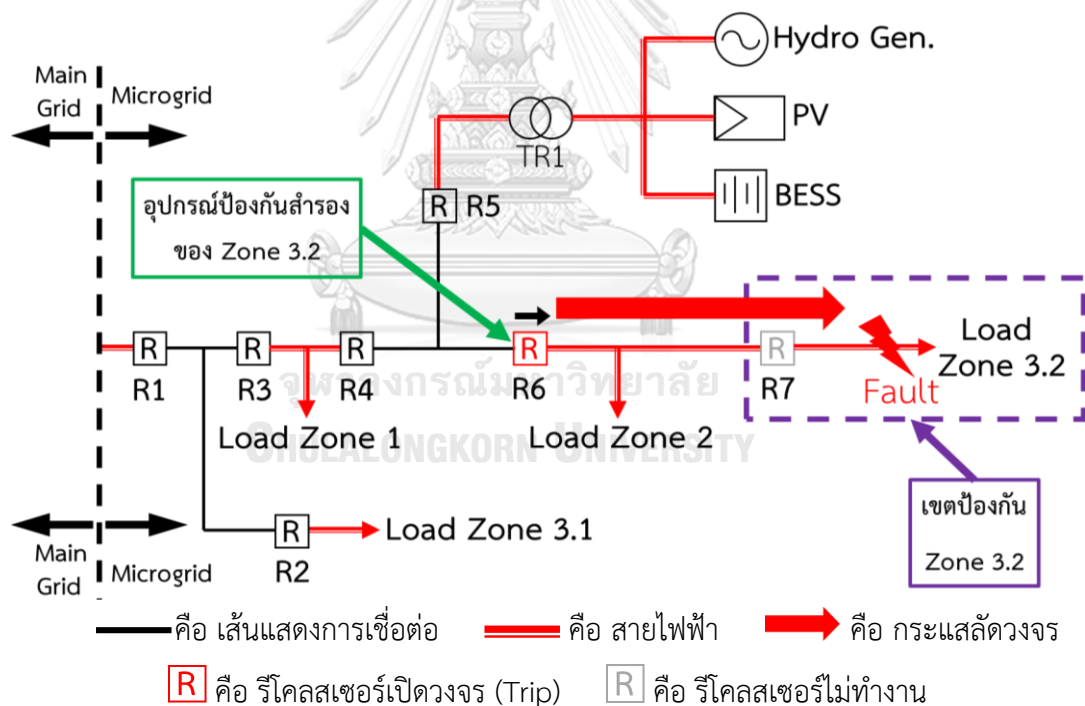
- การป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 3.2 กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R6 ทำงาน
เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง ดังแสดงหลักการพิจารณาในรูปที่ 3.10

- การป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 2 กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R4 และ
รีโกลสเซอร์ R5 ทำงานเป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง ดังแสดงหลักการพิจารณาในรูปที่ 3.11 และการที่
กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R4 เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรองของเขตการป้องกัน Zone 2 ส่งผลให้ต้อง
กำหนดทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ R4 เพิ่มจากการกำหนดในเขตป้องกันปฐมภูมิ โดยเพิ่มทิศ
การตรวจจับกระแสที่ไหลไปยัง Zone 2 ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสที่ไหลไปยัง Zone DER

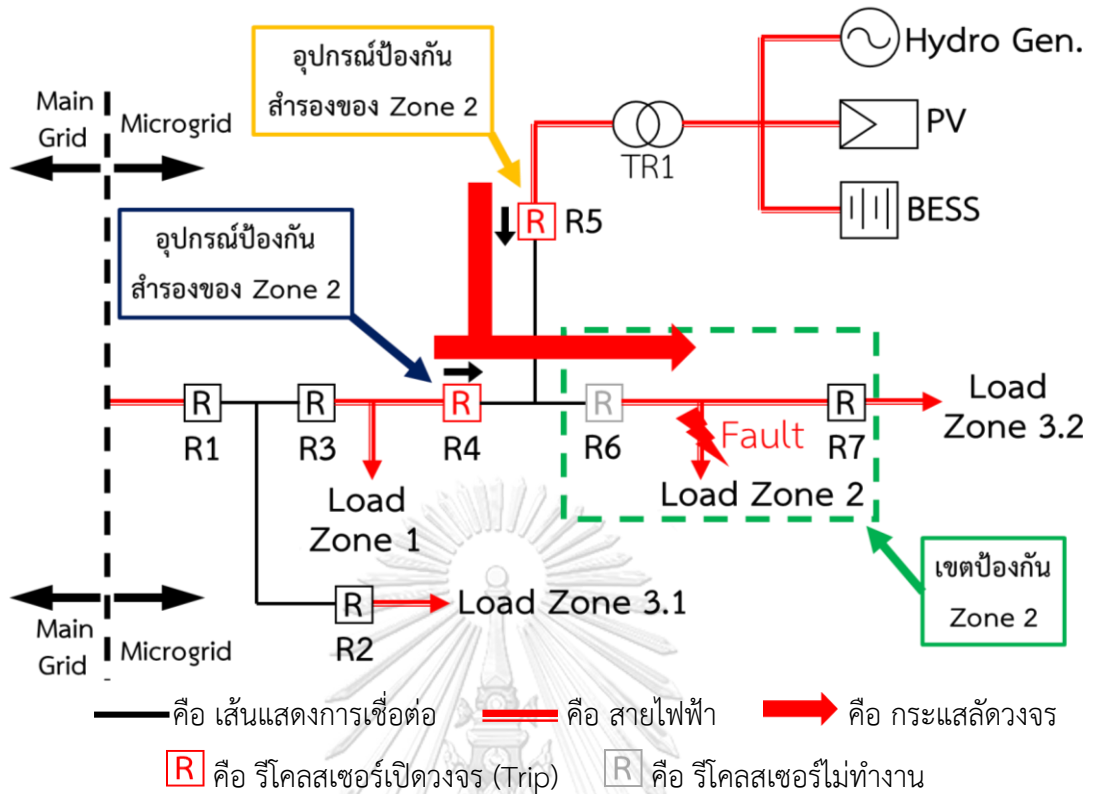
- การป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone DER กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R4 ทำงานเป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง ดังแสดงหลักการพิจารณาในรูปที่ 3.12 และการที่กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R4 เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone DER ส่งผลให้ต้องกำหนดทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ R4 เพิ่มจากการกำหนดในเขตป้องกันปฐมภูมิ โดยเพิ่มทิศการตรวจจับกระแสที่ไหลไปยัง Zone DER ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสที่ไหลไปยัง Zone 2

- การป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 3.1 กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R1 และรีโกลสเซอร์ R3 เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง ดังแสดงหลักการพิจารณาในรูปที่ 3.13 และการที่กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R3 เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรองของเขตการป้องกัน Zone 3.1 ส่งผลให้ต้องกำหนดทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ R3 เพิ่มจากการกำหนดในเขตป้องกันปฐมภูมิ โดยเพิ่มทิศการตรวจจับกระแสที่ไหลไปยัง Zone 3.1

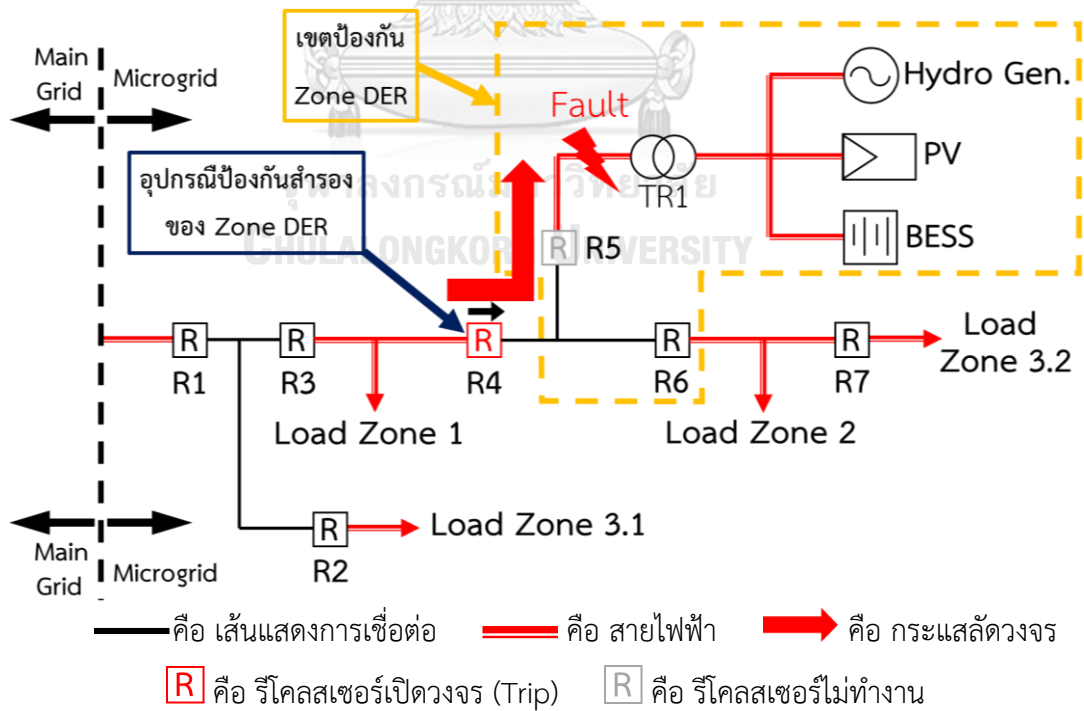
- การป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 1 กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R1 และรีโกลสเซอร์ R5 เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง ดังแสดงหลักการพิจารณาในรูปที่ 3.14



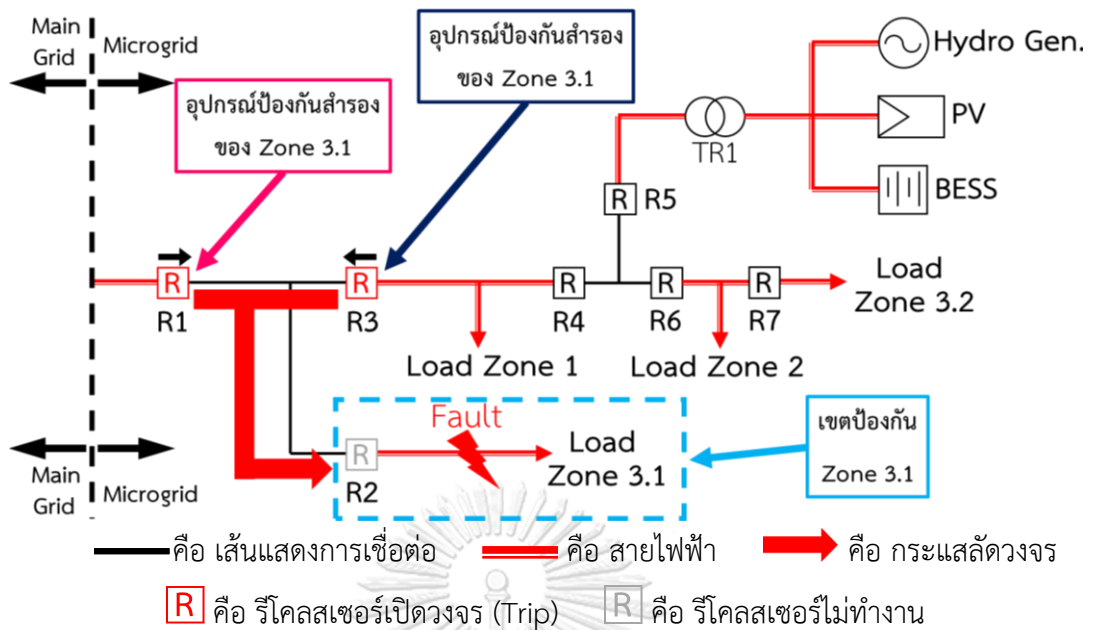
รูปที่ 3.10 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 3.2 เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก



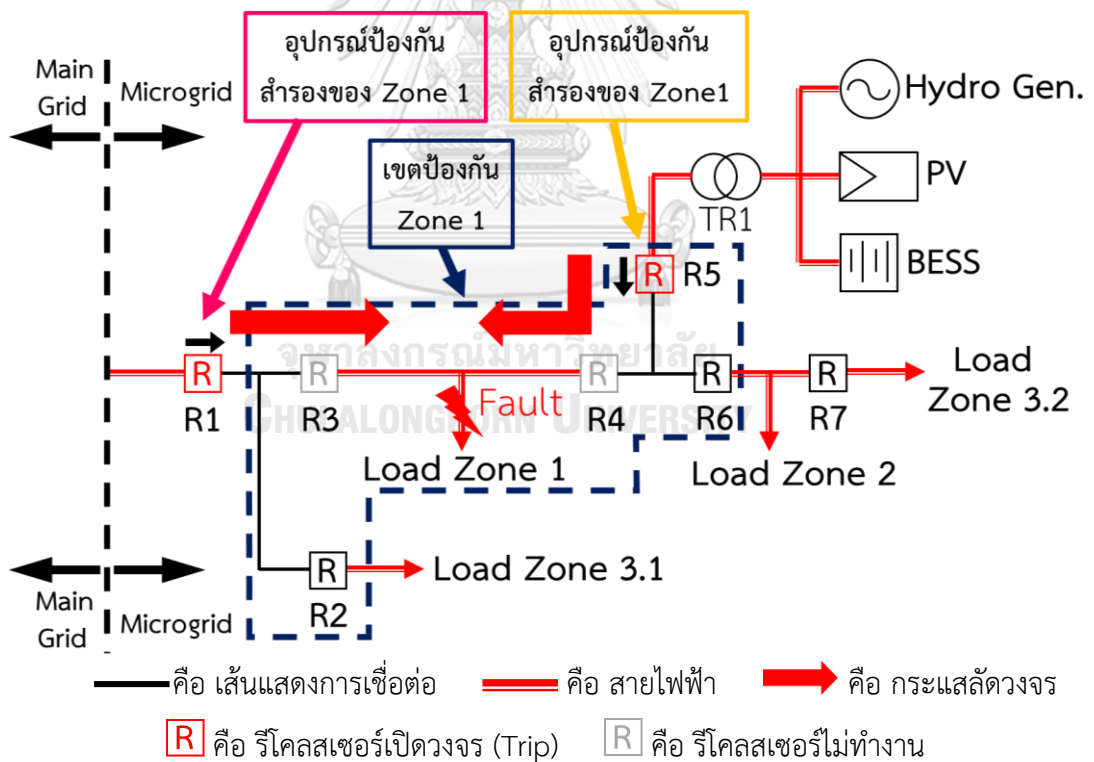
รูปที่ 3.11 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 2 เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก



รูปที่ 3.12 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone DER เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก



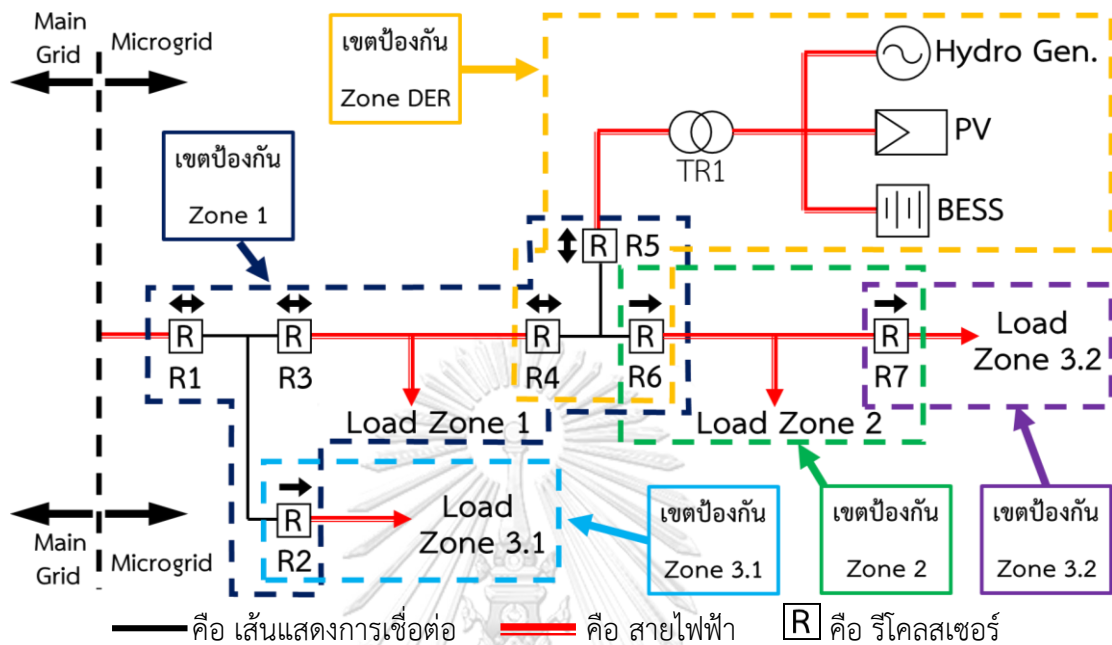
รูปที่ 3.13 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 3.1 เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก



รูปที่ 3.14 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 1 เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

จากการพิจารณากำหนดเขตป้องกันแบบปฐมภูมิและการป้องกันสำรองของไมโครกริดบ้านขุนแปะเมื่อทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก สามารถสรุปตำแหน่งติดตั้งพร้อมทิศทาง

ทำงานของรีโกลสเซอร์ และเขตป้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และเขตป้องกันปฐมภูมิและการป้องกันสำรองดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งติดตั้งพร้อมทิศทางการทำงานรีโกลสเซอร์ และเขตป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

จากรูปที่ 3.15 รีโกลสเซอร์ R1, R3, R4 และ R5 มีทิศทางการทำงาน 2 ทิศทาง จึงกำหนดสัญลักษณ์แทนทิศทางการทำงาน เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าปรับตั้งในบทต่อไป ดังนี้

- R1 ➡ คือ รีโกลสเซอร์ R1 ที่ทำงานตรวจจับกระแสลัดวงจรในทิศทางที่ผ่านรีโกลสเซอร์ R1 ไปยังเขตป้องกัน Zone 1 และเขตป้องกัน Zone 3.1

- R1 ⬅ คือ รีโกลสเซอร์ R1 ที่ทำงานตรวจจับกระแสลัดวงจรในทิศทางที่ผ่านรีโกลสเซอร์ R1 ไปยังระบบไฟฟ้าหลัก

- R3 ➡ คือ รีโกลสเซอร์ R3 ที่ทำงานตรวจจับกระแสลัดวงจรในทิศทางที่ผ่านรีโกลสเซอร์ R3 ไปยังพื้นที่ Zone 1

- R3 ⬅ คือ รีโกลสเซอร์ R3 ที่ทำงานตรวจจับกระแสลัดวงจรในทิศทางที่ผ่านรีโกลสเซอร์ R3 ไปยังรีโกลสเซอร์ R1 และเขตป้องกัน Zone 3.1

- R4 ➡ คือ รีโกลสเซอร์ R4 ที่ทำงานตรวจจับกระแสลัดวงจรในทิศทางที่ผ่านรีโกลสเซอร์ R4 ไปยังเขตป้องกัน Zone 2 และเขตป้องกัน Zone DER

- R4 ◀ คือ รีโคลสเซอร์ R4 ที่ทำงานตรวจจับกระแสลัดวงจรในทิศทางที่ผ่าน รีโคลสเซอร์ R4 ไปยังพื้นที่ Zone 1

- R5 ▶ คือ รีโคลสเซอร์ R5 ที่ทำงานตรวจจับกระแสลัดวงจรในทิศทางที่ผ่าน รีโคลสเซอร์ R5 ไปยังเขตป้องกัน Zone 1 และเขตป้องกัน Zone 2

- R5 ◀ คือ รีโคลสเซอร์ R5 ที่ทำงานตรวจจับกระแสลัดวงจรในทิศทางที่ผ่าน รีโคลสเซอร์ R5 ไปยังแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (DER)

ตารางที่ 3.1 สรุปการทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ใช้สำหรับเขตป้องกันแบบปฐมภูมิ และการป้องกันสำรองของไมโครกริดบ้านชุมชนแปะ เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

Zone of protection	Primary protection recloser	Backup protection recloser
Zone 1	R3 ,R4	R1 ,R5
Zone 2	R6	R4 ,R5
Zone 3.1	R2	R1 ,R3
Zone 3.2	R7	R6
Zone DER	R5	R4

3.2.2.2 การพิจารณากำหนดเขตป้องกันสำหรับไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดด

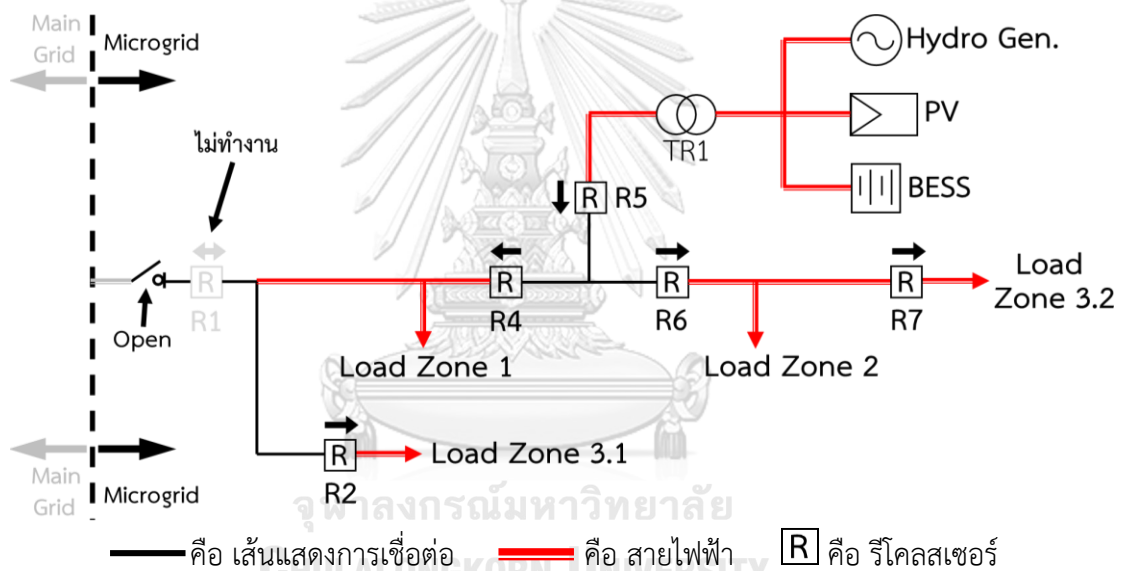
1) การพิจารณากำหนดเขตป้องกันปฐมภูมิ

เขตป้องกันปฐมภูมิจะทำงานกำจัดความผิดพลาดเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ และแยกเฉพาะส่วนที่เกิดความผิดพลาดออกจากระบบไฟฟ้า โดยเขตป้องกันแบบปฐมภูมิจะต้องมีการติดตั้งรีโคลสเซอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำหรับเขตป้องกันนั้นๆ โดยการเลือกตำแหน่งติดตั้งมีหลักการพิจารณา คือ 1) สามารถป้องกันกลุ่มโหลดภายในเขตป้องกันได้ทั้งหมด และ 2) สามารถแยกเฉพาะเขตป้องกันที่เกิดความผิดพลาดออกจากระบบไฟฟ้าเพื่อให้ส่วนอื่นยังสามารถทำงานได้ตามปกติ จาก การพิจารณากำหนดเขตป้องกันสำหรับไมโครกริดเมื่อทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักในหัวข้อ 3.2.2.1 ได้มีการจัดทำเขตป้องกันปฐมภูมิตามกลุ่มโหลดที่ได้แบ่งไว้ทั้ง 4 โซน และรีโคลสเซอร์สามารถแยกเฉพาะพื้นที่ที่เกิดความผิดพลาดได้ จึงสามารถนำตำแหน่งติดตั้ง และทิศทางการทำงานของรีโคลสเซอร์มากำหนดเป็นเขตการป้องกันปฐมภูมิเมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดดได้ แต่จะมีข้อที่แตกต่างดังนี้

- 1) ไม่เขตป้องกัน Zone DER เนื่องจากไม่ได้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักทำให้เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในพื้นที่จึงไม่มีกระแสลัดวงจรไหลเข้าไปในพื้นที่
- 2) รีโกลสเซอร์ R1 ตั้งค่าให้ไม่ทำงานเนื่องจากไม่ได้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักจึงไม่มีกระแสไหลผ่าน
- 3) รีโกลสเซอร์ R3 จะไม่ทำงานเนื่องจากรีโกลสเซอร์ R4 สามารถแยกพื้นที่ Zone 1 ออกจากระบบไมโครกริดได้แล้ว

เมื่อพิจารณาข้อแตกต่างจากการกำหนดเขตป้องกันสำหรับไมโครกริดเมื่อทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักแล้ว สามารถสรุปตำแหน่งติดตั้ง และทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ทั้งหมดจากการกำหนดเขตป้องกันปฐมภูมิ ในกรณีไมโครกริดทำงานแบบแยกโดดดังแสดงในรูปที่

3.16



รูปที่ 3.16 ตำแหน่งติดตั้ง และทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ทั้งหมดจากการกำหนดเขตป้องกันปฐมภูมิ ในกรณีไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

2) การพิจารณากำหนดการป้องกันสำรอง

การป้องกันสำรองจะอยู่ถัดออกมาจากเขตป้องกันปฐมภูมิซึ่งจะทำงานในกรณีที่เขตป้องกันปฐมภูมิไม่ทำงาน เพื่อทำการกำจัดความผิดปกติแทน โดยการพิจารณากำหนดการป้องกันสำรองมีหลักการเบื้องต้น ดังนี้

- 1) การป้องกันสำรองจะอยู่ที่อยู่ถัดออกมาจากเขตป้องกันที่เกิดความผิดปกติ
- 2) พิจารณาจากกำหนดการป้องกันสำรองจากเขตป้องกันที่อยู่ปลายสายส่งก่อน และไล่พิจารณาเขตป้องกันที่อยู่ถัดเข้ามาเป็นลำดับต่อไปจนครบทุกเขตป้องกัน

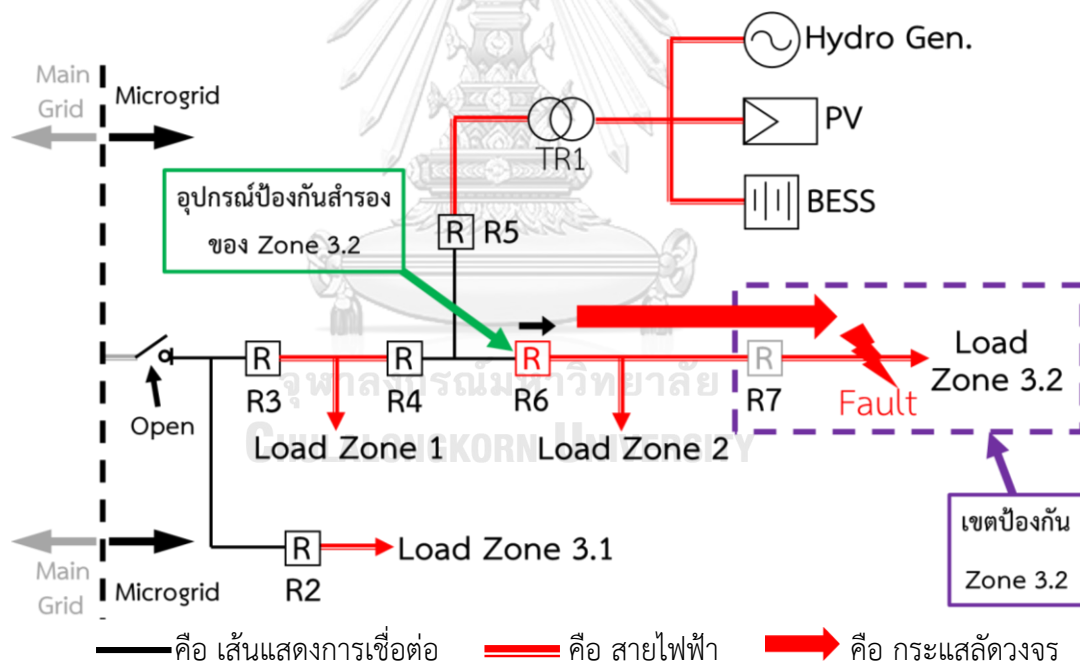
จากหลักการกำหนดการป้องกันสำรองเบื้องต้นจึงสามารถกำหนดการป้องกันสำรองสำหรับไมโครกริดบ้านชุมชนแปะเมื่อทำงานแบบแยกโดดได้ ดังนี้

- การป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 3.2 กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R6 เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง ดังแสดงหลักการพิจารณาในรูปที่ 3.17

- การป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 2 กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R5 เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง ดังแสดงหลักการพิจารณาในรูปที่ 3.18

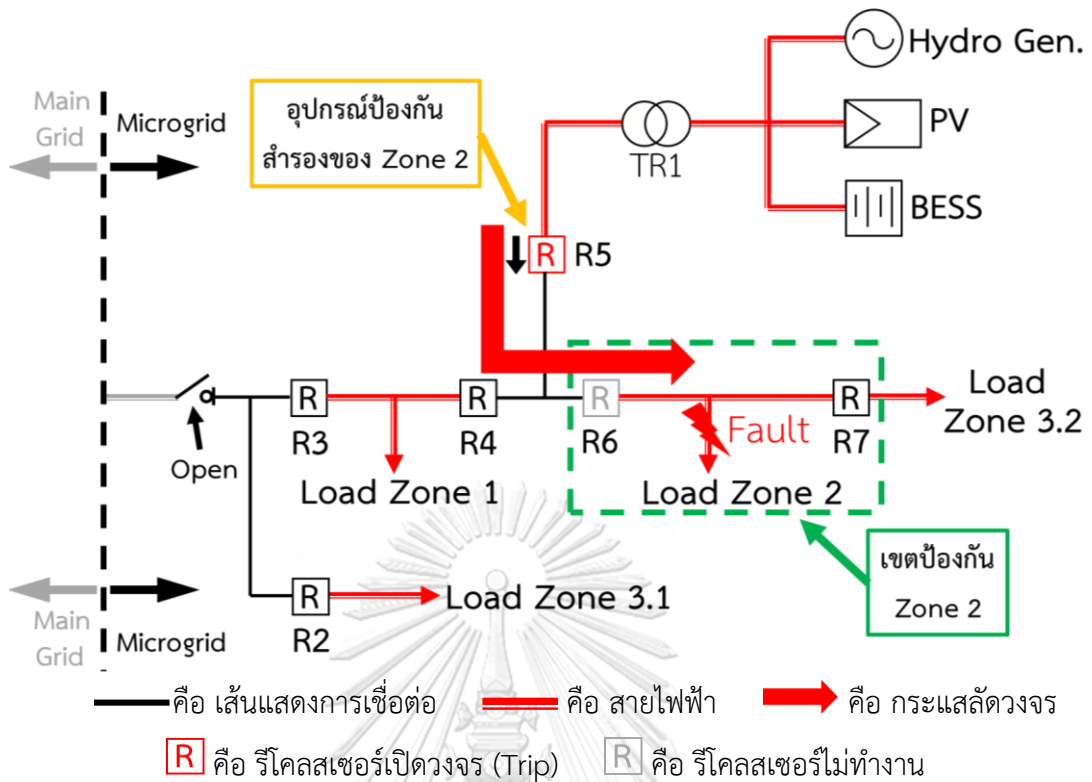
- เขตป้องกัน Zone 3.1 กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R3 เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง ดังแสดงหลักการพิจารณาในรูปที่ 3.19 และการกำหนดเขตป้องกันปฐมภูมิไม่ได้กำหนดการใช้งานรีโกลสเซอร์ R3 ไว้ จึงให้ทำงานเป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง โดยมีทิศทางการทำงานตรวจจับกระแสที่ไหลไปยัง Zone 3.1

- เขตป้องกัน Zone 1 กำหนดให้รีโกลสเซอร์ R5 เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง ดังแสดงหลักการพิจารณาในรูปที่ 3.20

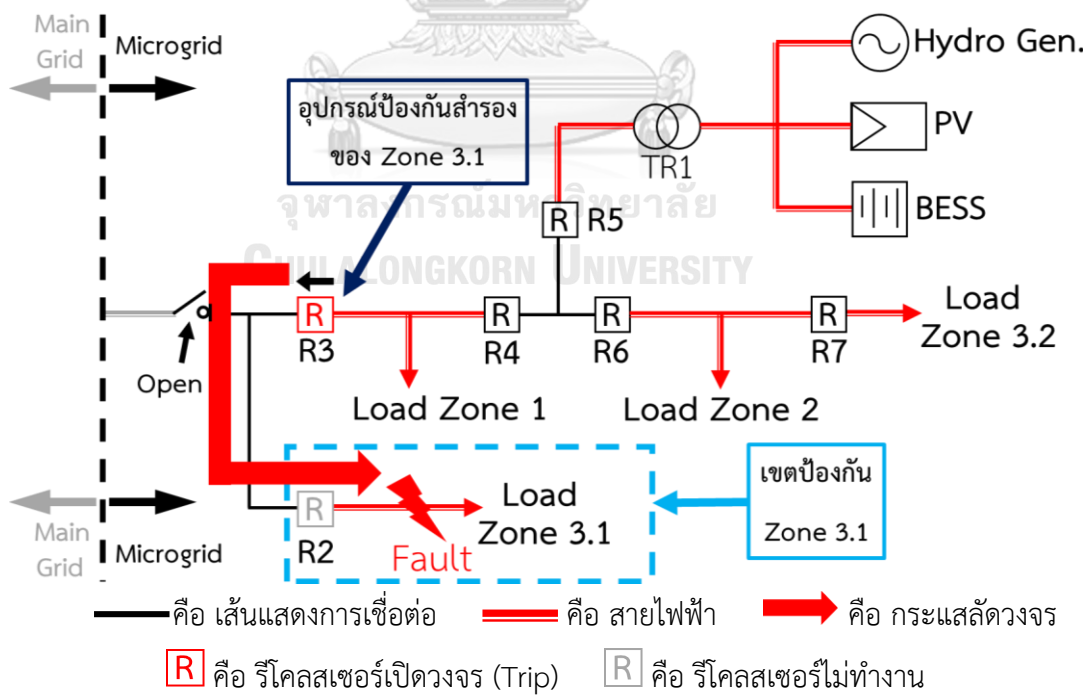


[R] คือ รีโกลสเซอร์เปิดวงจร (Trip) **[R]** คือ รีโกลสเซอร์ไม่ทำงาน

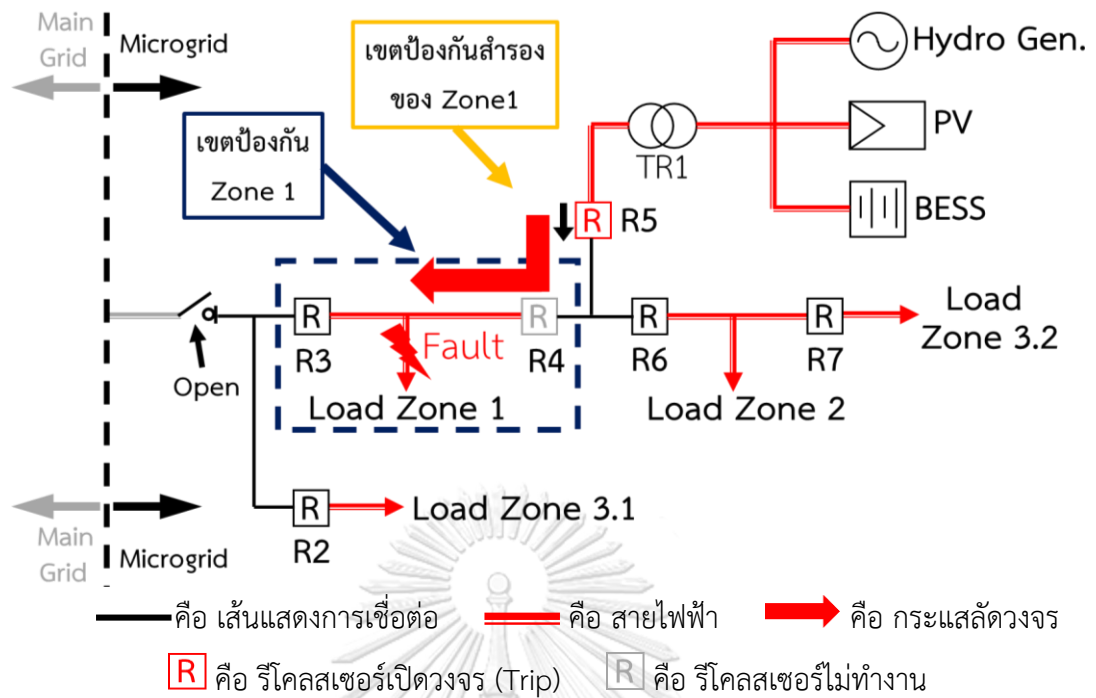
รูปที่ 3.17 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 3.2 เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด



รูปที่ 3.18 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 2 เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

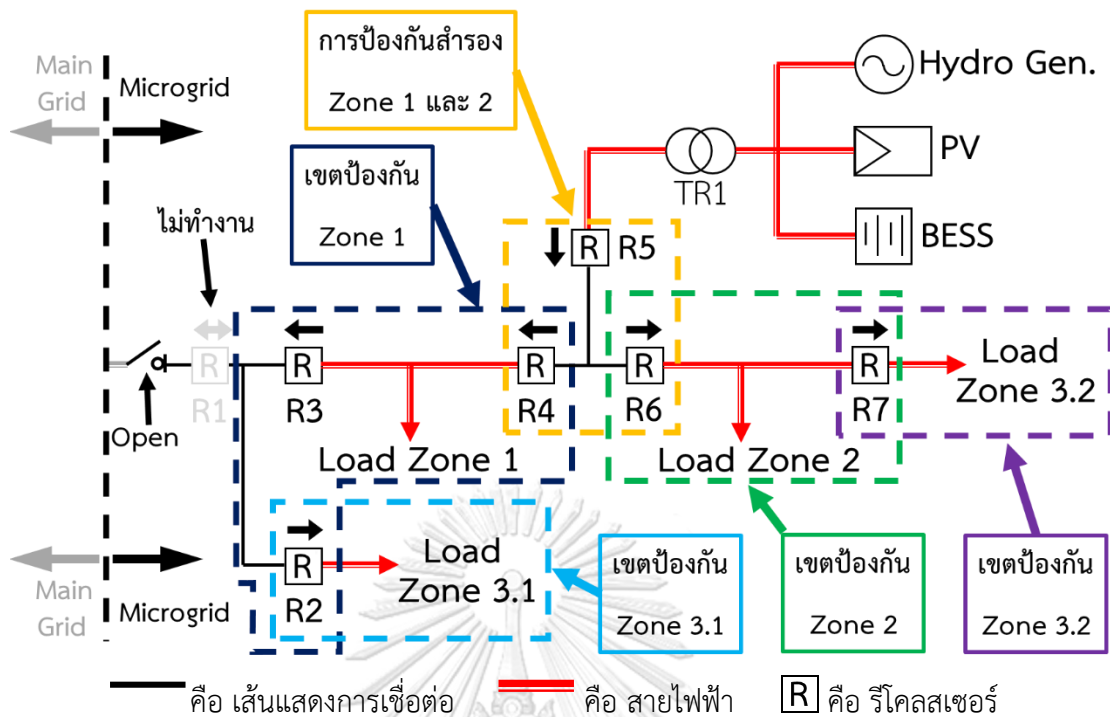


รูปที่ 3.19 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 3.1 เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด



รูปที่ 3.20 การพิจารณาการป้องกันสำรองของเขตป้องกัน Zone 1 เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

จากการพิจารณากำหนดเขตป้องกันแบบปฐมภูมิและการป้องกันสำรองของไมโครกริดบ้านชุมชนแปะเมื่อทำงานแบบแยกโดด สามารถสรุปตำแหน่งติดตั้งพร้อมทิศทางการทำงานของรีโคสเซอร์ และเขตการป้องกันเมื่อทำงานระบบไมโครกริดทำงานแบบแยกโดดดังแสดงในรูปที่ 3.21 และเขตป้องกันปฐมภูมิและการป้องกันสำรองสรุปดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.21 ตำแหน่งติดตั้งพร้อมทิศทางการทำงานของรีโคลสเซอร์ และเขตป้องกันเมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

ตารางที่ 3.2 สรุปการทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ใช้สำหรับเขตป้องกันแบบปฐมภูมิ และการป้องกันสำรองของไมโครกริดบ้านขุนแปะ เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

Recloser	Primary Protection	Backup protection
Zone 1	R4	R5
Zone 2	R6	R5
Zone 3.1	R2	R3
Zone 3.2	R7	R6

วิทยานิพนธ์ในบทนี้เสนอวิธีการพิจารณาเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกัน ตำแหน่งการติดตั้ง และการกำหนดเขตป้องกัน ทำให้สามารถแยกเฉพาะพื้นที่ๆเกิดความผิดปกติพร้อมขึ้นได้ และลดปัญหาไฟดับจากการเกิดความผิดปกติแบบชั่วคราว ส่งผลให้ระบบไมโครกริดมีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นซึ่งอุปกรณ์ป้องกันจะทำงานได้ถูกต้องจะต้องมีการตั้งค่าให้เหมาะสมกับรูปแบบการทำงานของไมโครกริด ซึ่งการหาค่าปรับตั้งจะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 4

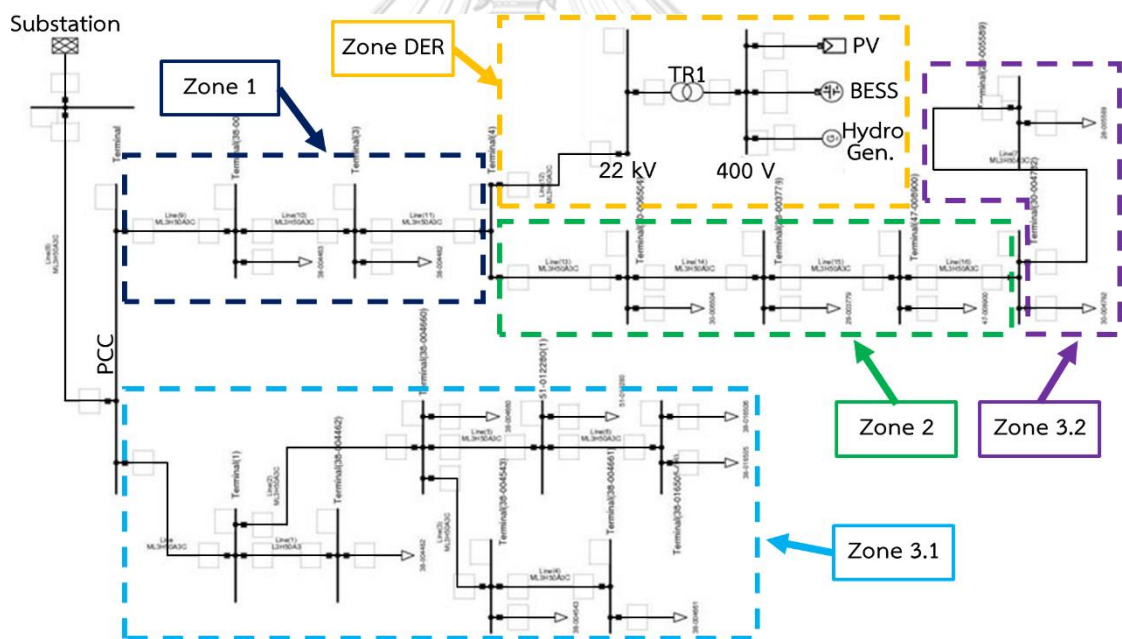
การปรับตั้งค่าระบบป้องกันทางไฟฟ้า

เมื่อเลือกชนิดอุปกรณ์ป้องกัน ตำแหน่งติดตั้ง และกำหนดเขตการป้องกันเรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานได้อย่างถูกต้องตามรูปแบบการทำงานของไมโครกริดเพื่อลดปัญหาการเกิดไฟดับ

4.1 การวิเคราะห์หาค่ากระแสลัดวงจร

4.1.1 แบบจำลอง และข้อมูลรายละเอียดของอุปกรณ์ภายในระบบไมโครกริด

การวิเคราะห์หาค่ากระแสลัดวงจรในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม DigSILENT Powerfactory โดยนำแบบจำลองระบบไฟฟ้าไมโครกริดบ้านขุนแปะ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 นำมาวิเคราะห์หาค่ากระแสลัดวงจรด้วยวิธีตามมาตรฐาน IEC60909 (2001) โดยข้อมูลรายละเอียดของอุปกรณ์ไฟฟ้าในแบบจำลองมีดังนี้



รูปที่ 4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าไมโครกริดบ้านขุนแปะ

1) หม้อแปลงไฟฟ้า (TR1)

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้า

Parameter	TR1	Parameter	TR1
No. of Winding	2	Connection	YNd1
Power (MVA)	1.5	f (Hz)	50
Voltage (kV)	22/0.4	Z	5%

2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ (แบบซิงโครนัส)

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ

Parameter	Hydro Gen.	Parameter	Hydro Gen.
Power (kVA)	125	T'd / T''d (s)	0.087 / 0.006
Voltage (kV)	0.4	X/R Ratio	8
p.f.	0.8	X0 / X2	0.023 / 0.107
Xd / Xd' / Xd'' (p.u.)	2.8 / 0.205 / 0.101	Xq / Xq'' (p.u.)	1.55 / 0.113

3) ค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าด้านกระแสสลับของอินเวอร์เตอร์

ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (BESS) และระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวจากอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้าผ่านทางอุปกรณ์แปลงผันกำลังแบบสถิต (Static Power Converters) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ $202 A_{rms}$ และค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานจากแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ $183 A_{rms}$ แต่เนื่องจากอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีฟังก์ชันการจำกัดกระแส เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์จึงจ่ายกระแสลัดวงจรที่ 1.5 เท่าของกระแสพิกัด [13] ดังนั้นจึงตั้งค่าอินเวอร์เตอร์จ่ายค่ากระแสลัดวงจรดังนี้

- ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (BESS) จ่ายกระแสลัดวงจรเท่ากับ $303 A_{rms}$

- ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) จ่ายกระแสลัดวงจรเท่ากับ $274 A_{rms}$

4) สายส่งระบบจำหน่าย (SAC คือ Space Aerial Cable)

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลสายส่ง

Line Type	Cross-sectional Area (mm ²)	Positive Sequence Impedance (Ω /km)		Negative Sequence Impedance (Ω /km)	
		R	X	R0	X0
SAC	50	0.640337	0.45451	0.82197	1.669577

ตารางที่ 4.4 ระยะสายส่งในระบบจำหน่าย

From	To	Distance (km)	From	To	Distance (km)
Sub.	PCC	35	PCC	Zone 3.1	0.2
PCC	Zone 1	0	PCC	Zone 3.2	6.67
PCC	Zone 2	3.27	PCC	DER	3.86

4.1.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์หากระแสลัดวงจร

การวิเคราะห์หากระแสลัดวงจรเพื่อนำค่ากระแสลัดวงจรต่ำที่สุด และสูงที่สุดที่ไหลผ่านรีโกลสเซอร์แต่ละตัวไปผ่านกระบวนการหาค่าปรับตั้งที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรจะใช้โปรแกรม DigSILENT Powerfactory โดยแยกวิเคราะห์กระแสลัดวงจรตามรูปแบบการทำงานของไมโครกริด ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลกระแสลัดวงจรเป็น 2 กลุ่ม ขั้นตอนการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรมีรายละเอียดดังนี้

1) ตั้งค่ามาตรฐานการลัดวงจรในโปรแกรม DigSILENT Powerfactory

- วิเคราะห์การลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC60909 (2001) [14]

- C-voltage factor = 1 [14]

- จำลองความผิดปกติ 2 ชนิด คือ Three-Phase Fault และ Single Line to Ground Fault

- ไม่คิดค่าความต้านทานของจุดผิดปกติ (Fault Resistance)

2) เลือกรีโกลสเซอร์เพื่อหากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน

3) จำลองความผิดพลาด 2 ชนิด คือ Three-Phase Fault และ Single Line to Ground Fault โดยจำลองความผิดพลาดให้เกิดขึ้นในจุดที่ใกล้และไกลจากรีโคลสเซอร์ตัวที่เลือกไว้ และบันทึกค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดจากความผิดพลาดทั้ง 2 ชนิด

4) นำข้อมูลกระแสลัดวงจรมาสรุปเป็นกระแสลัดวงจรด้านเฟส (Phase fault current) และกระแสลัดวงจรด้านกราวด์ (Ground fault current) โดยแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

- กระแสลัดวงจรด้านเฟส พิจารณาจากกระแสลัดวงจรที่เกิดจากความผิดพลาดทั้ง 2 ชนิด โดยนำค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด และต่ำที่สุดมาสรุปเป็นกระแสลัดวงจรด้านเฟส

- กระแสลัดวงจรด้านกราวด์ พิจารณาจากกระแสลัดวงจรที่เกิดจากความผิดพลาดชนิด Single Line to Ground Fault เท่านั้น โดยนำค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด และต่ำที่สุดมาสรุปเป็นกระแสลัดวงจรด้านกราวด์

5) ทำการวิเคราะห์หากระแสลัดวงจรที่ผ่านรีโคลสเซอร์จนครบจำนวนทั้งหมด

จากการวิเคราะห์หากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านรีโคลสเซอร์แต่ละตัวจึงสามารถนำข้อมูลมาสรุปเป็นค่าสูงสุดและต่ำที่สุดของกระแสลัดวงจรด้านเฟส และกระแสลัดวงจรด้านกราวด์ โดยข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรด้านเฟส และข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรด้านกราวด์เมื่อไม่โครกริตทำงานในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ และข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรด้านเฟส และข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรด้านกราวด์เมื่อไม่โครกริตทำงานในรูปแบบแยกโดดแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ค่ากระแสลัดวงจรด้านเฟสที่ไหลผ่านรีโคลสเซอร์ กรณีไม่โครกริตทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

R	Min. Fault (A)	Max. Fault (A)	R	Min. Fault (A)	Max. Fault (A)
1 →	117	423	-	-	-
2	421	569	-	-	-
3 →	117	420	3 ←	37	186
4 →	117	393	4 ←	37	195
5 →	36	199	5 ←	117	390
6	375	564	-	-	-
7	375	465	-	-	-

หมายเหตุ สัญลักษณ์ลูกศรด้านหลังรีโคลสเซอร์ 1, 3, 4 และ 5 คือ ทิศทางการทำงานของรีโคลสเซอร์ ตามรายละเอียดในรูปที่ 3.15

ตารางที่ 4.6 ค่ากระแสลัดวงจรด้านกราวด์ที่ไหลผ่านรีโคลสเซอร์ กรณีไม่โครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

R	Min. Fault (A)	Max. Fault (A)	R	Min. Fault (A)	Max. Fault (A)
1 →	117	388	-	-	-
2	496	569	-	-	-
3 →	117	387	3 ←	163	186
4 →	117	374	4 ←	163	195
5 →	160	199	5 ←	117	372
6	451	564	-	-	-
7	451	465	-	-	-

หมายเหตุ สัญลักษณ์ลูกศรด้านหลังรีโคลสเซอร์ 1, 3, 4 และ 5 คือ ทิศทางการทำงานของรีโคลสเซอร์ ตามรายละเอียดในรูปที่ 3.15

ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสลัดวงจรด้านเฟสที่ไหลผ่านรีโคลสเซอร์ กรณีไม่โครกริดทำงานแบบแยกโดด

R	Min. Fault (A)	Max. Fault (A)
2	40	59
3 ←	40	59
4 ←	40	59
5 →	40	59
6	40	59
7	40	58

หมายเหตุ สัญลักษณ์ลูกศรด้านหลังรีโคลสเซอร์ 3, 4 และ 5 คือ ทิศทางการทำงานของรีโคลสเซอร์ ตามรายละเอียดในรูปที่ 3.21

ตารางที่ 4.8 ค่ากระแสลัดวงจรด้านกราวด์ที่ไหลผ่านรีโคลาสเซอร์ กรณีไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

R	Min.	Max. Fault (A)
2	58	59
3 ←	58	59
4 ←	58	59
5 →	58	59
6	58	59
7	58	58

หมายเหตุ สัญลักษณ์ลูกศรด้านหลังรีโคลาสเซอร์ 3, 4 และ 5 คือ ทิศทางการทำงานของรีโคลาสเซอร์ ตามรายละเอียดในรูปที่ 3.21

4.2 การปรับตั้งค่ารีโคลาสเซอร์

การปรับตั้งค่ารีโคลาสเซอร์จะใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านรีโคลาสเซอร์แต่ละตัวที่ได้จากหัวข้อที่ 4.1 มาผ่านกระบวนการหาค่าปรับตั้ง เพื่อให้ได้ค่าปรับตั้งที่เหมาะสมกับรีโคลาสเซอร์แต่ละตัว

4.2.1 ขั้นตอนการปรับตั้งค่ารีโคลาสเซอร์

การปรับตั้งค่ารีโคลาสเซอร์จะเริ่มจากการตั้งค่าเกี่ยวกับจำนวนครั้งการทำงานและเวลาในการปิดกลับของรีโคลาสเซอร์ซึ่งรีโคลาสเซอร์ทุกตัวในไมโครกริดจะตั้งค่าเหมือนกันทั้งหมด โดยการตั้งค่าจะยึดตามมาตรฐานการป้องกันระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [15] และการทำงานของรีโคลาสเซอร์ทั้ง 2 ครั้ง จะตั้งค่าให้ทำงานตามกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาแบบเดียวกันทั้ง 2 ครั้ง รายละเอียดจำนวนครั้งการทำงานและเวลาการปิดกลับมีค่าดังนี้ (ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นิยามตามภาคผนวก ข)

- จำนวนครั้งทำงาน : 2 ครั้ง
- Dead Time 1 : 0.5 วินาที
- Dead Time 2 : 15 วินาที
- Reclaim Time : 50 วินาที

ขั้นตอนต่อมาเป็นกระบวนการหาค่าปรับตั้งสำหรับรีโคลาสเซอร์ โดยที่รีโคลาสเซอร์ในระบบไมโครกริดจะต้องทำงานประสานสอดคล้องกันตามลำดับการทำงานก่อนหรือหลังให้ถูกต้องตามหลักการประสานการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (ภาคผนวก ก) ซึ่งมีหลักพิจารณา ดังนี้

1) รีโกลสเซอร์ของเขตป้องกันที่เกิดความผิดปกติจะต้องทำงานก่อนเป็นลำดับแรกเพื่อแยกส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้า ส่วนรีโกลสเซอร์ที่อยู่ถัดออกมาที่ทำหน้าที่เป็นเขตป้องกันสำรองจะมีเวลาการทำงานที่ช้ากว่ารีโกลสเซอร์ของเขตการป้องกันที่เกิดความผิดปกติตามหลักการประสานการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

2) เวลาการทำงานของรีโกลสเซอร์ของเขตการป้องกันที่เป็นปลายสายของระบบจำหน่ายจะทำงานเร็วที่สุด และไล่เรียงลำดับเวลาการทำงานตามหลักประสานสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

กระบวนการหาค่าปรับตั้งสำหรับรีโกลสเซอร์จะแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ ค่าปรับตั้งสำหรับการทำงานของระบบไมโครกริดแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก 1 กลุ่ม และแบบแยกโดดอีก 1 กลุ่ม เพื่อให้รีโกลสเซอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามรูปแบบการทำงานของไมโครกริด โดยแต่ละกลุ่มจะมีการตั้งค่ารีโกลสเซอร์ให้ทำงานป้องกันทั้งด้านเฟสและด้านกราวด์ โดยมีหลักการสำคัญ คือ รีโกลสเซอร์จะต้องไม่ทำงานที่ระดับกระแสไหลตกติ และต้องทำงานที่ค่ากระแสน้อยกว่าหรือเท่ากับค่ากระแสลัดวงจรต่ำที่สุด ซึ่งกระบวนการหาค่าปรับตั้งของทั้ง 2 กลุ่มจะใช้หลักการเดียวกัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเวลาทำงาน (Operating Time) ของรีโกลสเซอร์แต่ละตัวในระบบไมโครกริด โดยเขตป้องกันที่อยู่ปลายสายของระบบจำหน่ายให้กำหนดเวลาทำงานของรีโกลสเซอร์ในเขตป้องกันนั้นให้ทำงานเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ คือ 0.02 วินาที และรีโกลสเซอร์ที่อยู่ถัดออกมาที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรองให้หวั่นเวลาระหว่างอุปกรณ์ (Grading Margin) ที่ 0.3 วินาที เพื่อให้มีการทำงานประสานกันของรีโกลสเซอร์ โดยเวลาทำงานของรีโกลสเซอร์ทั้งด้านเฟสและกราวด์จะเท่ากัน

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่ากระแสเริ่มทำงาน (I_{pickup}) โดยค่ากระแสเริ่มทำงาน คือ ค่ากระแสที่ทำให้รีโกลสเซอร์เริ่มทำงานตามกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลา โดยกระแสเริ่มต้นทำงานจะแบ่งเป็นด้านเฟส และด้านกราวด์ โดยมีหลักพิจารณาดังนี้

1) กระแสเริ่มทำงานด้านเฟส

- ค่ากระแสเริ่มทำงานต้องมีค่าสูงกว่าค่ากระแสไหลรวมสูงสุดที่ไหลผ่านรีโกลสเซอร์ตัวนั้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้รีโกลสเซอร์ทำงานเมื่อระบบไฟฟ้าทำงานปกติ
- ค่ากระแสเริ่มทำงานต้องมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดที่ไหลผ่านรีโกลสเซอร์ตัวนั้นๆ เพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่าเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นรีโกลสเซอร์จะต้องทำงานทุกครั้ง

2) **กระแสเริ่มทำงานด้านกราวด์** กำหนดค่าการทำงานที่ 30% ของกระแสเริ่มทำงานด้านเฟส

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่ากระแสทำงาน (Operating current) โดยค่ากระแสทำงาน คือ ค่ากระแสที่รีโกลสเซอร์ทำงานที่เวลาทำงาน (Operating Time) ที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งจะมากกว่าค่ากระแสเริ่มทำงาน (ขั้นตอนที่ 2) แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสลัดวงจรต่ำสุด โดยการกำหนดค่ากระแสทำงานทั้งด้านเฟสและด้านกราวด์จะใช้ข้อกำหนดเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 4 เลือกรูปแบบกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลา (ภาคผนวก ค) ซึ่งเป็นคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่อยู่ภายในรีโกลสเซอร์ ในกรณีมีรีโกลสเซอร์หลายตัวทำงานร่วมกันให้เลือกรูปแบบกราฟแบบเดียวกันเพื่อให้ง่ายต่อการประสานการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน โดยการเลือกรูปแบบกราฟเส้นโค้งของทั้งด้านเฟสและด้านกราวด์ให้เลือกรูปแบบกราฟเส้นโค้งแบบเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าเวลาปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน (Time Multiplier Setting ;TMS) (ภาคผนวก ค) ซึ่งจะถูกนำไปปรับตั้งค่าให้กับรีโกลสเซอร์ โดยการคำนวณหาค่าเวลาปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันจะใช้ค่ากระแสทำงานในการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบการประสานการทำงานของรีโกลสเซอร์ในระบบไมโครกริด เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์และรูปแบบกราฟเส้นโค้งจากขั้นตอนที่ 1 – 5 แล้ว จึงนำมาเป็นวาดกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโกลสเซอร์ทั้งหมดระบบไมโครกริด โดยแต่ละกลุ่มการตั้งค่าจะแยกเป็นด้านเฟสและด้านกราวด์ เพื่อตรวจสอบการประสานการทำงานว่าถูกต้องหรือไม่ เมื่อตรวจสอบแล้วพบว่าไม่มีการทำงานขัดแย้งกันจึงนำค่าพารามิเตอร์ไปตั้งค่าให้กับรีโกลสเซอร์

4.2.2 การปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

การปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก จะพิจารณาตามขั้นตอนในหัวข้อ 4.2.1 เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับนำไปตั้งค่ารีโกลสเซอร์ โดยการพิจารณาการปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์จะแยกการปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส และทำงานป้องกันด้านกราวด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2.2.1 การปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสเมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

1) เวลาการทำงานของรีโกลสเซอร์ เริ่มพิจารณาเวลาการทำงานของรีโกลสเซอร์ของเขตการป้องกันที่อยู่ปลายสายของระบบจำหน่าย คือ เขตการป้องกัน Zone 3.1 และ Zone 3.2 โดยตั้งค่าเวลาการทำงานของรีโกลสเซอร์ที่ 0.02 วินาที ต่อมาพิจารณารีโกลสเซอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเขต

ป้องกันสำรองซึ่งจะอยู่ถัดออกมาโดยตั้งค่าเวลาการทำงานให้หน่วงเพิ่มอีก 0.3 วินาที โดยพิจารณาตั้งค่าเวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์จนครบทุกเขตป้องกัน โดยกระบวนการตั้งค่าเวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์เมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก สรุปเป็นแผนผังดังแสดงในรูปที่ 4.2 และเวลาทำงานของรีโคลสเซอร์ทั้งหมดเมื่อระบบไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักแสดงในรูปที่ 4.3

2) กระแสเริ่มทำงาน (I_{pickup}) กำหนดค่าเป็น 125% ของกระแสโหลดรวมสูงสุดที่ผ่านรีโคลสเซอร์ตัวนั้นๆ ยกเว้นกระแสเริ่มทำงานของรีโคลสเซอร์ R5 ในทิศทางที่ไหลผ่านรีโคลสเซอร์ R5 ไปยังแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกำหนดค่าเป็น 110% ของกระแสพิกัดหม้อแปลง โดยค่ากระแสโหลดรวมที่ไหลผ่านรีโคลสเซอร์แต่ละตัวและค่ากระแสเริ่มทำงานของรีโคลสเซอร์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.9

3) ค่ากระแสทำงาน (Operating current) กำหนดให้มีค่าเป็น 12 เท่าของกระแสเริ่มทำงาน

4) กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลากำหนดเป็นแบบ VI

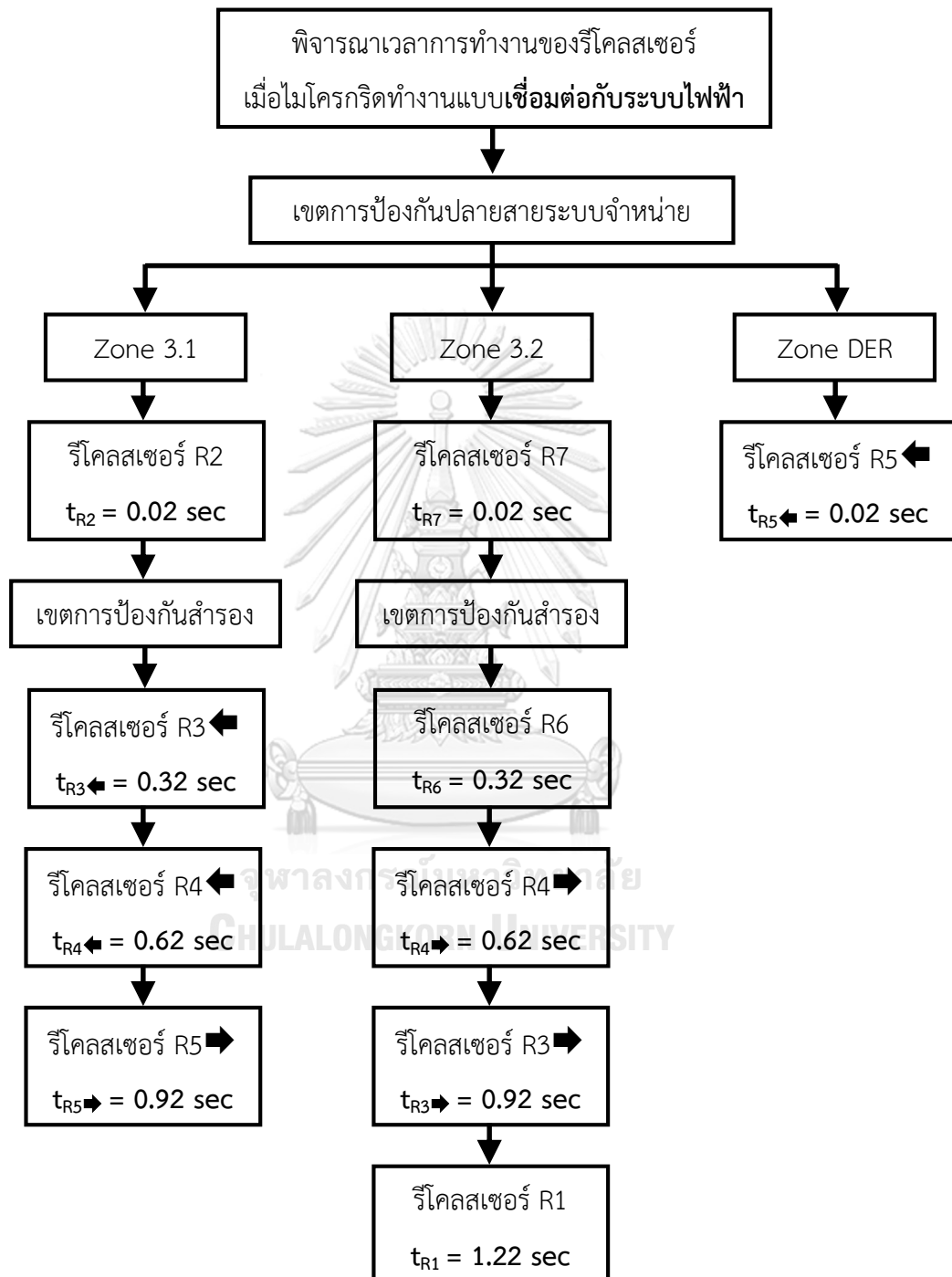
5) ค่าเวลาปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน (TMS) คำนวณจากสูตร ค.1 (ภาคผนวก ค) โดยใช้ข้อมูลจากข้อ 1) – 4) โดยรีโคลสเซอร์สามารถปรับตั้งค่า TMS ได้ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.05 ดังนั้นกรณีที่คำนวณหาค่า TMS ได้ต่ำกว่า 0.05 ให้ปรับไปใช้ค่า 0.05 แทน และคำนวณย้อนกลับหาค่ากระแสทำงานที่ปรับไปใช้ค่า TMS เท่ากับ 0.05 เพื่อนำไปใช้ปรับตั้งค่ารีโคลสเซอร์ต่อไป

6) วาดกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ทั้งหมดระบบไมโครกริด ตามพารามิเตอร์และรูปแบบกราฟเส้นโค้งที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 – 5 เพื่อตรวจสอบการประสานการทำงานของรีโคลสเซอร์ โดยกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ทั้งหมดจะแบ่งเป็น 3 กราฟ ตามเส้นทางของกระแสตัวจริงที่ไปสิ้นสุดใน 3 บริเวณ ซึ่งจะมีทิศทางการทำงานของรีโคลสเซอร์ที่แตกต่างกัน โดยเส้นทางของกระแสตัวจริงที่ไปสิ้นสุดใน 3 บริเวณ คือ เขตป้องกัน Zone 1, Zone 3.1 และ Zone 3.2 ดังแสดงเส้นทางของกระแสตัวจริงและกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาในรูปที่ 4.4

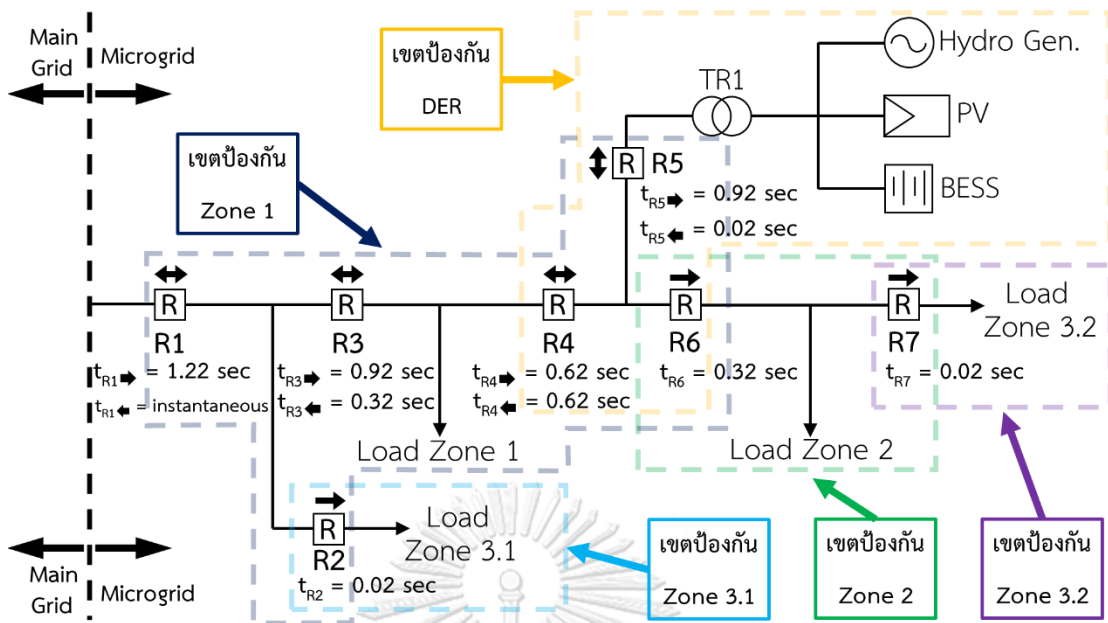
ค่าพารามิเตอร์สำหรับนำไปตั้งค่ารีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสแต่ละตัวในระบบไมโครกริดที่ได้จากกระบวนการตามขั้นตอนที่ 1 – 5 แสดงในตารางที่ 4.10

การปรับตั้งค่ารีโคลสเซอร์ R1 ที่ทำงานในทิศทางตรวจจับกระแสไหลออกไปยังระบบไฟฟ้าหลักจะแยกการตั้งค่ากับการปรับตั้งค่าข้างต้น โดยกำหนดให้ทำงานทันทีที่กระแสถึงค่าที่กำหนดไว้

ซึ่งคิดจากค่ากระแสพิกัดหม้อแปลงหักที่ 40 A ดังนั้นจึงตั้งค่าให้รีโกลสเซอร์ R1 ที่ทำงานในทิศทางตรวจจับกระแสไหลออกไปยังระบบไฟฟ้าหลักทำงานทันทีเมื่อมีกระแสไหลผ่าน 40 A



รูปที่ 4.2 กระบวนการตั้งค่าเวลาการทำงานของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส เมื่อไม่โครกริดทำงานในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก



รูปที่ 4.3 เวลาทำงานของรีโคสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อระบบไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

ตารางที่ 4.9 ค่ากระแสโหลดรวมที่ผ่านรีโคสเซอร์แต่ละตัว และกระแสเริ่มทำงานของรีโคสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

R	$I_{full\ load}$ (A)	I_{pickup} (A)	R	$I_{full\ load}$ (A)	I_{pickup} (A)
1 →	1.82	2.28	-	-	-
2	0.5	0.625	-	-	-
3 →	1.32	1.655	3 ←	0.5	0.625
4 →	1.24	1.555	4 ←	0.58	0.725
5 →	1.82	2.28	5 ←	40	44
6	1.24	1.555	-	-	-
7	0.7	0.875	-	-	-

หมายเหตุ สัญลักษณ์ลูกศรด้านหลังรีโคสเซอร์ 1, 3, 4 และ 5 คือ ทิศทางการทำงานของรีโคสเซอร์ตามรายละเอียดในรูปที่ 3.15

ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส เมื่อไมโครกริดทำงานแบบ
เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

(ก) รีโกลสเซอร์ R1 – 7

R	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม			ค่าปรับตั้งของรีโกลสเซอร์ที่ได้จากการคำนวณ		
	I_{pickup} (A)	Min. Fault (A)	Max. Fault (A)	Operating Current (A)	Operating Time (S)	TMS
1 →	2.28	117	423	27.36	1.22	0.99
2	0.625	421	569	7.5	0.02	0.016
				21.88	← คำนวณย้อนกลับ 0.05	
3 →	1.655	117	420	19.86	0.92	0.75
4 →	1.555	117	393	18.66	0.62	0.51
5 →	2.28	36	199	27.36	0.92	0.75
6	1.555	375	564	18.66	0.32	0.26
7	0.875	375	465	10.5	0.02	0.016
				30.63	← คำนวณย้อนกลับ 0.05	

(ข) รีโกลสเซอร์ R3 – 5 ในทิศทางการทำงานทิศตรงข้ามกับตาราง (ก)

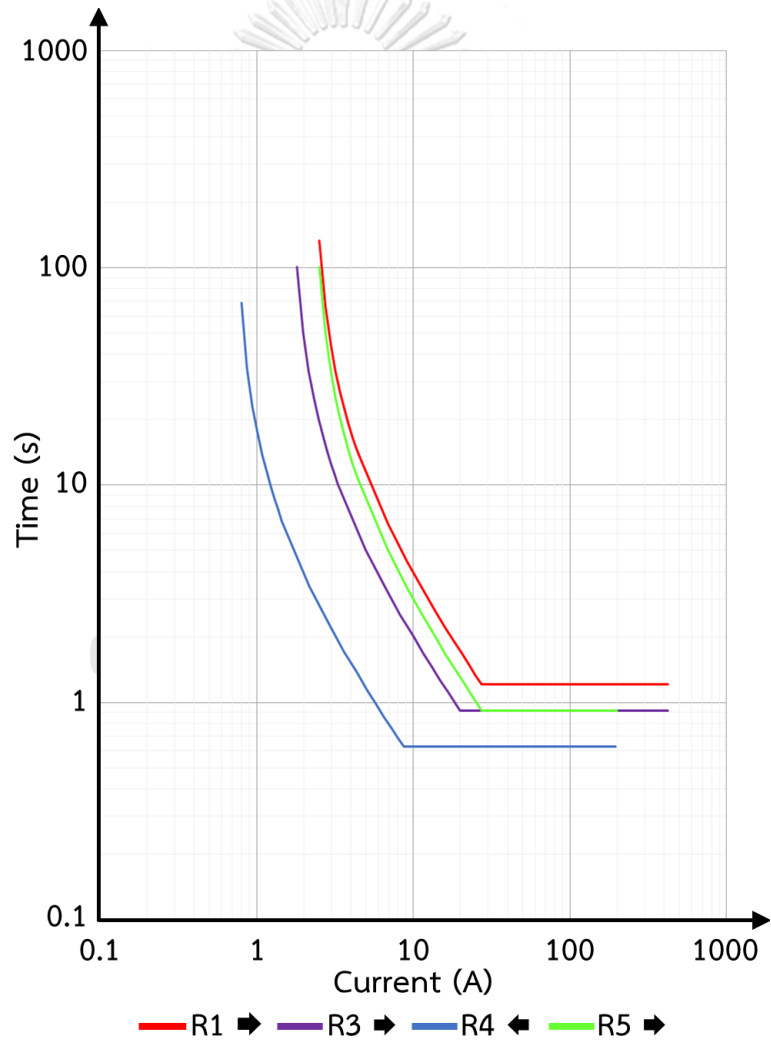
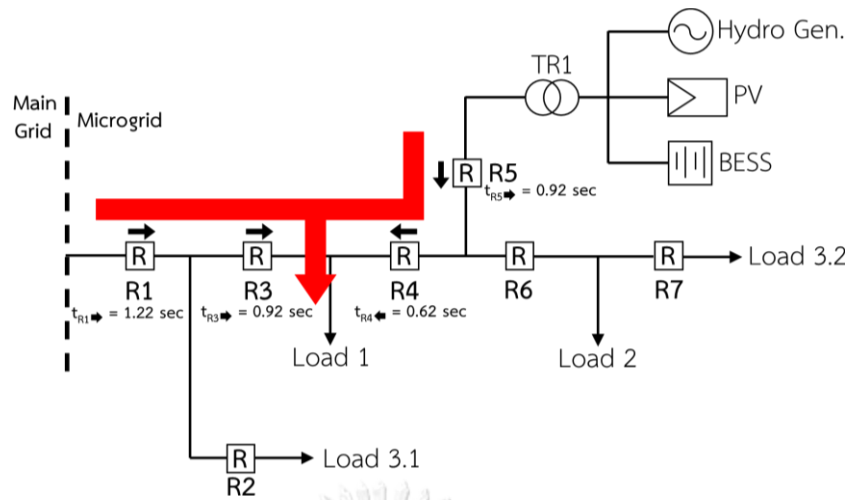
R	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม			ค่าปรับตั้งของรีโกลสเซอร์ที่ได้จากการคำนวณ		
	I_{pickup} (A)	Min. Fault (A)	Max. Fault (A)	Operating Current (A)	Operating Time (S)	TMS
3 ←	0.625	37	186	7.5	0.32	0.26
4 ←	0.725	37	195	8.7	0.62	0.51
5 ←	44	117	390	117	0.02	0.0025
				1529	← คำนวณย้อนกลับ 0.05	

(ค) รีโคลสเซอร์ R1 ในทิศทางกระแสไหลออกระบบไฟฟ้าหลัก

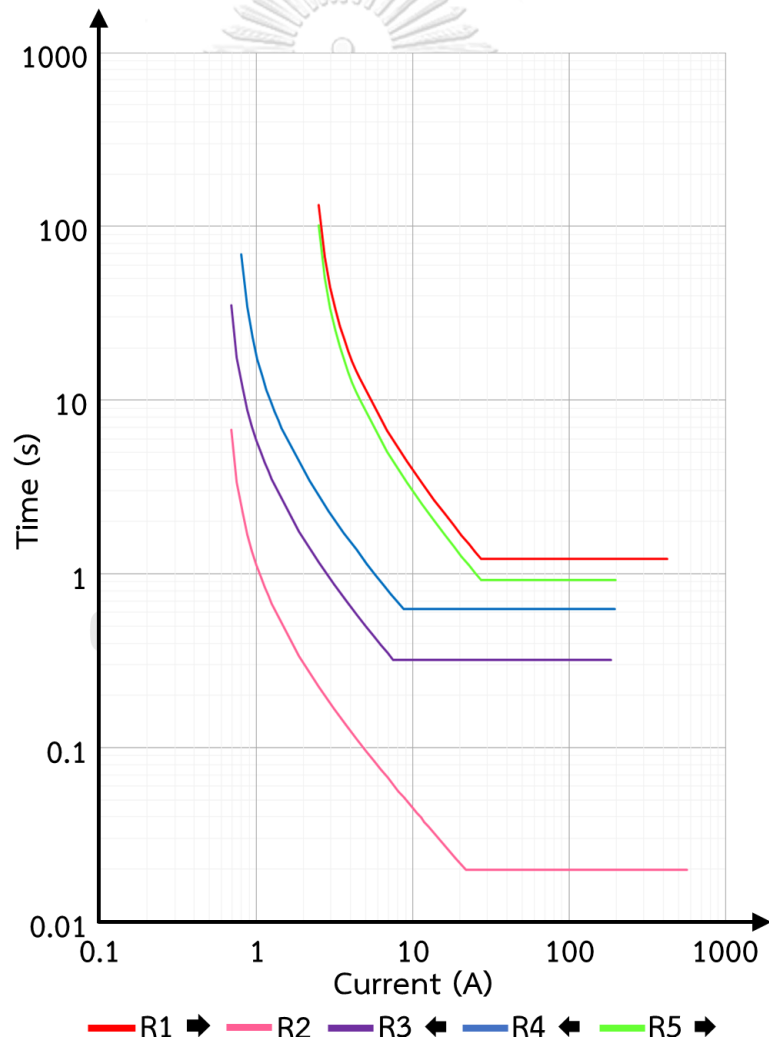
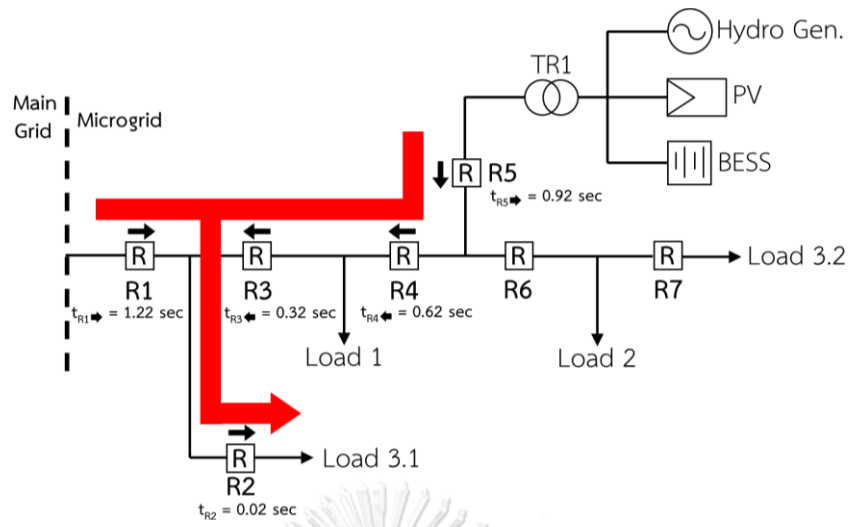
	ค่าปรับตั้งของรีโคลสเซอร์ที่ได้จากการคำนวณ	
R	Operating Current (A)	Operating Time (S)
1 ←	40	Instantaneous (ทันที)

หมายเหตุ ค่า Operating Current ของรีโคลสเซอร์ 5 ← เมื่อใช้ค่า TMS เท่ากับ 0.05 แล้วคำนวณย้อนกลับจะได้ค่า Operating Current เท่ากับ 1529 A แต่ค่าที่คำนวณได้เกินค่ากระแสลัดวงจรต่ำที่สุด จึงใช้ค่าเท่ากับค่ากระแสลัดวงจรต่ำที่สุดที่ 117 A

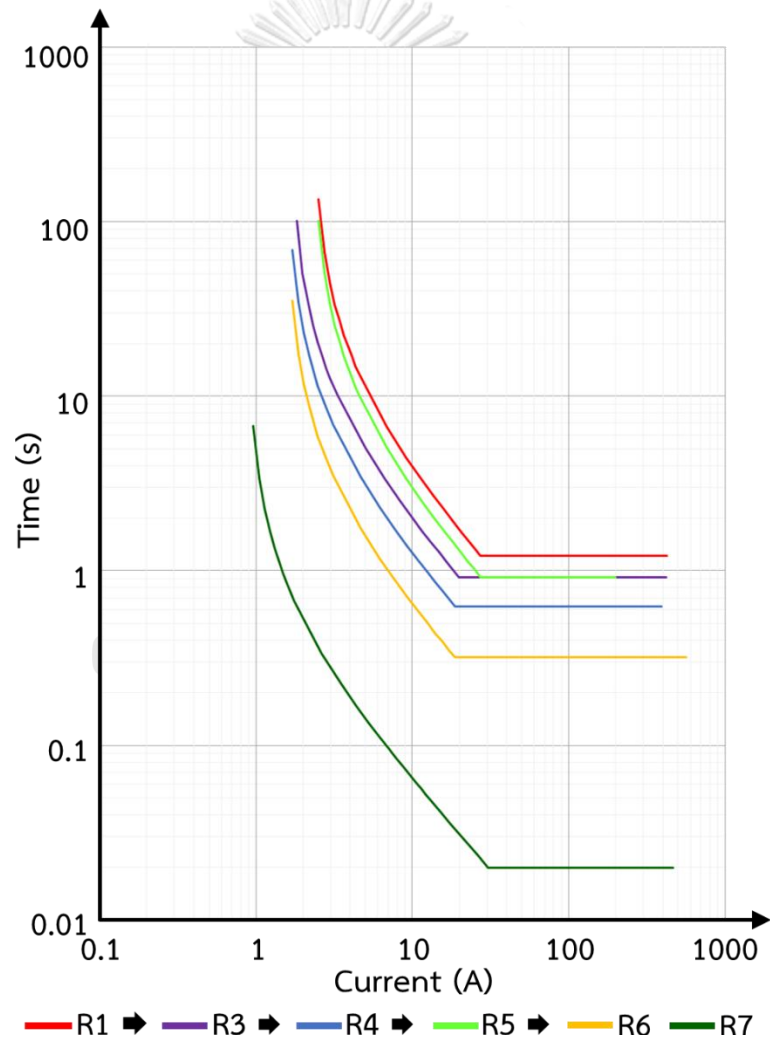
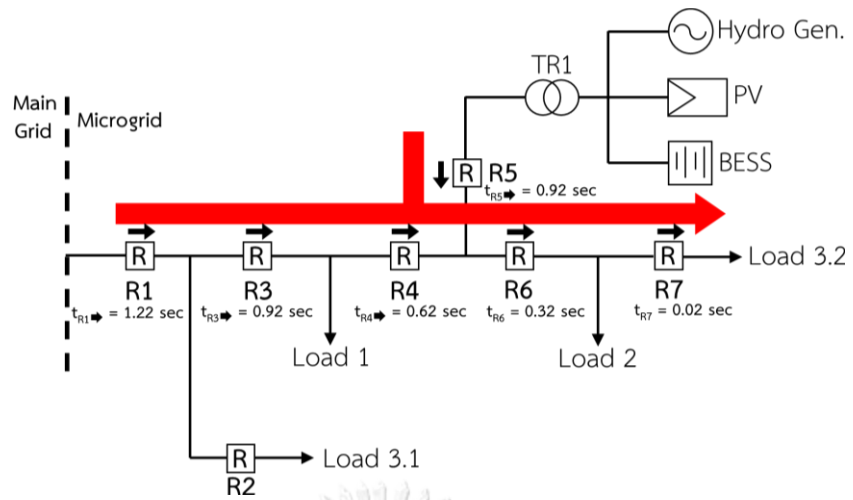
เมื่อตรวจสอบการประสานการทำงานของรีโคลสเซอร์ โดยการวาดกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด จะได้กราฟเส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากการตรวจสอบกราฟเส้นโค้งพบว่า รีโคลสเซอร์ไม่มีการทำงานขัดแย้งกัน จึงสามารถนำค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.10 ไปปรับตั้งค่าการทำงานแบบกลุ่มให้กับรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสเมื่อไม่โครกริตทำงานในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้



(ก) เส้นทางของกระแสตัวจริงที่ไปสิ้นสุดที่เขตการป้องกัน Zone 1



(ข) เส้นทางของกระแสลัดวงจรที่ไปสิ้นสุดที่เขตการป้องกัน Zone 3.1



(ค) เส้นทางของกระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนสุดที่เขตการป้องกัน Zone 3.2

รูปที่ 4.4 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

4.2.2.2 การปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์เมื่อไมโครกริดทำงาน แบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

1) เวลาการทำงานของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ใช้เวลาการทำงานเดียวกับรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส

2) กระแสเริ่มทำงาน (I_{pickup}) กำหนดค่าเท่ากับ 30% ของกระแสเริ่มทำงานด้านเฟส โดยค่ากระแสเริ่มทำงานของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.11

3) ค่ากระแสทำงาน (Operating current) กำหนดให้มีค่าเป็น 12 เท่าของกระแสเริ่มทำงาน

4) กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลา กำหนดเป็นแบบ VI

5) ค่าเวลาปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน (TMS) คำนวณจากสูตร ค.1 (ภาคผนวก ค) โดยใช้ข้อมูลจากข้อ 1) – 4) โดยรีโกลสเซอร์สามารถปรับตั้งค่า TMS ได้ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.05 ดังนั้นกรณีที่คำนวณหาค่า TMS ได้ต่ำกว่า 0.05 ให้ปรับไปใช้ค่า 0.05 แทน และคำนวณย้อนกลับหาค่ากระแสทำงานที่ปรับไปใช้ค่า TMS เท่ากับ 0.05 เพื่อนำไปใช้ปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์ต่อไป

6) วาดกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโกลสเซอร์ทั้งหมดระบบในไมโครกริด ตามพารามิเตอร์และรูปแบบกราฟเส้นโค้งที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 – 5 เพื่อตรวจสอบการประสานการทำงานของรีโกลสเซอร์ โดยกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโกลสเซอร์ทั้งหมดจะแบ่งเป็น 3 กราฟ ตามเส้นทางของกระแสลัดวงจรที่ไปสิ้นสุดใน 3 บริเวณ ซึ่งจะมีทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ที่แตกต่างกัน โดยเส้นทางของกระแสลัดวงจรที่ไปสิ้นสุดใน 3 บริเวณ คือ เขตป้องกัน Zone 1, Zone 3.1 และ Zone 3.2 ดังแสดงเส้นทางของกระแสลัดวงจรและกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาในรูปที่ 4.5

ค่าพารามิเตอร์สำหรับนำไปตั้งค่าสำหรับรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์แต่ละตัวในระบบไมโครกริดที่ได้จากกระบวนการตามขั้นตอนที่ 1 – 5 แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 ค่ากระแสเริ่มทำงานของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ทั้งหมด เมื่อไม่โครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

R	I_{pickup} (A)	R	I_{pickup} (A)
1 →	0.68	-	-
2	0.19	-	-
3 →	0.5	3 ←	0.19
4 →	0.47	4 ←	0.22
5 →	0.68	5 ←	13.2
6	0.47	-	-
7	0.26	-	-

หมายเหตุ สัญลักษณ์ลูกศรด้านหลังรีโกลสเซอร์ 1, 3, 4 และ 5 คือ ทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ ตามรายละเอียดในรูปที่ 3.15

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ เมื่อไมโครกริดทำงานแบบ
เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

(ก) รีโกลสเซอร์ R1 – 7

R	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม			ค่าปรับตั้งของรีโกลสเซอร์ที่ได้จากการคำนวณ		
	I_{pickup} (A)	Min. Fault (A)	Max. Fault (A)	Operating Current (A)	Operating Time (S)	TMS
1 →	0.68	117	388	8.16	1.22	0.99
2	0.19	496	569	2.28	0.02	0.016
				6.6	← คำนวณย้อนกลับ	0.05
3 →	0.5	117	387	6	0.92	0.75
4 →	0.47	117	374	5.64	0.62	0.51
5 →	0.68	160	199	8.16	0.92	0.75
6	0.47	451	564	5.64	0.32	0.26
7	0.26	451	465	3.12	0.02	0.016
				9.04	← คำนวณย้อนกลับ	0.05

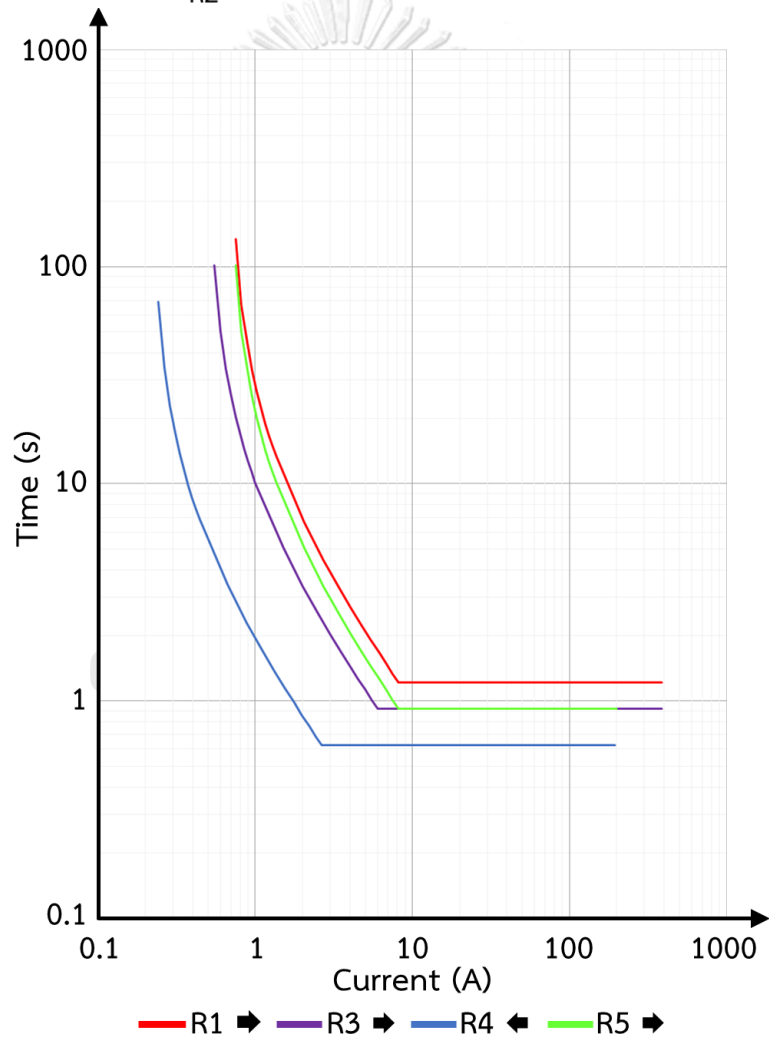
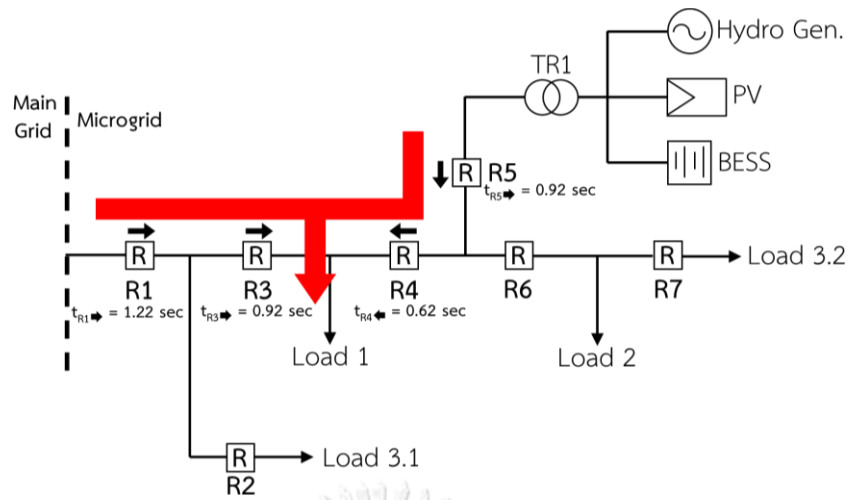
(ข) รีโกลสเซอร์ R3 – 5 ในทิศทางการทำงานทิศตรงข้ามกับตาราง (ก)

R	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม			ค่าปรับตั้งของรีโกลสเซอร์ที่ได้จากการคำนวณ		
	I_{pickup} (A)	Min. Fault (A)	Max. Fault (A)	Operating Current (A)	Operating Time (S)	TMS
3 ←	0.19	163	186	2.28	0.32	0.26
4 ←	0.22	163	195	2.64	0.62	0.51
5 ←	13.2	117	372	117	0.02	0.012
				458.7	← คำนวณย้อนกลับ	0.05

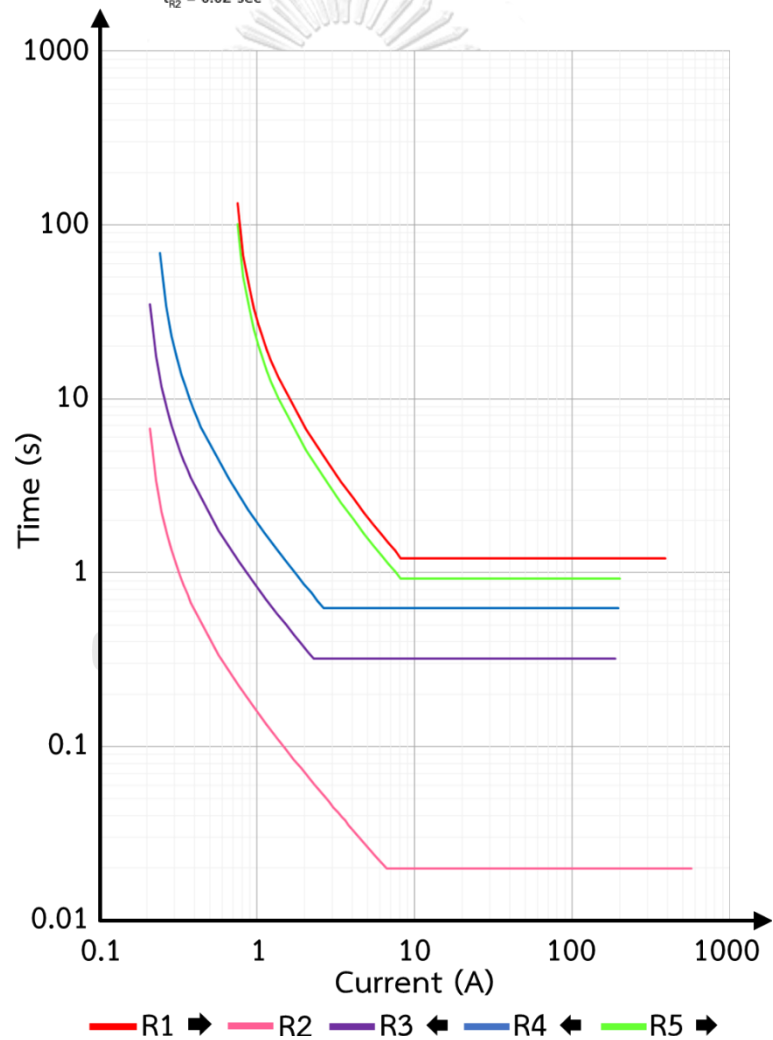
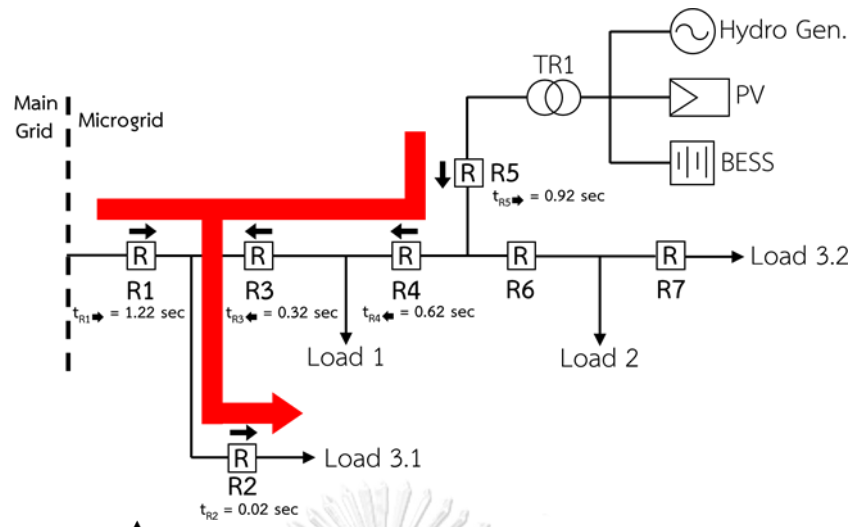
หมายเหตุ ค่า Operating Current ของรีโกลสเซอร์ 5 ◀ เมื่อใช้ค่า TMS เท่ากับ 0.05 แล้ว
คำนวณย้อนกลับจะได้ค่า Operating Current เท่ากับ 458.7 A แต่ค่าที่คำนวณได้เกิน
ค่ากระแสลัดวงจรต่ำที่สุดจึงใช้ค่าเท่ากับค่ากระแสลัดวงจรต่ำที่สุดที่ 117 A

เมื่อตรวจสอบการประสานการทำงานของรีโกลสเซอร์ โดยการวาดกราฟเส้นโค้ง
คุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวทั้งหมด จะได้กราฟเส้น
โค้งดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากการตรวจสอบกราฟเส้นโค้งพบว่า รีโกลสเซอร์ไม่มีการทำงานขัดแย้งกัน
จึงสามารถนำค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.12 ไปปรับตั้งค่าการทำงานแบบกลุ่มให้กับรีโกลสเซอร์ที่
ทำงานป้องกันด้านกราวด์เมื่อไม่โครกริตทำงานในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้

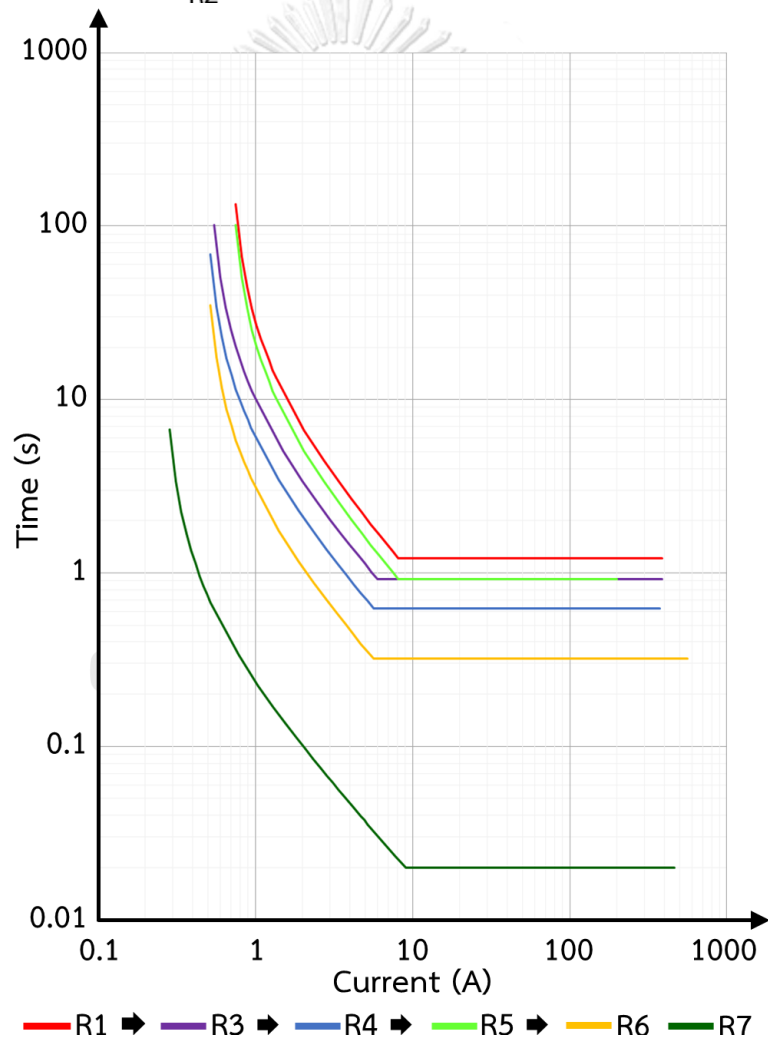
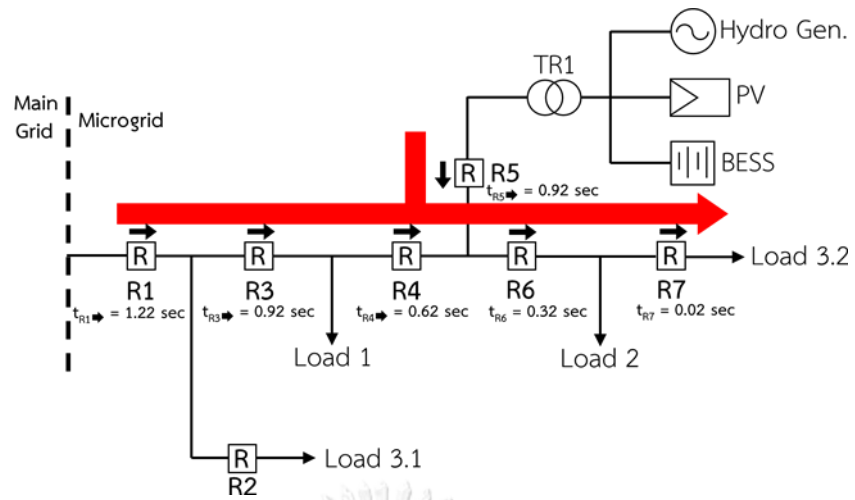




(ก) เส้นทางของกระแสลัดวงจรที่ไปสิ้นสุดที่เขตการป้องกัน Zone 1



(ข) เส้นทางของกระแสลัดวงจรที่ไปสิ้นสุดที่เขตการป้องกัน Zone 3.1



(ค) เส้นทางของกระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนสุดที่เขตการป้องกัน Zone 3.2

รูปที่ 4.5 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ทั้งหมด เมื่อไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

4.2.3 การปรับตั้งค่ารีโคลสเซอร์เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

การปรับตั้งค่ารีโคลสเซอร์เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด จะพิจารณาตามขั้นตอนในหัวข้อ 4.2.1 เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับนำไปตั้งค่ารีโคลสเซอร์ โดยการพิจารณาการปรับตั้งค่ารีโคลสเซอร์จะแยกการปรับตั้งค่ารีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส และทำงานป้องกันด้านกราวด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2.3.1 การปรับตั้งค่ารีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

1) เวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์ เริ่มพิจารณาเวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์ของเขตป้องกันที่อยู่ปลายสายของระบบจำหน่าย คือ เขตการป้องกัน Zone 3.1 และ Zone 3.2 โดยตั้งค่าเวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ 0.02 วินาที ต่อมาพิจารณารีโคลสเซอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเขตป้องกันสำรองซึ่งจะอยู่ถัดออกมาโดยตั้งค่าเวลาการทำงานให้หน่วงเพิ่มอีก 0.3 วินาที โดยพิจารณาตั้งค่าเวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์จนครบทุกเขตป้องกัน โดยกระบวนการตั้งค่าเวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์เมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบแยกโดดสรุปเป็นแผนผังดังแสดงในรูปที่ 4.6 และเวลาทำงานของรีโคลสเซอร์ทั้งหมดเมื่อระบบไมโครกริดทำงานแบบแยกโดดแสดงในรูปที่ 4.7

2) กระแสเริ่มทำงาน (I_{pickup}) กำหนดค่าเป็น 125% ของกระแสโหลดรวมสูงสุดที่ผ่านรีโคลสเซอร์ตัวนั้นๆ โดยค่ากระแสโหลดรวมที่ผ่านรีโคลสเซอร์แต่ละตัวและค่ากระแสเริ่มทำงานของรีโคลสเซอร์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.13

3) ค่ากระแสทำงาน (Operating current) กำหนดให้มีค่าเป็น 12 เท่าของกระแสเริ่มทำงาน

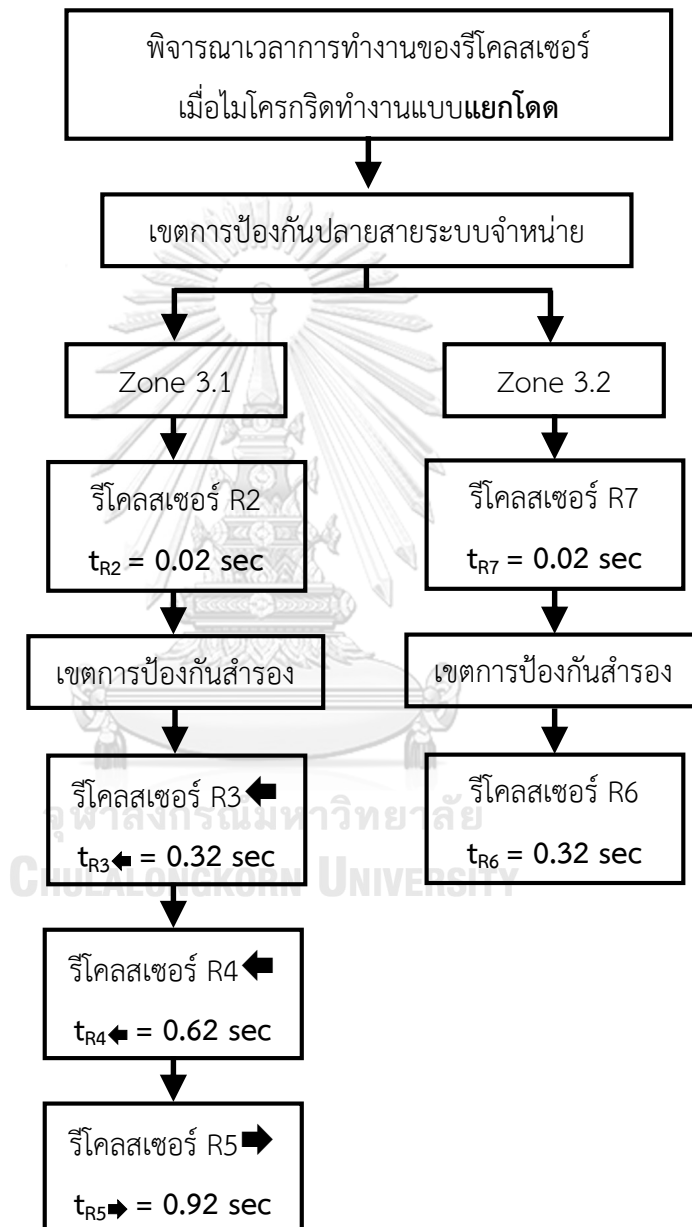
4) กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลา กำหนดเป็นแบบ VI

5) ค่าเวลาปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน (TMS) คำนวณจากสูตร ค.1 (ภาคผนวก ค) โดยใช้ข้อมูลจากข้อ 1) – 4) โดยรีโคลสเซอร์สามารถปรับตั้งค่า TMS ได้ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.05 ดังนั้นกรณีที่คำนวณหาค่า TMS ได้ต่ำกว่า 0.05 ให้ปรับไปใช้ค่า 0.05 แทน และคำนวณย้อนกลับหาค่ากระแสทำงานที่ปรับไปใช้ค่า TMS เท่ากับ 0.05 เพื่อนำไปใช้ปรับตั้งค่ารีโคลสเซอร์ต่อไป

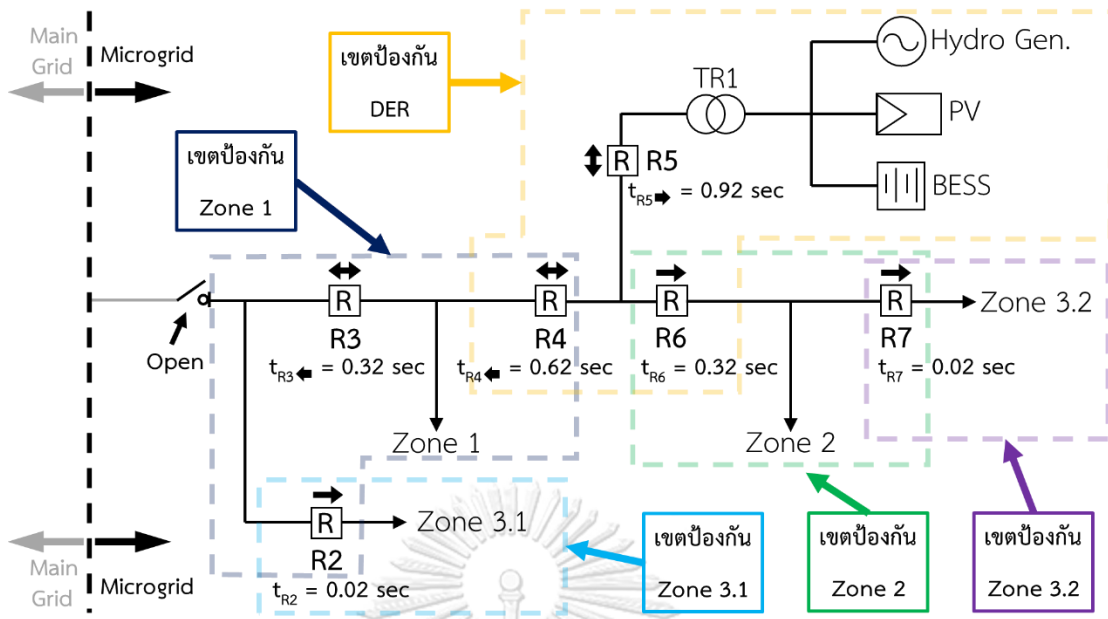
6) วาดกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ทั้งหมดระบบในไมโครกริด ตามพารามิเตอร์และรูปแบบกราฟเส้นโค้งที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 – 5 เพื่อตรวจสอบการประสานการทำงานของรีโคลสเซอร์ โดยกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ทั้งหมดจะแบ่งเป็น 2 กราฟ ตามเส้นทางของกระแสตัวจริงที่ไปสิ้นสุดใน 2 บริเวณ ซึ่งจะมีทิศทางการทำงานของรีโคลสเซอร์ที่แตกต่างกัน โดยเส้นทางของกระแสตัวจริงที่ไปสิ้นสุดใน

2 บริเวณ คือ เขตป้องกัน Zone 3.1 และ Zone 3.2 ดังแสดงเส้นทางของกระแสลัดวงจรและกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาในรูปที่ 4.8

ค่าพารามิเตอร์สำหรับนำไปตั้งค่ารีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสแต่ละตัวในระบบไมโครกริดที่ได้จากกระบวนการตามขั้นตอนที่ 1 – 5 แสดงในตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.6 กระบวนการตั้งค่าเวลาการทำงานของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส เมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบแยกโดด



รูปที่ 4.7 เวลาทำงานของรีโคสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อระบบไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

ตารางที่ 4.13 ค่ากระแสไหลรวมที่ผ่านรีโคสเซอร์แต่ละตัว และกระแสเริ่มทำงานของรีโคสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

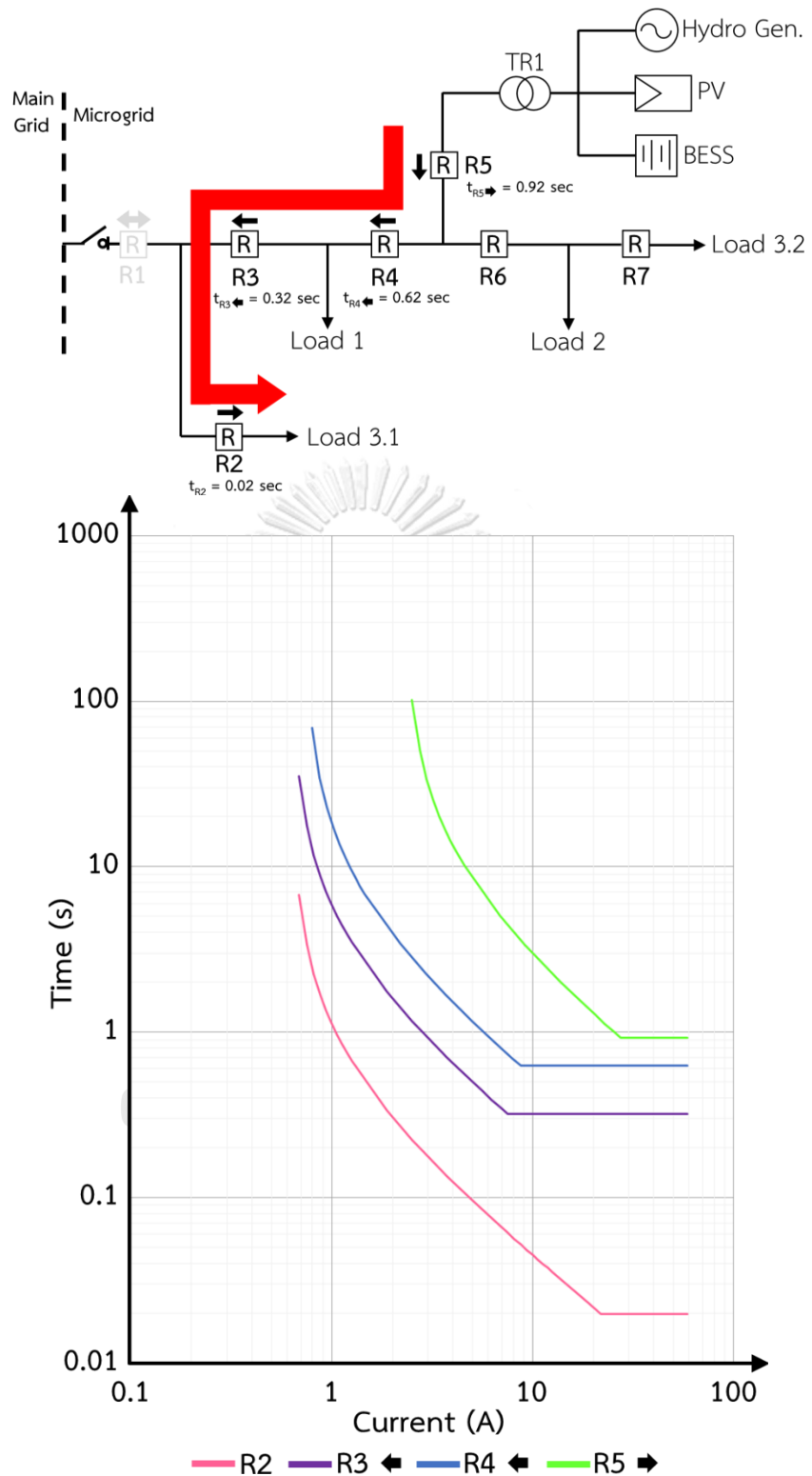
R	$I_{full\ load} (A)$	$I_{pickup} (A)$
2	0.5	0.625
3 ←	0.5	0.625
4 ←	0.58	0.725
5 →	1.82	2.28
6	1.24	1.555
7	0.7	0.875

หมายเหตุ สัญลักษณ์ลูกศรด้านหลังรีโคสเซอร์ 3, 4 และ 5 คือ ทิศทางการทำงานของรีโคสเซอร์ตามรายละเอียดในรูปที่ 3.21

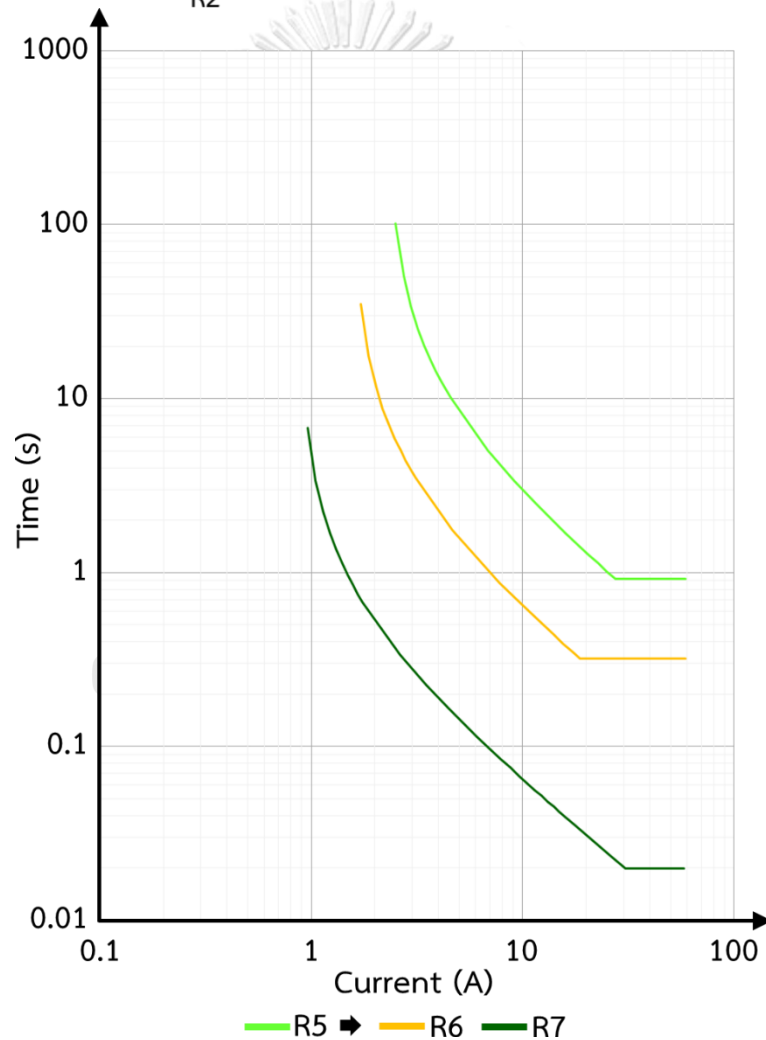
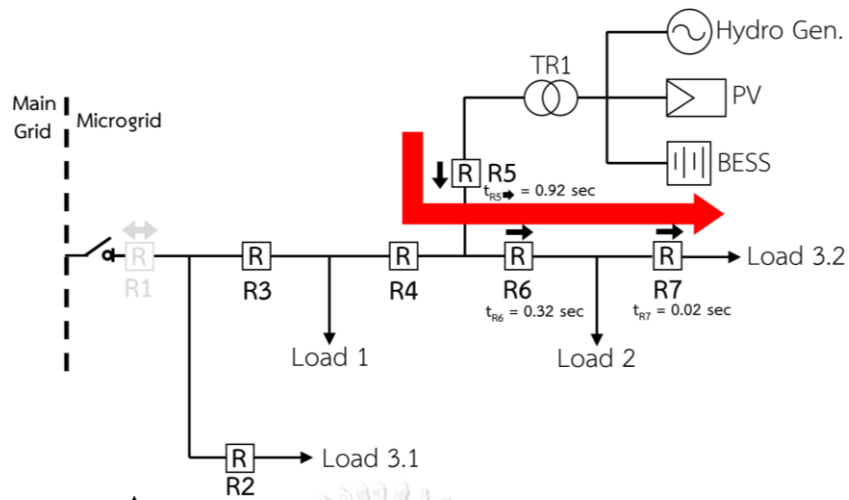
ตารางที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

R	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม			ค่าปรับตั้งของรีโกลสเซอร์ที่ได้จากการคำนวณ		
	I_{pickup} (A)	Min. Fault (A)	Max. Fault (A)	Operating Current (A)	Operating Time (S)	TMS
2	0.625	40	59	7.5	0.02	0.016
				21.88	← คำนวณย้อนกลับ	0.05
3 ←	0.625	40	59	7.5	0.32	0.26
4 ←	0.725	40	59	8.7	0.62	0.51
5 →	2.28	40	59	27.36	0.92	0.75
6	1.555	40	59	18.66	0.32	0.26
7	0.875	40	58	10.5	0.02	0.016
				30.63	← คำนวณย้อนกลับ	0.05

เมื่อตรวจสอบการประสานการทำงานของรีโกลสเซอร์ โดยการวาดกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด จะได้กราฟเส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากการตรวจสอบกราฟเส้นโค้งพบว่า รีโกลสเซอร์ไม่มีการทำงานขัดแย้งกัน จึงสามารถนำค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.14 ไปปรับตั้งค่าการทำงานแบบกลุ่มให้กับรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสเมื่อไมโครกริดทำงานในรูปแบบแยกโดด



(ก) เส้นทางของกระแสลัดวงจรที่ไปสิ้นสุดที่เขตการป้องกัน Zone 3.1



(ข) เส้นทางของกระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนสุดที่เขตการป้องกัน Zone 3.2

รูปที่ 4.8 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟสทั้งหมด เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

4.2.3.2 การปรับตั้งค่ารีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์เมื่อไมโครกริดทำงาน

แบบแยกโดด

1) เวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ใช้เวลาการทำงานเดียวกับรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส

2) กระแสเริ่มทำงาน (I_{pickup}) กำหนดค่าเท่ากับ 30% ของกระแสเริ่มทำงานด้านเฟส โดยค่ากระแสเริ่มทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.15

3) ค่ากระแสทำงาน (Operating current) กำหนดให้มีค่าเป็น 12 เท่าของกระแสเริ่มทำงาน

4) กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลา กำหนดเป็นแบบ VI

5) ค่าเวลาปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน (TMS) คำนวณจากสูตร ค.1 (ภาคผนวก ค) โดยใช้ข้อมูลจากข้อ 1) – 4) โดยรีโคลสเซอร์สามารถปรับตั้งค่า TMS ได้ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.05 ดังนั้นกรณีที่คำนวณหาค่า TMS ได้ต่ำกว่า 0.05 ให้ปรับไปใช้ค่า 0.05 แทน และคำนวณย้อนกลับหาค่ากระแสทำงานที่ปรับไปใช้ค่า TMS เท่ากับ 0.05 เพื่อนำไปใช้ปรับตั้งค่ารีโคลสเซอร์ต่อไป

6) วาดกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ทั้งหมดระบบในไมโครกริด ตามพารามิเตอร์และรูปแบบกราฟเส้นโค้งที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 – 5 เพื่อตรวจสอบการประสานการทำงานของรีโคลสเซอร์ โดยกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ทั้งหมดจะแบ่งเป็น 2 กราฟ ตามเส้นทางของกระแสลัดวงจรที่ไปสิ้นสุดใน 2 บริเวณ ซึ่งจะมีทิศทางการทำงานของรีโคลสเซอร์ที่แตกต่างกัน โดยเส้นทางของกระแสลัดวงจรที่ไปสิ้นสุดใน 2 บริเวณ คือ เขตป้องกัน Zone 3.1 และ Zone 3.2 ดังแสดงเส้นทางของกระแสลัดวงจรและกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาในรูปที่ 4.9

ค่าพารามิเตอร์สำหรับนำไปตั้งค่ารีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์แต่ละตัวในระบบไมโครกริดที่ได้จากกระบวนการตามขั้นตอนที่ 1 – 5 แสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.15 ค่ากระแสเริ่มทำงานของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ทั้งหมด เมื่อไม่โครกริด

ทำงานแบบแยกโดด

R	I_{pickup} (A)
2	0.19
3 ←	0.19
4 ←	0.22
5 →	0.68
6	0.47
7	0.26

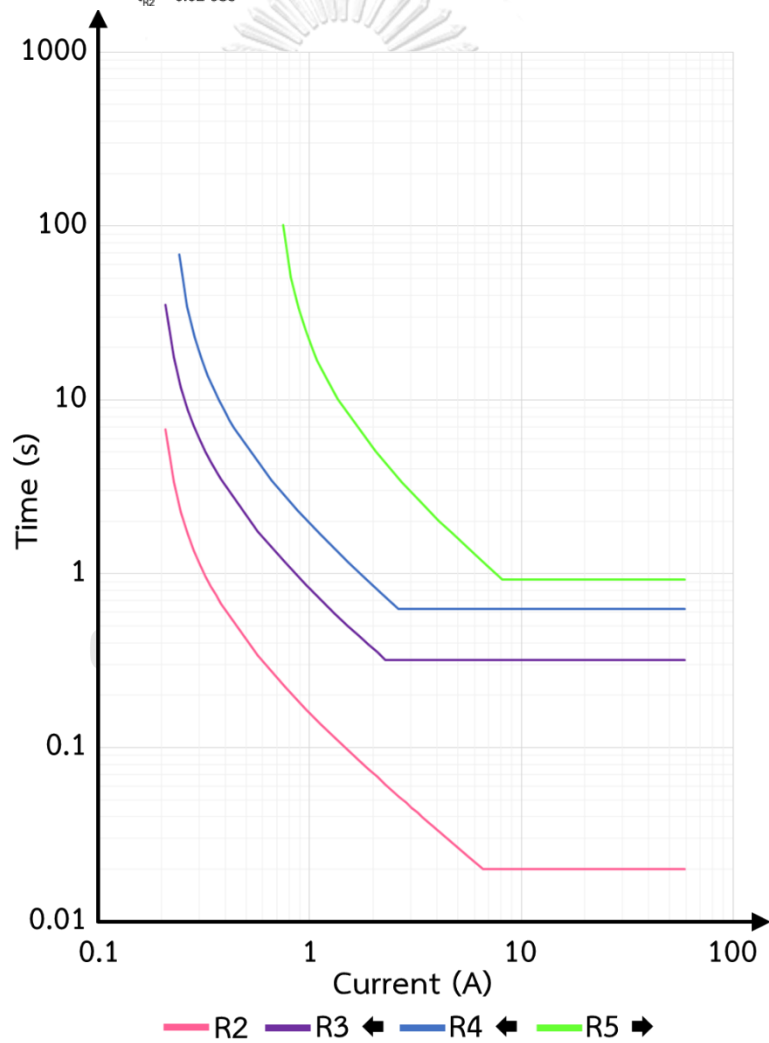
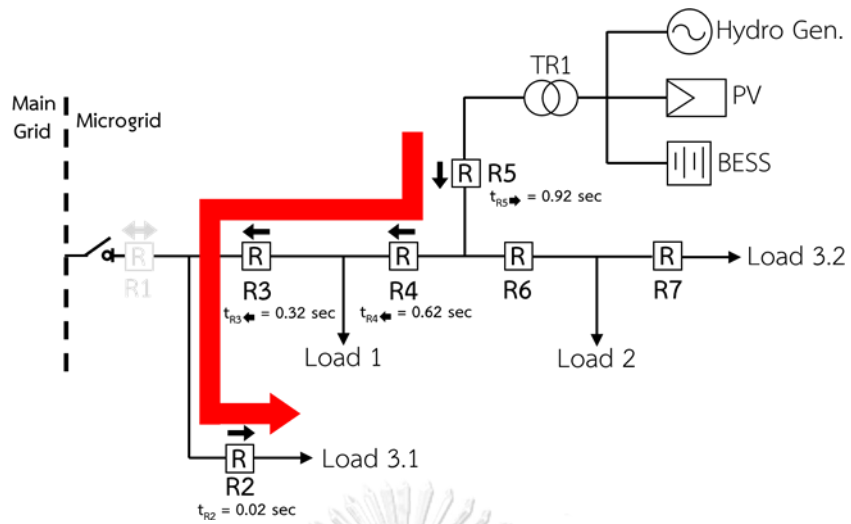
หมายเหตุ สัญลักษณ์ลูกศรด้านหลังรีโกลสเซอร์ 3, 4 และ 5 คือ ทิศทางการทำงานของรีโกลสเซอร์ ตามรายละเอียดในรูปที่ 3.21

ตารางที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ เมื่อไม่โครกริดทำงานแบบแยกโดด

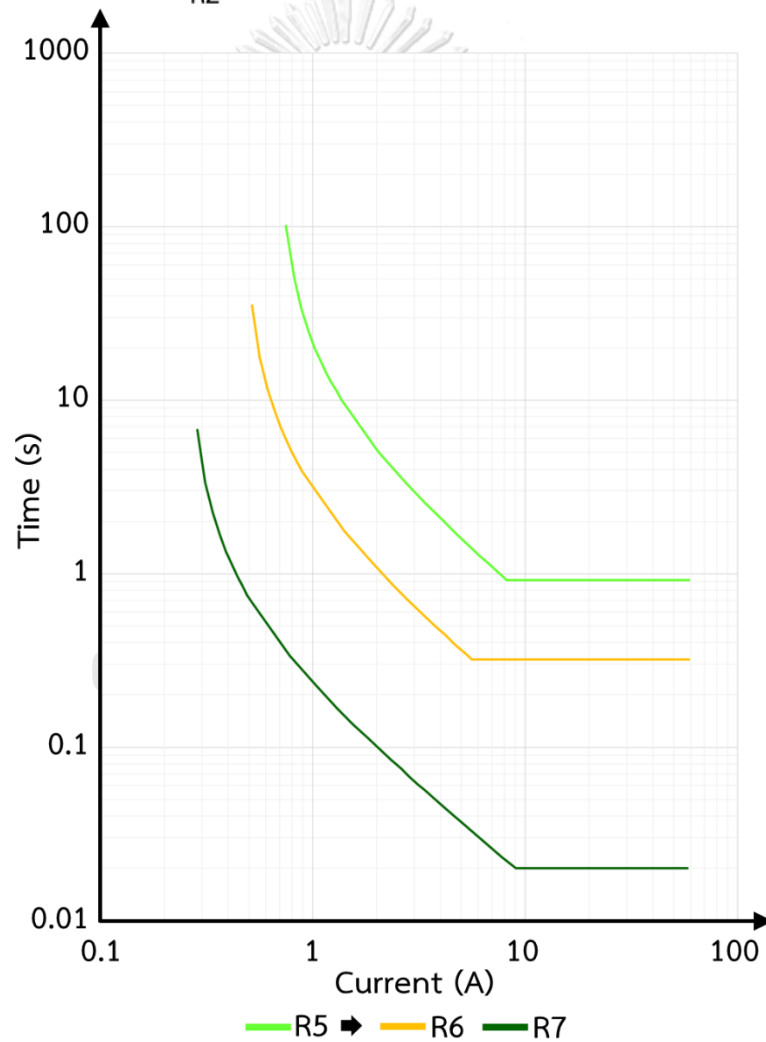
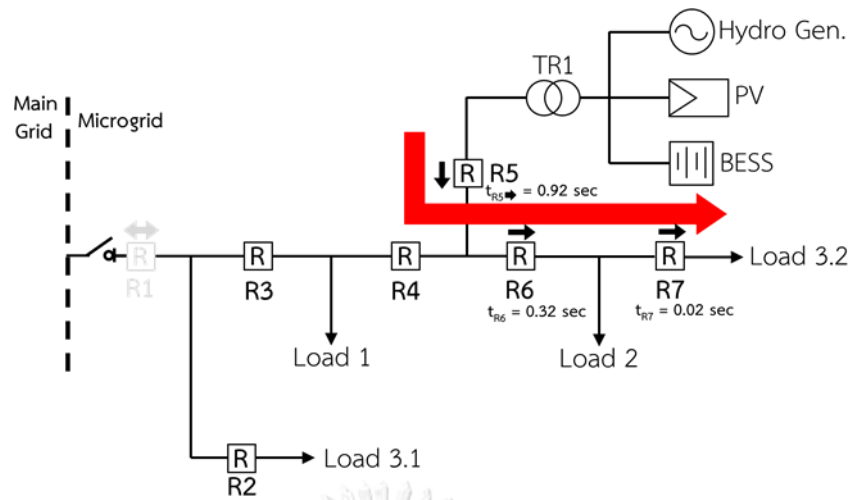
R	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม			ค่าปรับตั้งของรีโกลสเซอร์ที่ได้จากการคำนวณ		
	I_{pickup} (A)	Min. Fault (A)	Max. Fault (A)	Operating Current (A)	Operating Time (S)	TMS
2	0.19	58	59	2.28	0.02	0.016
				6.6 ←	จำนวนย้อนกลับ 0.05	
3 ←	0.19	58	59	2.28	0.32	0.26
4 ←	0.22	58	59	2.64	0.62	0.51
5 →	0.68	58	59	8.16	0.92	0.75
6	0.47	58	59	5.64	0.32	0.26
7	0.26	58	58	3.12	0.02	0.016
				9.04 ←	จำนวนย้อนกลับ 0.05	

เมื่อตรวจสอบการประสานการทำงานของรีโคลสเซอร์ โดยการวาดกราฟเส้นโค้ง
คุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโคลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ทั้งหมด จะได้กราฟ เส้น
โค้งดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากการตรวจสอบกราฟเส้นโค้งพบว่า รีโคลสเซอร์ไม่มีการทำงานขัดแย้งกัน
จึงสามารถนำค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.16 ไปปรับตั้งค่าการทำงานแบบกลุ่มให้กับรีโคลสเซอร์ที่
ทำงานป้องกันด้านกราวด์เมื่อไม่โครกริดทำงานในรูปแบบแยกโดด





(ก) เส้นทางของกระแสลัดวงจรที่ไปสิ้นสุดที่เขตการป้องกัน Zone 3.1



(ข) เส้นทางของกระแสลัดวงจรที่ไปสิ้นสุดที่เขตการป้องกัน Zone 3.2

รูปที่ 4.9 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาของรีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์ทั้งหมด เมื่อไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด

4.3 ผลสรุปการปรับตั้งค่ารีโคสเซอร์

จากกระบวนการปรับตั้งค่าในหัวข้อที่ 4.2 จะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับนำไปปรับตั้งค่ารีโคสเซอร์ภายในโครงการไมโครกริดบ้านขุนแปะ ซึ่งค่าที่ได้จะนำไปค่าตั้งค่าการทำงานแบบกลุ่มตามรูปแบบการทำงานของไมโครกริดคือ การตั้งค่าสำหรับการทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก และการตั้งค่าสำหรับการทำงานแบบแยกโดด โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับปรับตั้งค่ารีโคสเซอร์ในกรณีระบบไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักแสดงในตารางที่ 4.17 และค่าพารามิเตอร์สำหรับปรับตั้งค่ารีโคสเซอร์ในกรณีระบบไมโครกริดทำงานแบบแยกโดดแสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์สำหรับปรับตั้งค่ารีโคสเซอร์ ในกรณีไมโครกริดทำงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

(ก) ค่าพารามิเตอร์สำหรับปรับตั้งค่ารีโคสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส

R	I_{pickup} (A)	Operating Current (A)	Max. Fault Current (A)	Operating Time (S)	TMS
1 ➡	2.28	27.36	423	1.22	0.99
1 ⬅	-	40	-	instantaneous	-
2	0.625	21.88	569	0.02	0.05
3 ➡	1.655	19.86	420	0.92	0.75
3 ⬅	0.625	7.5	186	0.32	0.26
4 ➡	1.555	18.66	393	0.62	0.51
4 ⬅	0.725	8.7	195	0.62	0.51
5 ➡	2.28	27.36	199	0.92	0.75
5 ⬅	44	117	390	0.02	0.05
6	1.555	18.66	564	0.32	0.26
7	0.875	30.63	465	0.02	0.05

(ข) ค่าพารามิเตอร์สำหรับปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์

R	I_{pickup} (A)	Operating Current (A)	Max. Fault Current (A)	Operating Time (S)	TMS
1 ➡	0.68	8.16	388	1.22	0.83
2	0.19	6.6	569	0.02	0.05
3 ➡	0.5	6	387	0.92	0.75
3 ←	0.19	2.28	186	0.32	0.26
4 ➡	0.47	5.64	374	0.62	0.51
4 ←	0.22	2.64	195	0.62	0.51
5 ➡	0.68	8.16	199	0.92	0.75
5 ←	13.2	117	372	0.02	0.05
6	0.47	5.64	564	0.32	0.26
7	0.26	9.04	465	0.02	0.05

ตารางที่ 4.18 ค่าพารามิเตอร์ของรีโกลสเซอร์ ในกรณีไม่โครกริดทำงานแบบแยกโดด

(ก) ค่าพารามิเตอร์สำหรับปรับตั้งค่ารีโกลสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านเฟส

R	I_{pickup} (A)	Operating Current (A)	Max. Fault Current (A)	Operating Time (S)	TMS
2	0.625	21.88	59	0.02	0.05
3 ←	0.625	7.5	59	0.32	0.26
4 ←	0.725	8.7	59	0.62	0.51
5 ➡	2.28	27.36	59	0.92	0.75
6	1.555	18.66	59	0.32	0.26
7	0.875	30.63	58	0.02	0.05

(ข) ค่าพารามิเตอร์สำหรับปรับตั้งค่ารีโคสเซอร์ที่ทำงานป้องกันด้านกราวด์

R	I_{pickup} (A)	Operating Current (A)	Max. Fault Current (A)	Operating Time (S)	TMS
2	0.19	6.6	59	0.02	0.05
3 ←	0.19	2.28	59	0.32	0.26
4 ←	0.22	2.64	59	0.62	0.51
5 →	0.68	8.16	59	0.92	0.75
6	0.47	5.64	59	0.32	0.26
7	0.26	9.04	58	0.02	0.05

บทที่ 5

การควบคุมระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สำหรับการทำงานแบบแยกโดด

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวทางการควบคุมระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบตเตอรี่ โดยพิจารณาถึงคุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่ และแรงดันไฟฟ้าของระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดดที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด และมีความผันผวนจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์การรักษาคุณภาพไฟฟ้าจะใช้วิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้มีลักษณะสมบัติเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยมีเป้าหมายให้คุณภาพไฟฟ้าของความถี่และแรงดันอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

5.1 คุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่และแรงดันไฟฟ้า

เมื่อระบบไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ คุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่และแรงดันไฟฟ้า แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในไมโครกริดในการทำงานแบบแยกโดดประกอบด้วย 1) โรงไฟฟ้าพลังน้ำ 2) ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และ 3) ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่มีเวลาตอบสนองเร็ว จึงกำหนดให้ทำหน้าที่ควบคุมคุณภาพไฟฟ้าโดยการควบคุมให้มีลักษณะสมบัติเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อทำงานของระบบไมโครกริดมีคุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่ และแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยมาตรฐานเกี่ยวกับความถี่ และแรงดันไฟฟ้ามีรายละเอียดดังนี้

5.1.1 แรงดันไฟฟ้า

คุณภาพไฟฟ้าในด้านแรงดันไฟฟ้าจะต้องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าไม่ให้ต่ำหรือสูงกว่ามาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่กำหนดว่า ในสภาวะปกติต้องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วง \pm ร้อยละ 5 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ [3]

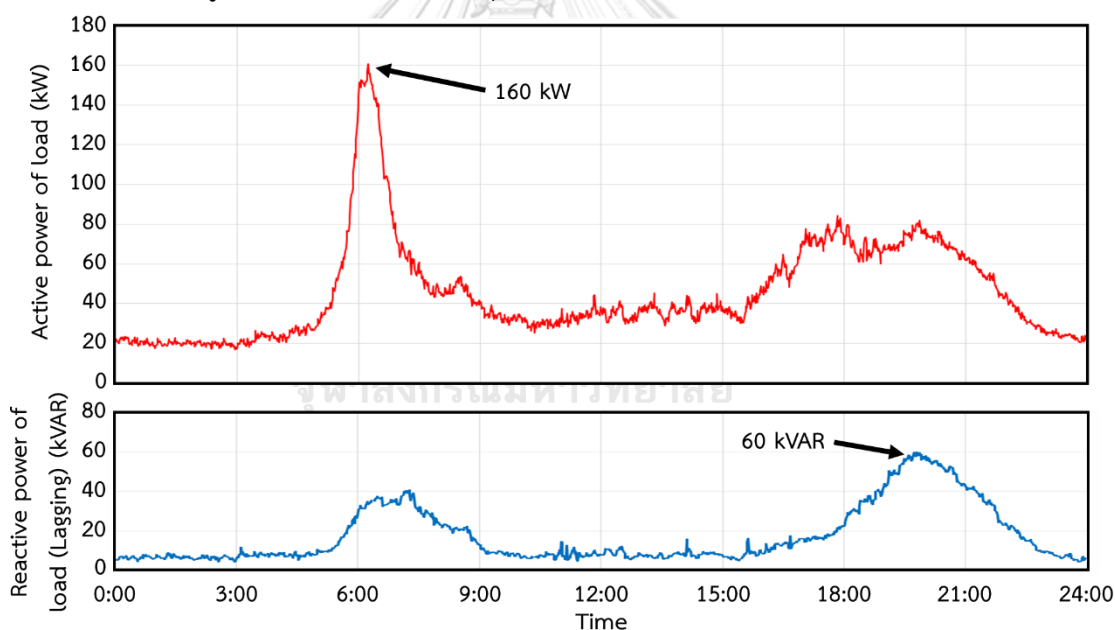
5.1.2 ความถี่ไฟฟ้า

คุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่ไฟฟ้าจะควบคุมความถี่ไฟฟ้าไม่ให้ต่ำหรือสูงกว่ามาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่กำหนดว่า ในสภาวะปกติต้องควบคุมความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน 50 ± 0.5 Hz [3]

5.2 ข้อมูลองค์ประกอบของระบบไมโครกริดที่ส่งผลต่อคุณภาพไฟฟ้า

5.2.1 การใช้กำลังไฟฟ้าของโหลด [1]

ระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะมีความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดประมาณ 160 kW และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดประมาณ 60 kVAR โดยเวลาที่เกิดความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด คือ ช่วง 6.00 – 7.00 น. เนื่องจากเป็นช่วงเวลาเตรียมอาหารสำหรับครัวเรือน โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าหลักๆ คือ หม้อหุงข้าวซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 600 – 700 W และมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงอีกครั้งในช่วงหัวค่ำระหว่างเวลา 18.00 – 21.00 น. แต่ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าจะน้อยกว่าช่วงเช้า โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าหลักในช่วงเวลานี้จะเป็นหลอดไฟที่ให้แสงสว่างในเวลากลางคืน รูปที่ 5.1 แสดงข้อมูลการตรวจวัดค่าโหลดรวมรายนาทียของวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 จาก FRTU ของระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ ซึ่งแบ่งเป็น 1) กำลังไฟฟ้าจริง (Active power) ซึ่งมีค่าสูงในช่วงเช้าจากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อเตรียมอาหาร และ 2) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive power) แบบล่าหลัง (Lagging) ซึ่งมีค่าสูงในช่วงหัวค่ำจากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ให้แสงสว่างในเวลากลางคืน



รูปที่ 5.1 ค่าประมาณโหลดรวมรายนาทีย ของระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ

5.2.2 กำลังการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำ [1]

กำลังการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำจะขึ้นอยู่กับระดับน้ำที่ฝายกักเก็บไว้ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามฤดูกาล โดยกำลังไฟฟ้าผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนส์ขนาด 100 kW ดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยค่าตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนส์ภายในโรงไฟฟ้าพลังน้ำอ้างอิงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนส์ที่พิกัดใกล้เคียงกัน เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำของไมโครกริดบ้านขุนแปะไม่มีข้อมูลค่าตัวแปรเก็บไว้ ข้อมูลค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองระบบดังแสดงใน

ตารางที่ 5.1 จากข้อมูลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำในปี พ.ศ. 2559 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาของปี โดยข้อมูลค่ากำลังผลิตไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ในแต่ละเดือนแสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งมีรายละเอียดกำลังการผลิตในแต่ละช่วงเวลามีดังนี้

- 1) เดือนมกราคม – กุมภาพันธ์ สามารถผลิตได้ประมาณ 25 kW
- 2) เดือนมีนาคม – เมษายน ไม่ผลิตกำลังไฟฟ้าเนื่องจากเป็นฤดูร้อนจึงไม่มีน้ำสำหรับใช้หมุนกังหันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 3) เดือนพฤษภาคม และเดือนธันวาคม สามารถผลิตได้ประมาณ 35 kW
- 4) เดือนมิถุนายน – พฤศจิกายน สามารถผลิตได้ประมาณ 55 kW ซึ่งเป็นกำลังที่ผลิตได้สูงสุด

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส

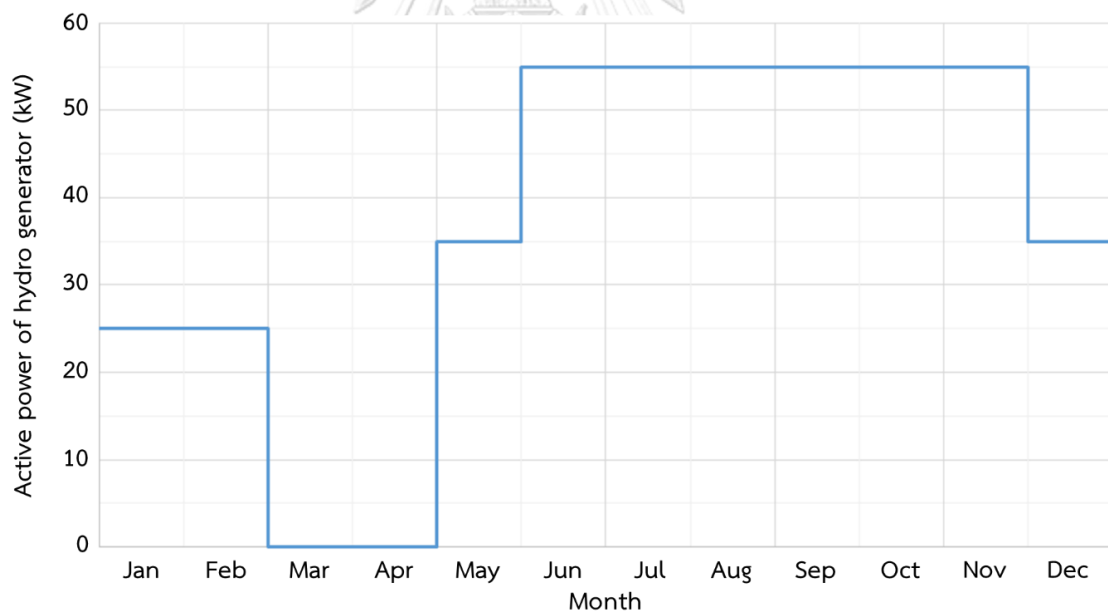
Parameter	Hydro Gen.	Parameter	Hydro Gen.
Power (kVA)	125	T'd / T''d (s)	0.087 / 0.006
Voltage (kV)	0.4	X/R Ratio	8
p.f.	0.8	X0 / X2	0.023 / 0.107
Xd / Xd' / Xd'' (p.u.)	2.8 / 0.205 / 0.101	Xq / Xq'' (p.u.)	1.55 / 0.113
Inertia Constant (s)	0.09	Mechanical damping (p.u.)	0.018



รูปที่ 5.2 ฝ่ายกักเก็บน้ำ



รูปที่ 5.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสภายในโรงไฟฟ้าพลังน้ำ



รูปที่ 5.4 กำลังไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำผลิตได้ในแต่ละเดือน

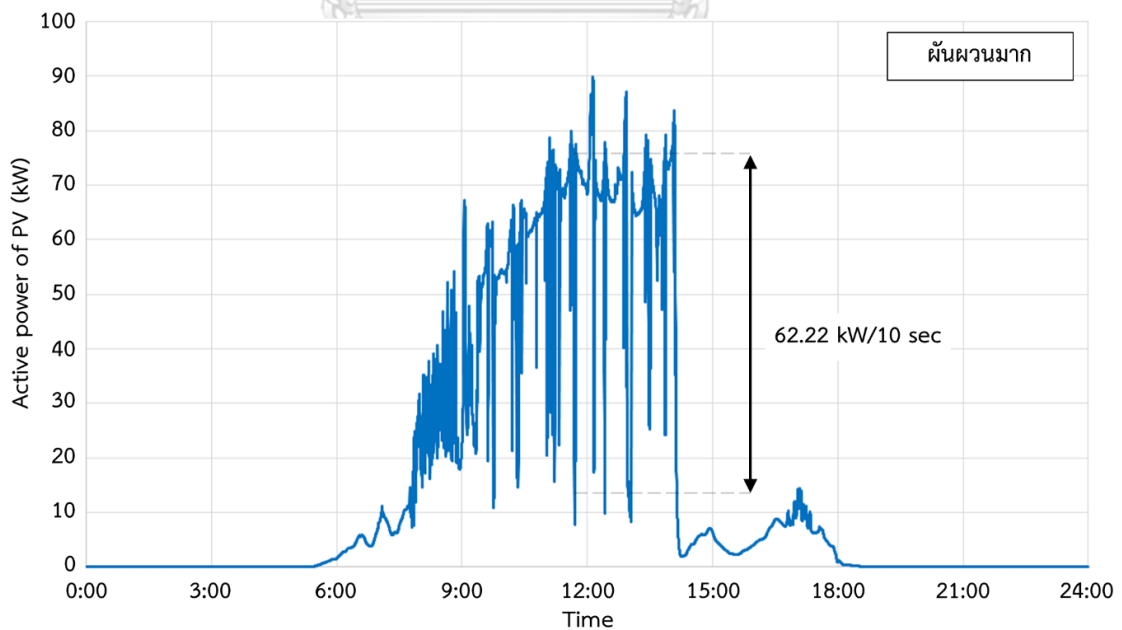
5.2.3 กำลังผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของไมโครกริดบ้านขุนแปะมีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งขนาด 100 kW_p ดังแสดงในรูปที่ 5.5 จากการศึกษางานวิจัย [2] พบว่า ในกรณีไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด ความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ส่งผลต่อคุณภาพแรงดันและความถี่ไฟฟ้า ทำให้มีค่าเบี่ยงเบนเกินมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สำหรับค่ากำลังผลิตไฟฟ้าใช้ค่าความเข้มแสงอ้างอิงจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง [2] นำมาปรับให้มีกำลังการผลิตขนาด 100 kW_p ซึ่งจะได้ข้อมูลค่ากำลังผลิตไฟฟ้าที่ราย 10 วินาที โดยเลือกใช้ข้อมูลค่าความเข้มแสงในวันที่ 26 มิถุนายน 2561 ซึ่งมีค่าความผันผวนราย 10 วินาทีที่สูงที่สุด โดยความผันผวนราย 10 วินาทีสูงสุดที่ 62.22 kW และสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 89.96 kW ดังแสดงข้อมูลในรูปที่ 5.6 การเลือกใช้ค่ากำลังผลิตไฟฟ้าที่มีความผันผวนสูงที่สุดนั้น เพื่อพิจารณาการทำงานของระบบไมโครกริดว่าสามารถควบคุมความถี่ และแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในมาตรฐานได้หรือไม่



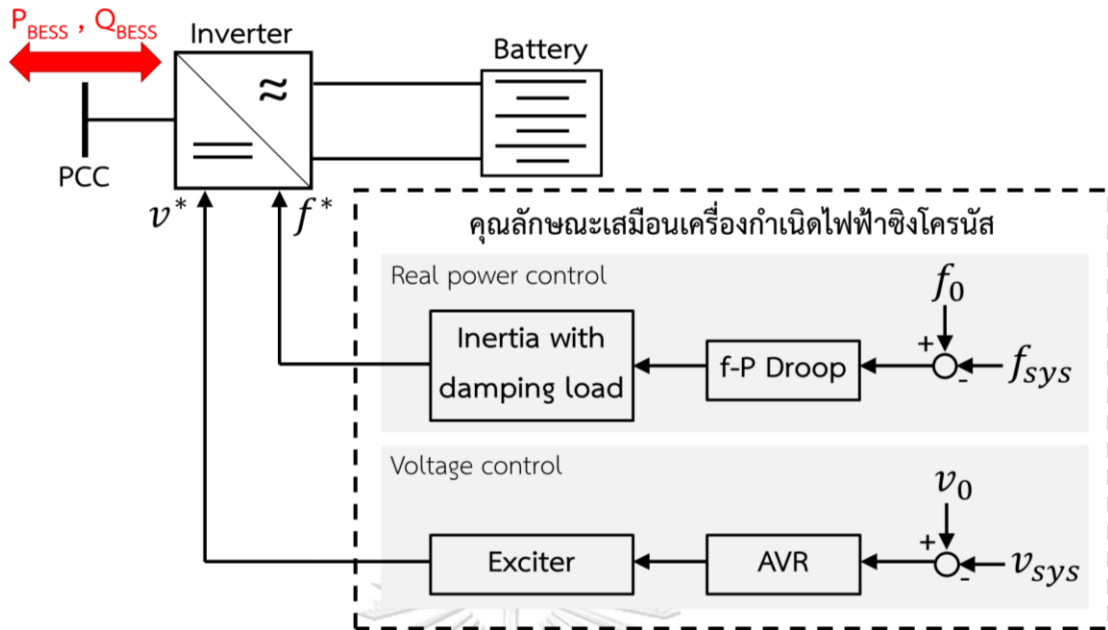
รูปที่ 5.5 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของไมโครกริดบ้านขุนแปะ กำลังการผลิตติดตั้งขนาด 100 kW_p



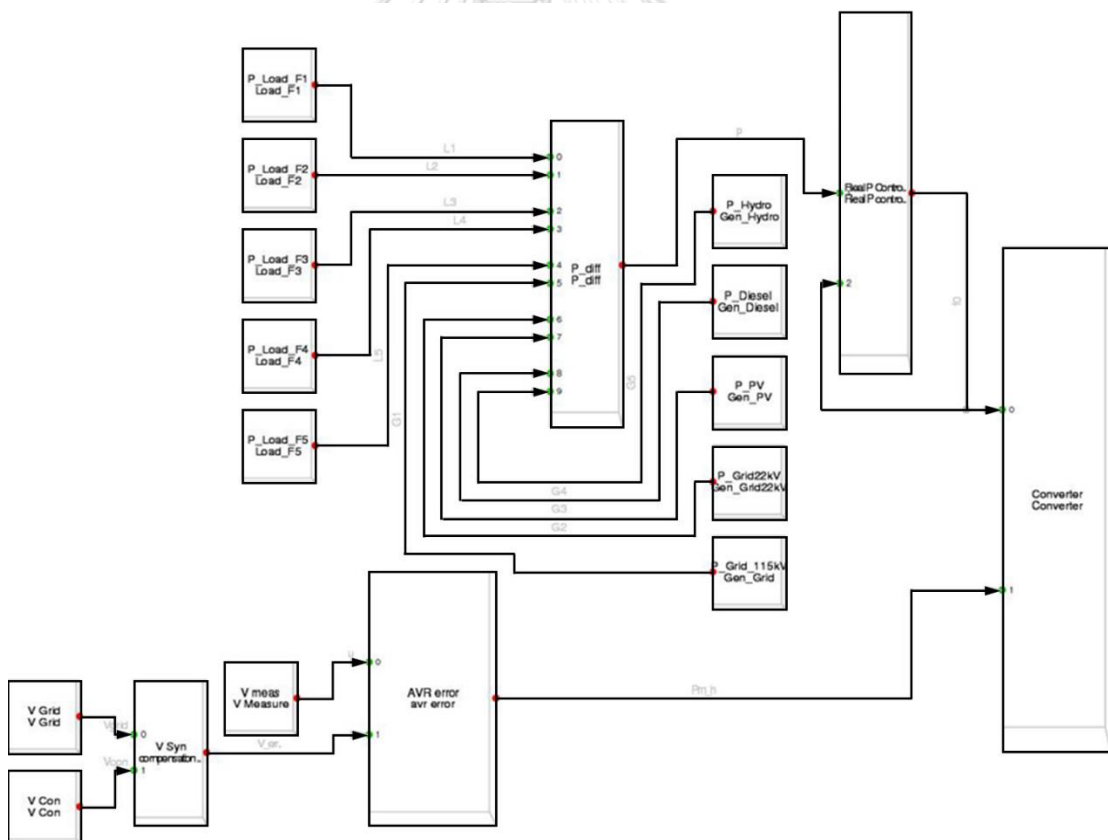
รูปที่ 5.6 ค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในการศึกษา

5.2.4 การควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อช่วยควบคุมคุณภาพไฟฟ้า

ระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดดสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคุณภาพไฟฟ้าในด้านของความถี่ และแรงดันไฟฟ้า โดยระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะทำหน้าที่จัดตั้งโครงข่าย (Grid forming) ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้สมดุลกับภาระทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป แต่จากการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความผันผวนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จึงเป็นส่วนสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าให้อยู่ในมาตรฐาน ซึ่งการที่จะทำให้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สามารถทำการรักษาคุณภาพไฟฟ้าได้จะต้องมีการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้มีคุณลักษณะเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อให้มีความสามารถในชดเชยกับความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้้นำแนวทางการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ของงานวิจัย [8] [9] [10] มาใช้ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมให้ระบบไมโครกริดมีคุณภาพไฟฟ้าที่ดี การควบคุมอินเวอร์เตอร์ควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้มีลักษณะสมบัติเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบรูปสำหรับควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า และส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (AVR) และตัวกระตุ้น (Exciter) สำหรับควบคุมแรงดันของระบบไฟฟ้า (ภาคผนวก ง) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของ การควบคุมความถี่ และแรงดันไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่แสดงในรูปที่ 5.7 และแบบจำลองระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่แสดงในรูปที่ 5.8 ในส่วนของกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ซึ่งมีขนาด 100 kW / 100 kWh ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดนั้น กำหนดให้ทำงานในการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าที่ 2C rate เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดในช่วงเช้าที่ประมาณ 160 kW



รูปที่ 5.7 แผนภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะสมบัติเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส



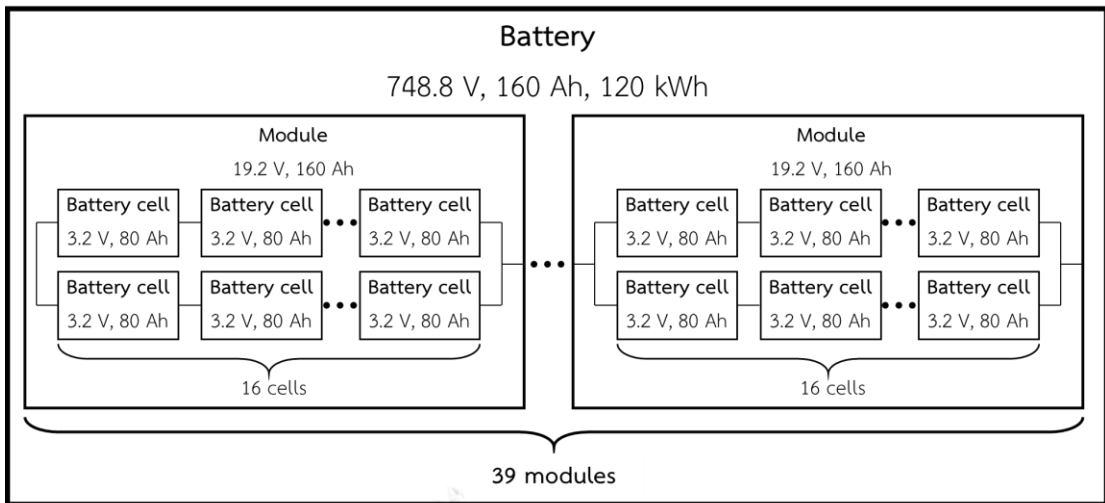
รูปที่ 5.8 แบบจำลองระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่

5.2.4.1 การจ่ายกำลังไฟฟ้า

แบตเตอรี่ที่นำมาใช้ประกอบจากเซลล์แบตเตอรี่ที่มีพิกัดแรงดัน 3.2 V, 80 Ah ดังข้อมูลในตารางที่ 5.2 โดยนำแต่ละเซลล์มาต่อเชื่อมกันเป็นโมดูล ซึ่งใน 1 โมดูลจะมีเซลล์แบตเตอรี่จำนวน 6 เซลล์มาต่ออนุกรมกัน และต่อขนานกันเป็น 2 แถว โดย 1 โมดูลจะมีแรงดันเท่ากับ 19.2 V, 160 Ah จากนั้นนำแต่ละโมดูลมาต่ออนุกรมกันจำนวน 39 โมดูลเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบไมโครกริด โดยแบตเตอรี่จะมีแรงดัน 748.8 V, 160 Ah และมีความจุไฟฟ้าเท่ากับ 120 kWh แต่นำมาใช้ที่ 100 kWh [1] โดยโครงสร้างส่วนประกอบของแบตเตอรี่สรุปได้ดังรูปที่ 5.9 ดังนั้นการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 100 kW จากความจุ 100 kWh คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 1C rate จากการศึกษาสมมูลกำลังไฟฟ้าของระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดดระหว่างแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดแล้ว พบว่าในช่วงเช้า (6.00 – 7.00 น.) ซึ่งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เพิ่งเริ่มผลิตกำลังไฟฟ้าได้เล็กน้อย กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด โดยเฉพาะในช่วงที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำไม่จ่ายกำลังไฟฟ้าจะขาดกำลังไฟฟ้าประมาณ 150 – 160 kW ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้แบตเตอรี่ทำงานจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าที่ 2C rate (200 kW) เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลด

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดเซลล์แบตเตอรี่

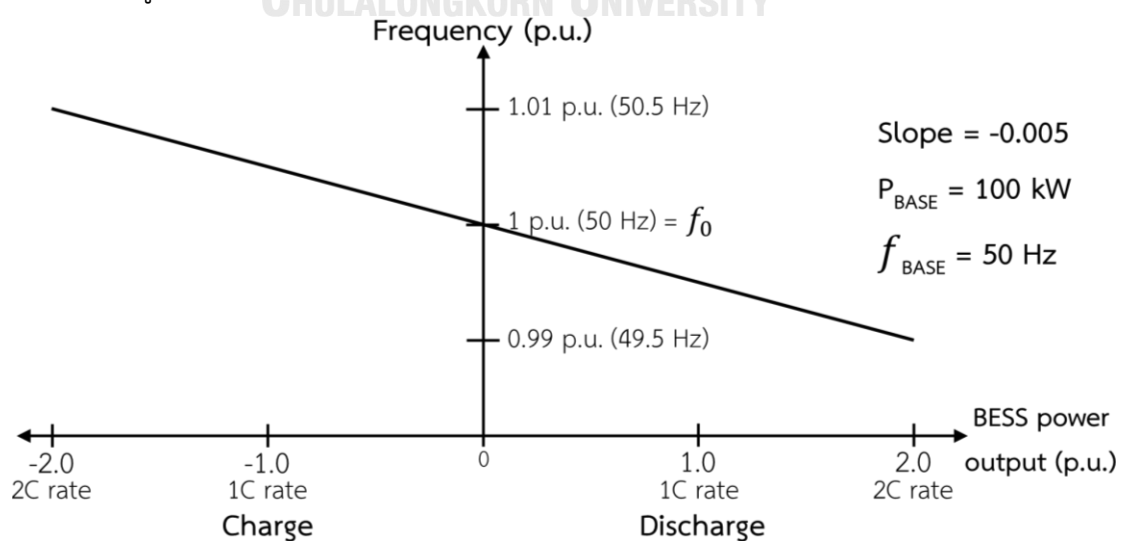
รายละเอียด	ค่าของเซลล์แบตเตอรี่
Rated voltage	3.2 V
Rated capacity	80 Ah
Discharge current	80 A (Standard)
Discharge current	240 A (Continuous)
Charge current	80 A (Standard)
Charge current	160 A (Maximum)
Charge voltage	3.65 V (Limit)
Cut-off voltage	2.5 V
Impedance	$\leq 1.0 \text{ m}\Omega$



รูปที่ 5.9 โครงสร้างส่วนประกอบของแบตเตอรี่

5.2.4.2 การควบคุมความถี่ไฟฟ้า

การควบคุมความถี่โดยทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสจะใช้การควบคุมแบบรูป (ภาคผนวก ง) คือ เมื่อความถี่ของระบบไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าความถี่เบี่ยงเบนเกิดขึ้น โดยความถี่เบี่ยงเบนนี้จะไปปรับระดับการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มากขึ้นหรือน้อยลงตามกราฟคุณลักษณะการทำงานของรูป (Droop Characteristics) เพื่อควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า ซึ่งการควบคุมแบบรูปจะนำมาใช้กับอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อให้ช่วยรักษาความถี่ให้อยู่ในมาตรฐาน โดยกราฟคุณลักษณะรูปของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะมีส่วนควบคุมให้มีการรับกำลังไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ด้วย ดังแสดงกราฟคุณลักษณะรูปของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ซึ่งทำงานจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าที่ 2C rate ในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 กราฟคุณลักษณะรูปของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า

5.2.4.3 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าโดยทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส แรงดันของระบบไฟฟ้าจะเกิดจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดอาเมเจอร์ที่อยู่ทางฝั่งสเตเตอร์ ซึ่งถูกกระตุ้นโดยขดลวดสนามที่อยู่ทางฝั่งโรเตอร์ (ภาคผนวก ง) โดยเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในระบบ ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (AVR) จะสั่งการให้ตัวกระตุ้น (Exciter) ทำหน้าที่ขยายหรือลดแรงดันขดลวดสนามเพื่อควบคุมแรงดันของระบบไฟฟ้า

5.3 ผลการจำลองการทำงานของระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดด

การจำลองการทำงานแบบ RMS เพื่อดูผลตอบสนองทางพลวัต (Dynamic) ของระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดด เพื่อพิจารณาความเบี่ยงเบนความถี่และแรงดันไฟฟ้าที่มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด และความผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบก็เก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่ทำงานเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อควบคุมความถี่ และแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยความเบี่ยงเบนแรงดันและความถี่ไฟฟ้ามามีวิธีพิจารณาดังนี้

1) การพิจารณาความเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าจะคิดในหน่วย p.u. โดยค่าความเบี่ยงเบนแรงดัน (Δv) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1 ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ความเบี่ยงเบนจะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง ± 0.05 p.u.

$$\Delta v = v_0 - v_{sys} \quad (5.1)$$

โดย Δv = ค่าความเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้า

v_0 = ค่าแรงดันไฟฟ้าปกติ (1 p.u.)

v_{sys} = ค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบที่จุด PCC

2) การพิจารณาความเบี่ยงเบนความถี่ไฟฟ้าจะคิดในหน่วยเฮิรตซ์ โดยค่าความเบี่ยงเบนความถี่ (Δf) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.2 ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ความเบี่ยงเบนจะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง ± 0.5 Hz

$$\Delta f = f_0 - f_{sys} \quad (5.2)$$

โดย Δf = ค่าความเบี่ยงเบนความถี่ไฟฟ้า

f_0 = ค่าความถี่ไฟฟ้าปกติ (50 Hz)

f_{sys} = ค่าความถี่ไฟฟ้าของระบบที่จุด PCC

เพื่อศึกษาแรงดันและความถี่เบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นจากความผันผวนขององค์ประกอบในไมโครกริดในการศึกษาจึงเลือกใช้ข้อมูลค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตามข้อมูลการกำลังการผลิตในหัวข้อที่ 5.4 และข้อมูลการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำที่ในแต่ละช่วงของปีจะผลิตกำลังไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันจึงถือเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความผันผวนจากข้อมูลการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำจึงเลือกข้อมูลค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้แตกต่างกัน 3 ค่ามาศึกษา ดังนี้

- 1) โรงไฟฟ้าพลังน้ำไม่จ่ายกำลังไฟฟ้า (0 kW) ในช่วงที่ไม่มีน้ำกักเก็บ
- 2) โรงไฟฟ้าพลังน้ำจ่ายกำลังไฟฟ้า 25 kW
- 3) โรงไฟฟ้าพลังน้ำจ่ายกำลังไฟฟ้า 55 kW

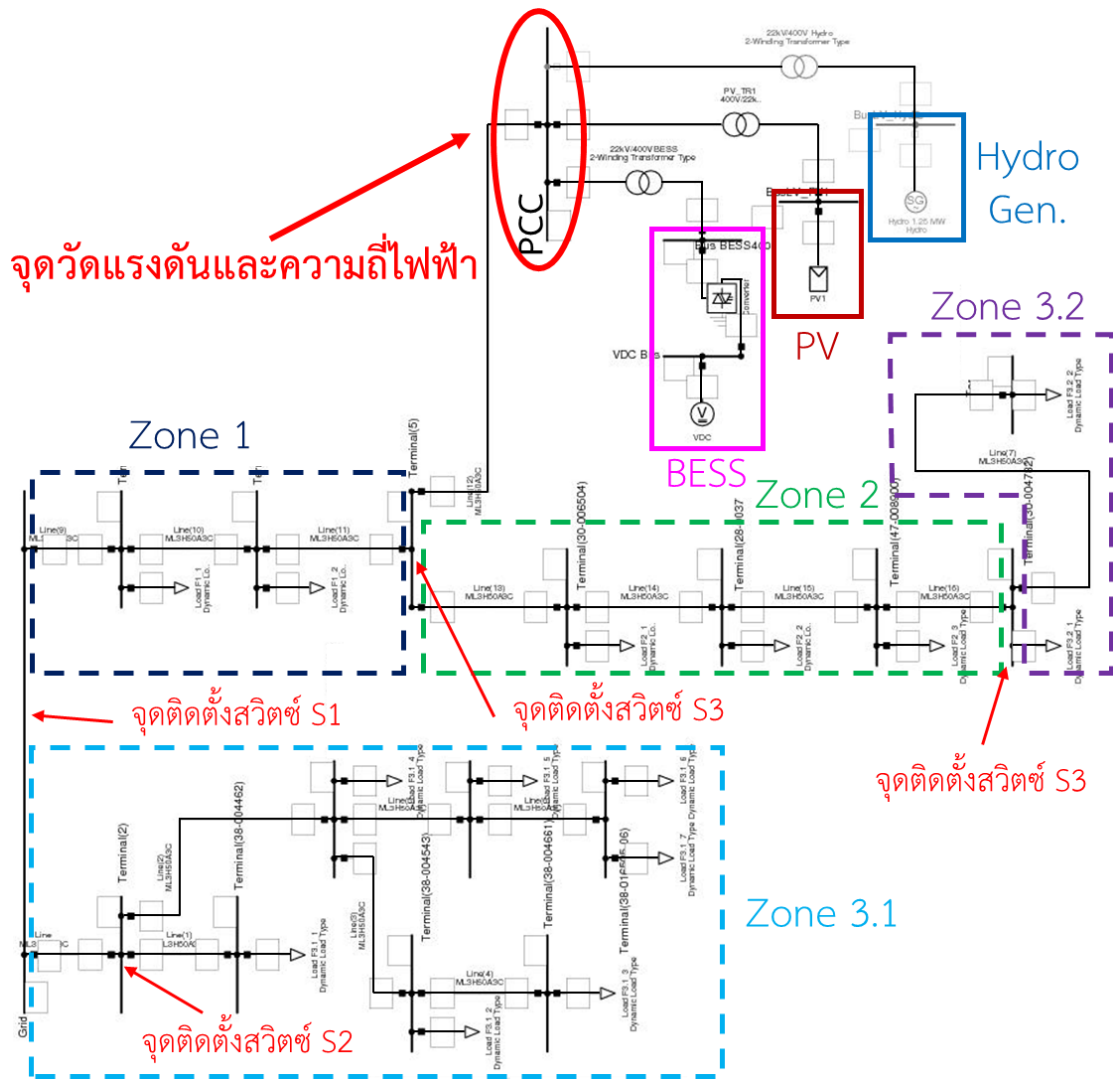
การจำลองระบบศึกษากรณีที่กำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับกำลังการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ จึงสรุปเป็นกรณีศึกษาได้ทั้งหมด 3 กรณี ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 5.3 โดยจำลองระบบตั้งแต่วันที่ 0:00 – 24:00 น. รวมเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และให้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ทำงานในการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าที่ 2C rate แบบจำลองระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดสำหรับใช้ในการจำลองระบบแสดงในรูปที่ 5.11 และกำหนดค่าตัวแปรสำหรับอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในแบบจำลอง ตามข้อมูลในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 รายละเอียดการทำงานของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในแต่ละกรณีศึกษา

กรณี	ความผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	ค่ากำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำ (kW)	กำลังไฟฟ้าของโหลด
1	พิจารณาตามข้อมูลกำลังการผลิตในรูปที่ 5.6	0	พิจารณาตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด ดังข้อมูลในรูปที่ 5.1
2		25	
3		55	

ตารางที่ 5.4 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT Powerfactory

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
ความถี่อ้างอิง (f_{ref})	1	ลักษณะสมบัตินิรนาม	0.01
โหลดอ้างอิง (L_{ref})	1		
ความเฉื่อยทางกล (M)	1.5	การหน่วงของโหลด (D)	5



รูปที่ 5.11 แบบจำลองระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดดสำหรับใช้ในกรณีศึกษา

5.3.1 ผลการจำลองระบบ ในกรณีโรงไฟฟ้าพลังน้ำไม่จ่ายกำลังผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ

(กรณีศึกษาที่ 1)

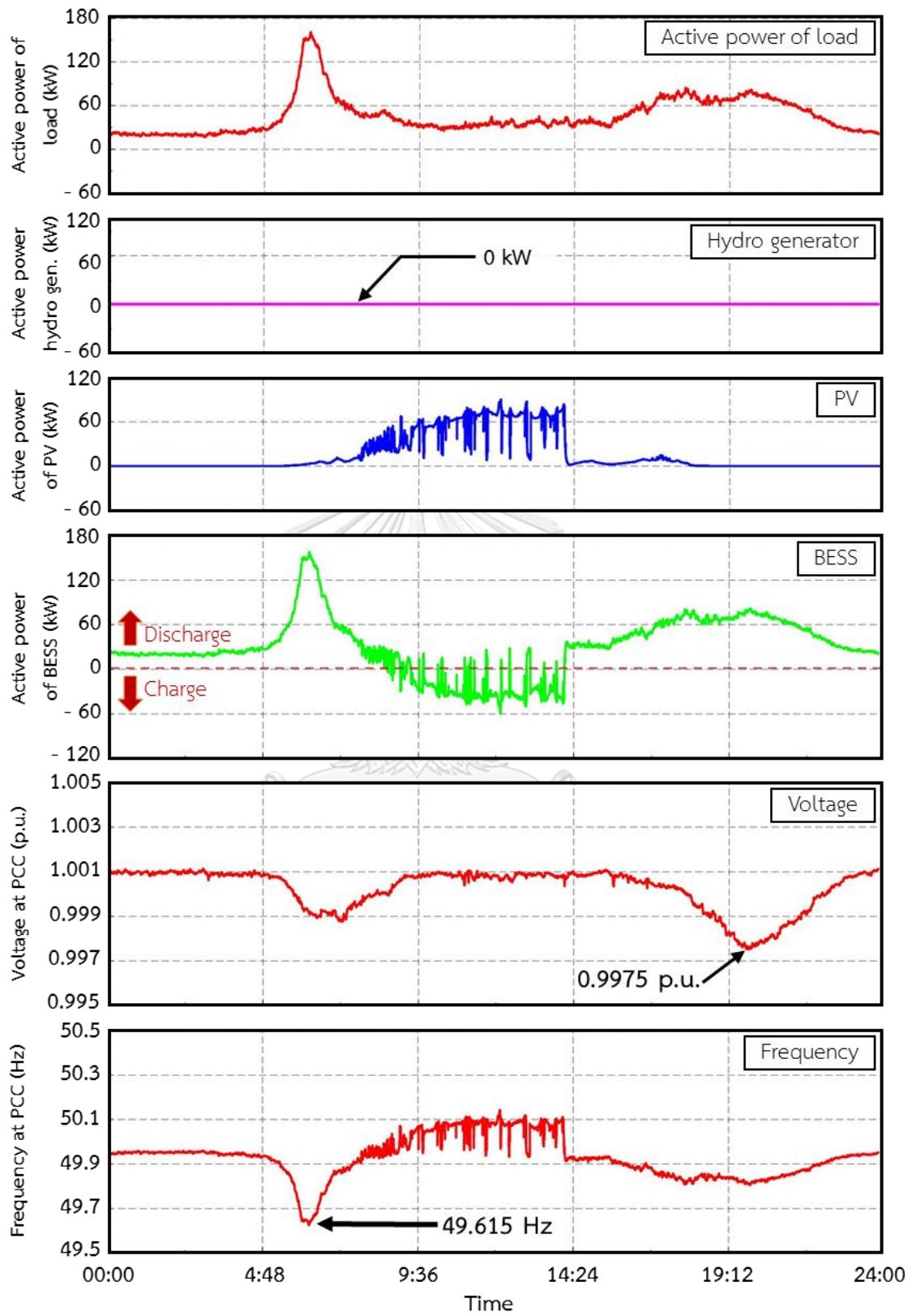
ผลการของระบบในด้านแรงดันไฟฟ้าพบว่า ที่จุดต่อร่วม (PCC) มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดอยู่ที่ 0.9975 p.u. คิดเป็นค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ +0.0025 p.u. ดังแสดงผลการจำลองระบบในรูปที่ 5.12 โดยในเวลาเช้าและเย็นโหลดมีการรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมากส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าวที่มีค่าต่ำ ในกรณีศึกษานี้ได้วัดค่าแรงดันที่จุด PCC เปรียบเทียบกับจุดที่ติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 – S4 เพื่อศึกษาค่าแรงดันในจุดต่างๆ ในระบบไมโครกริด เนื่องจากแรงดันจะแปรผันตามความต้านทานของสายส่งและค่ากำลังรีแอกทีฟ โดยผลการศึกษาพบว่า ที่จุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S4 ซึ่งอยู่ไกลจากจุด PCC มากที่สุดมีแรงดันตกมากที่สุด และแรงดันในจุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S3 ซึ่งอยู่ใกล้จุด PCC มากที่สุดมีแรงดันตกน้อยที่สุด แต่แรงดันทั้งสองจุดยังไม่เกิน

ค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงสรุปได้ว่าแรงดันไฟฟ้าในจุดที่ยิ่งไกลจากจุด PCC แรงดันจะตกลงมากที่สุด และแรงดันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ใกล้จุด PCC ดังแสดงผลการศึกษาเรื่องแรงดันในจุดต่างๆ ในรูปที่ 5.13 และผลการจำลองระบบในด้านความถี่ไฟฟ้าพบว่า ที่จุดต่อร่วม (PCC) ความถี่ไฟฟ้าต่ำสุดอยู่ที่ 49.615 Hz คิดเป็นค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ +0.385 Hz ดังแสดงผลการจำลองระบบในรูปที่ 5.12 ในส่วนความถี่ไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามการควบคุมแบบดรูปกำลัง – ความถี่ โดยในช่วงที่ยังคืนถึงเข้าระบบ กักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลด ซึ่งเมื่อพิจารณาตามการควบคุมแบบดรูปส่งผลให้ความถี่ต่ำลง เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เริ่มผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจนถึงช่วงเย็น ทำให้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยลง ซึ่งในช่วงเวลานี้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะมีส่วนในการช่วยชดเชยความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์คือ ในช่วงที่กำลังไฟฟ้าเกินความต้องการของโหลด จะรับกำลังไฟฟ้าเข้ามาชาร์จแบตเตอรี่เพื่อใช้ในช่วงเย็นต่อไป ส่วนในช่วงที่กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าความต้องการของโหลดระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จ่ายกำลังชดเชยจนพอดีกับความต้องการของโหลด ซึ่งเมื่อพิจารณาตามการควบคุมแบบดรูปในช่วงเวลาเช้าถึงเย็นความถี่ในช่วงนี้จะผันผวนตามการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยเมื่อเริ่มจ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยลงความถี่จะเริ่มสูงขึ้นจนสูงที่สุดในช่วงที่รับกำลังไฟฟ้าและเริ่มลดลงในช่วงเย็นที่จ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้น แต่จะมีบางเวลาที่ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชยในช่วงนี้ความถี่จะ ตกลงช่วงสั้นๆ เมื่อถึงช่วงเวลาเย็นถึงเที่ยงคืนจะมีเพียงระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดจากกำลังไฟฟ้าที่ได้ชาร์จไว้ในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเมื่อพิจารณาตามการควบคุมแบบดรูปส่งผลให้ความถี่ต่ำลงอีกครั้ง โดยรูปที่ 5.14 แสดงการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในการช่วยชดเชยความผันผวนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยในช่วงเวลา 11:42:40 – 11:42:50 น. เป็นช่วงที่เกิดความผันผวนราย 10 วินาที สูงที่สุดคือ 62.22 kW ซึ่งระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะทำงาน โดยรับกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เกินจากการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากักเก็บไว้ ซึ่งการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ตามการควบคุมแบบดรูปกำลัง – ความถี่จะช่วยรักษาความถี่ให้ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยส่งผลให้ความถี่ช่วงดังกล่าวจะสูงขึ้น

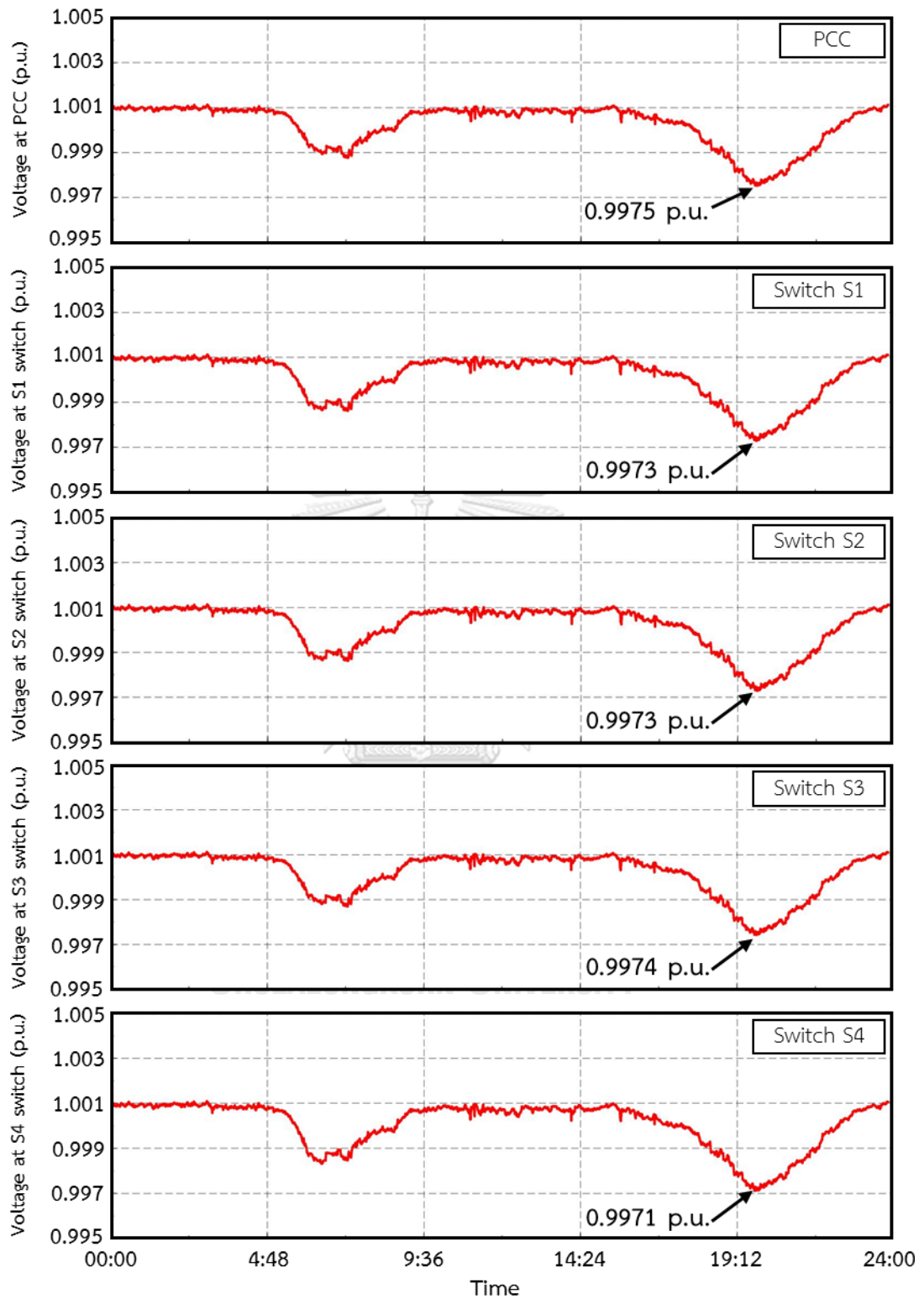
รูปที่ 5.15 แสดงจุดการทำงานของเวลาที่เกิดความเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดในกราฟคุณลักษณะสมบัติดรูปกำลัง – ความถี่ที่ได้ตั้งไว้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองระบบในส่วนที่กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และความถี่ของระบบที่ได้พบว่า มีความสอดคล้องกันซึ่งแสดงให้เห็นว่า การควบคุมระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้มีคุณลักษณะ

เสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง และสามารถช่วยรักษาคุณภาพ
ความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้

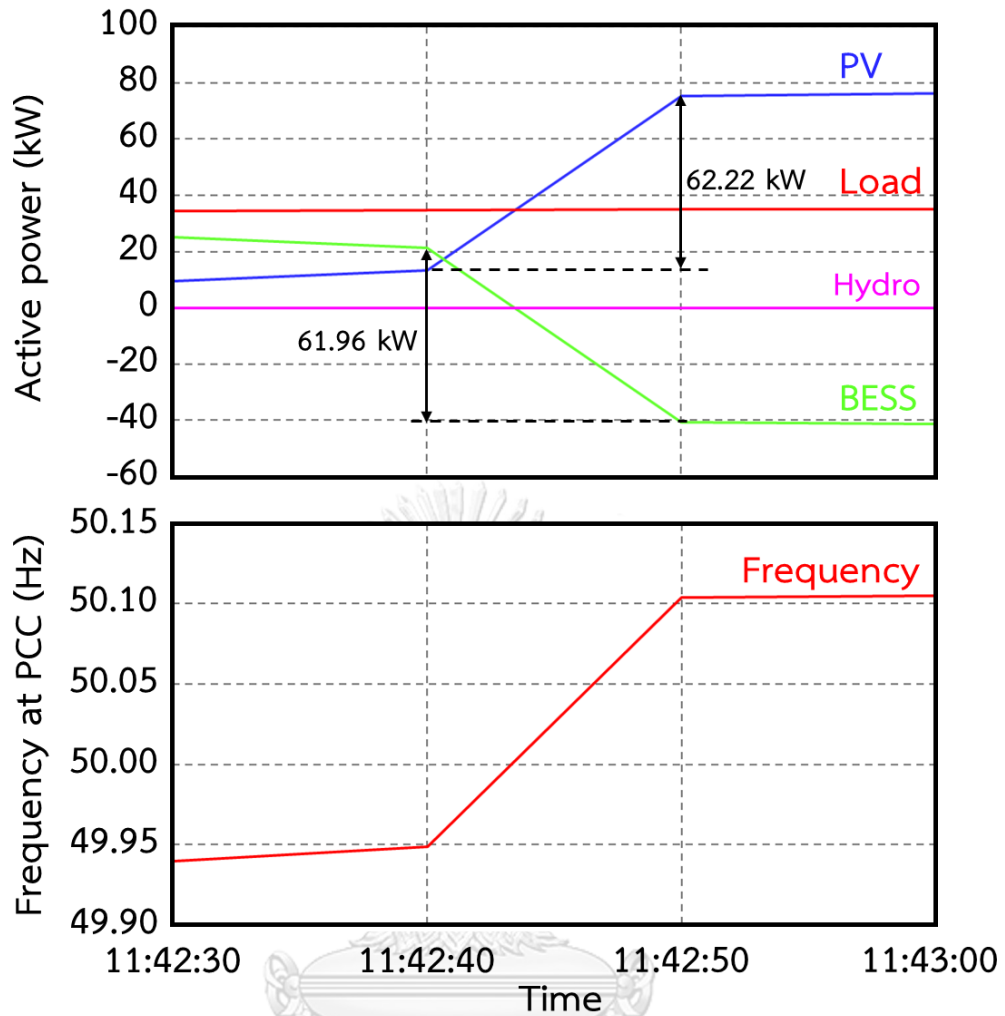




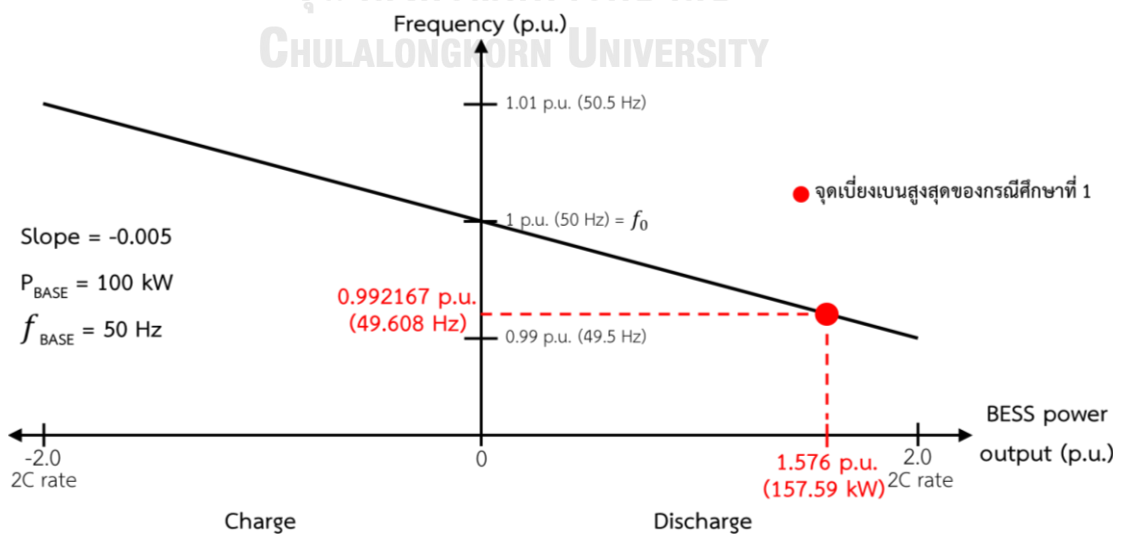
รูปที่ 5.12 ผลการจำลองระบบของกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ 5.13 แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และจุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 - S4 ของกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ 5.14 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อช่วยชดเชยความผันผวนของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของกรณีสึกษาที่ 1



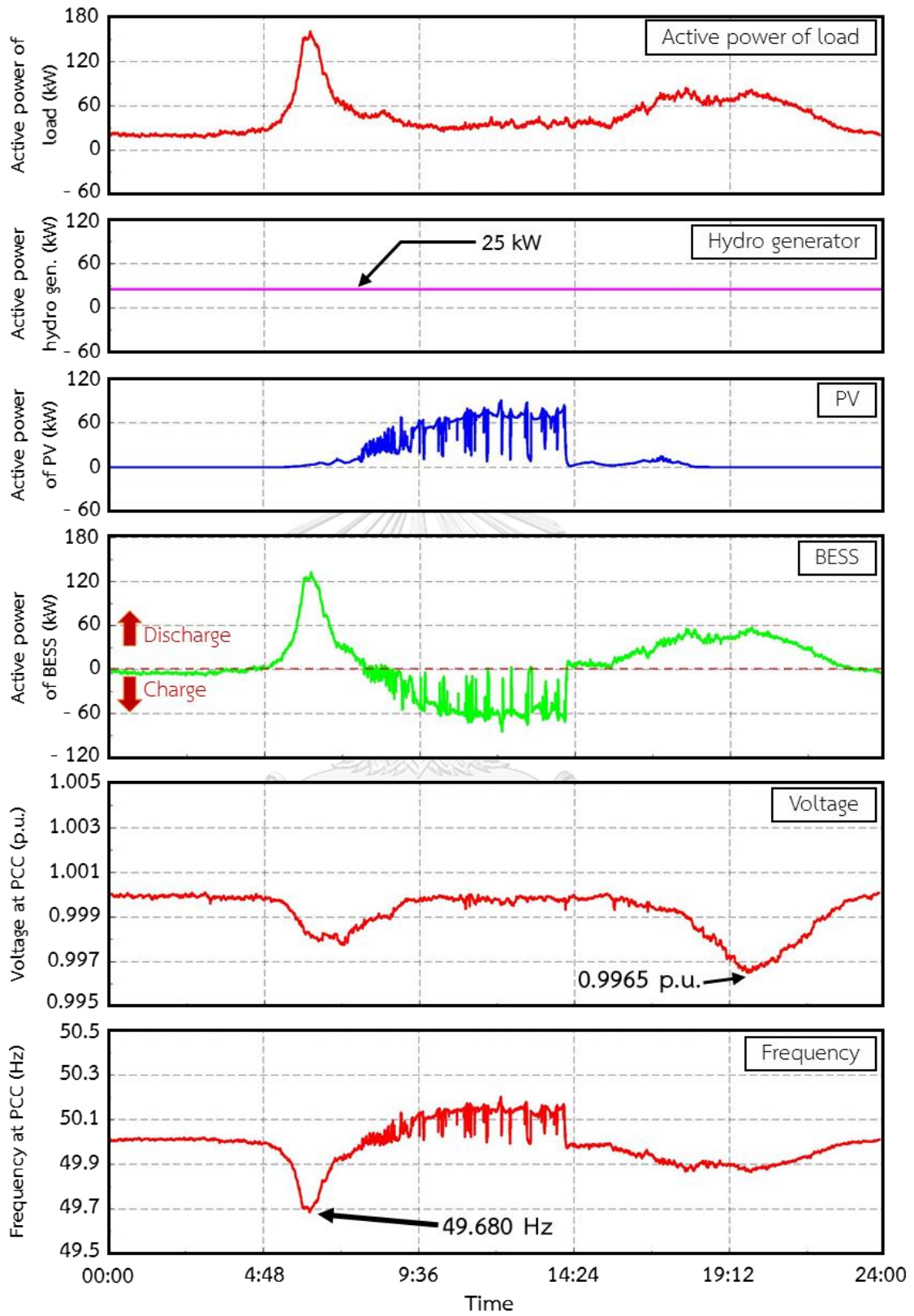
รูปที่ 5.15 จุดทำงานที่เกิดความเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดในกราฟคุณลักษณะรูปของกรณีสึกษาที่ 1

5.3.2 ผลการจำลองระบบ ในกรณีโรงไฟฟ้าพลังน้ำจ่ายกำลังผลิตไฟฟ้า 25 กิโลวัตต์เข้าสู่ระบบ (กรณีศึกษาที่ 2)

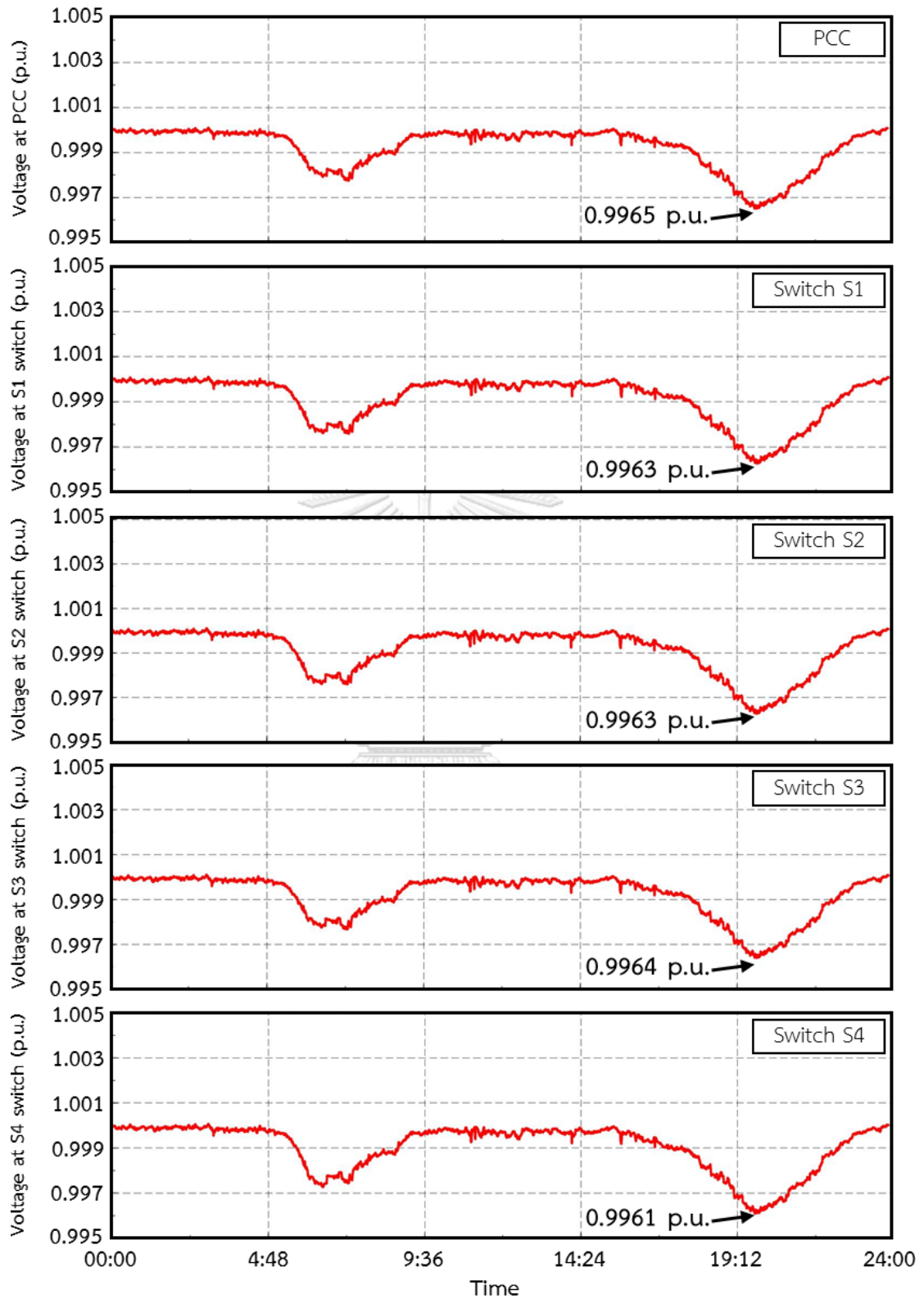
ผลการของระบบในด้านแรงดันไฟฟ้าพบว่า ที่จุดต่อร่วม (PCC) มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดอยู่ที่ 0.9965 p.u. คิดเป็นค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ +0.0035 p.u. ดังแสดงผลการจำลองระบบในรูปที่ 5.16 โดยแรงดันของกรณีศึกษาที่ 2 มีลักษณะเหมือนกับกรณีศึกษาที่ 1 แต่มีค่าต่ำลงเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการรับกำลังไฟฟ้านี้แอกทีฟ ในกรณีศึกษานี้ได้วัดค่าแรงดันที่จุด PCC เปรียบเทียบกับจุดที่ติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 – S4 เพื่อศึกษาค่าแรงดันในจุดต่างๆ ในระบบไมโครกริด เนื่องจากแรงดันจะแปรผันตามความต้านทานของสายส่งและค่ากำลังรีแอกทีฟ โดยผลการศึกษาพบว่า ที่จุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S4 ซึ่งอยู่ไกลจากจุด PCC มากที่สุดมีแรงดันตกมากที่สุด และแรงดันในจุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S3 ซึ่งอยู่ใกล้จุด PCC มากที่สุดมีแรงดันตกน้อยที่สุด แต่แรงดันทั้งสองจุดยังไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงสรุปได้ว่าแรงดันไฟฟ้าในจุดที่ยังไกลจากจุด PCC แรงดันจะตกลงมากที่สุด และแรงดันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ใกล้จุด PCC ดังแสดงผลการศึกษาเรื่องแรงดันในจุดต่างๆ ในรูปที่ 5.17 และผลการจำลองระบบในด้านความถี่ไฟฟ้าพบว่า ที่จุดต่อร่วม (PCC) ความถี่ไฟฟ้าต่ำสุดอยู่ที่ 49.680 Hz คิดเป็นค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ +0.320 Hz ดังแสดงผลการจำลองระบบในรูปที่ 5.16 ในส่วนความถี่ไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามการควบคุมแบบรูปกำลัง – ความถี่ โดยในช่วงเที่ยงคืนถึงเช้าระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะรับกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ซึ่งโรงไฟฟ้าพลังน้ำผลิตเกินจากความต้องการโหลดเล็กน้อย ซึ่งเมื่อพิจารณาตามการควบคุมแบบรูปส่งผลให้ความถี่สูงกว่าค่ามาตรฐานเล็กน้อย จนถึงช่วงเช้า (5:00 – 7:00 น.) โหลดมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูง ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จึงเปลี่ยนมาเป็นจ่ายกำลังไฟฟ้าในส่วนเกินจากที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำผลิต ส่งผลให้ความถี่ระบบในช่วงนี้ต่ำลงตามการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เริ่มผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจนถึงช่วงเย็น ทำให้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้าไฟฟ้าเข้ามาชาร์จแบตเตอรี่เพื่อใช้ในช่วงเย็นต่อไป ซึ่งในช่วงเวลานี้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้าที่มีความผันผวนมาก ซึ่งเมื่อพิจารณาตามการควบคุมแบบรูปในช่วงเวลาเช้าถึงเย็นนี้ความถี่ในช่วงนี้จะผันผวนตามการรับกำลังไฟฟ้าน้อยของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยช่วงที่รับกำลังไฟฟ้ามากความถี่จะสูง ในขณะที่รับกำลังไฟฟ้าน้อยความถี่จะต่ำลง เมื่อถึงช่วงเวลากลางคืนถึงเที่ยงคืนระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดจากกำลังไฟฟ้าที่ได้ชาร์จไว้ในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเมื่อพิจารณาตามการควบคุมแบบรูปส่งผลให้ความถี่ต่ำลงอีกครั้ง

รูปที่ 5.18 แสดงการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในการช่วยชดเชยความผันผวนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยในช่วงเวลา 11:42:40 – 11:42:50 น. เป็นช่วงที่เกิดความผันผวนราย 10 วินาทีสูงที่สุดคือ 62.22 kW ซึ่งระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะทำงาน โดยรับกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เกินจากการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากักเก็บไว้ ซึ่งในกรณีศึกษาที่ 2 ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้ามากกว่ากำลังมากกว่ากรณีศึกษาที่ 1 เนื่องจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าระบบ จากการควบคุมแบบตรูปกำลัง – ความถี่ โดยระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะรับกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลความถี่มีค่าสูงขึ้นจากกรณีศึกษาที่ 1 แต่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

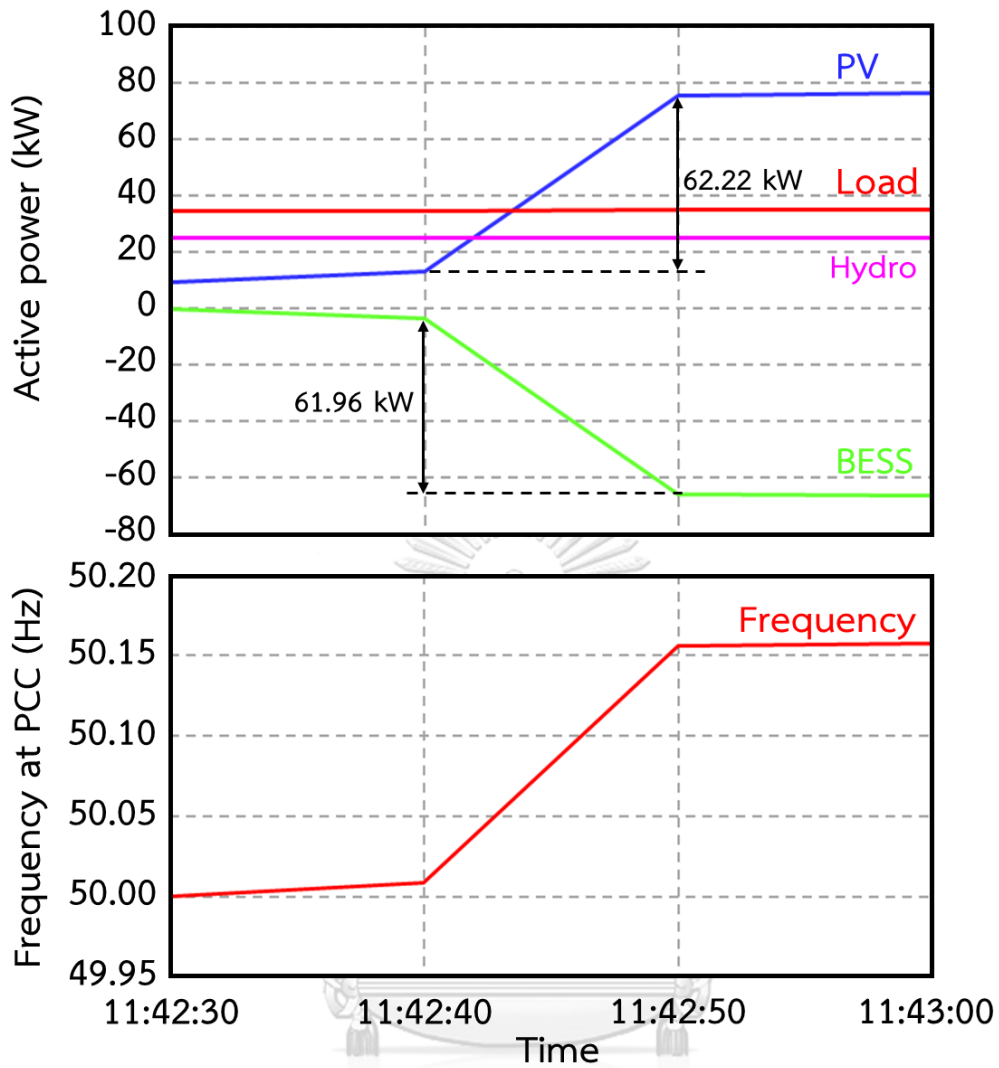
รูปที่ 5.19 แสดงจุดการทำงานของเวลาที่เกิดความเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดในกราฟคุณลักษณะสมบัติรูปกำลัง – ความถี่ที่ได้ตั้งไว้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองระบบในส่วนของกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และความถี่ของระบบที่ได้พบว่า มีความสอดคล้องกันซึ่งแสดงให้เห็นว่า การควบคุมระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้มีคุณลักษณะเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง และสามารถช่วยรักษาคุณภาพความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้



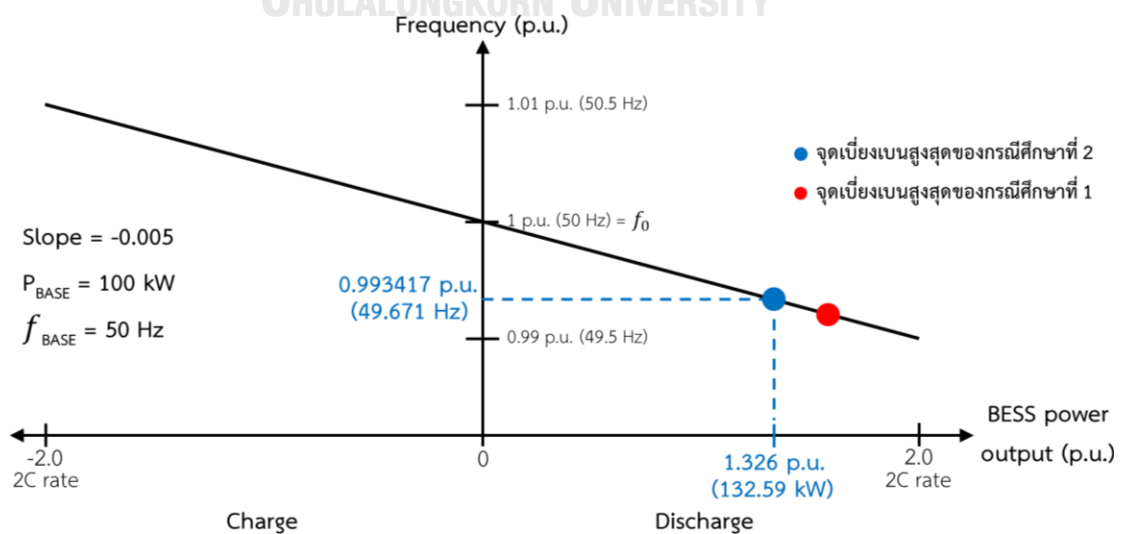
รูปที่ 5.16 ผลการจำลองระบบของกรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ 5.17 แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และจุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 - S4 ของกรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ 5.18 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อช่วยชดเชยความผันผวนของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของกรณีสึกษาที่ 2



รูปที่ 5.19 จุดทำงานที่เกิดความเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดในกราฟคุณลักษณะรูปของกรณีสึกษาที่ 2

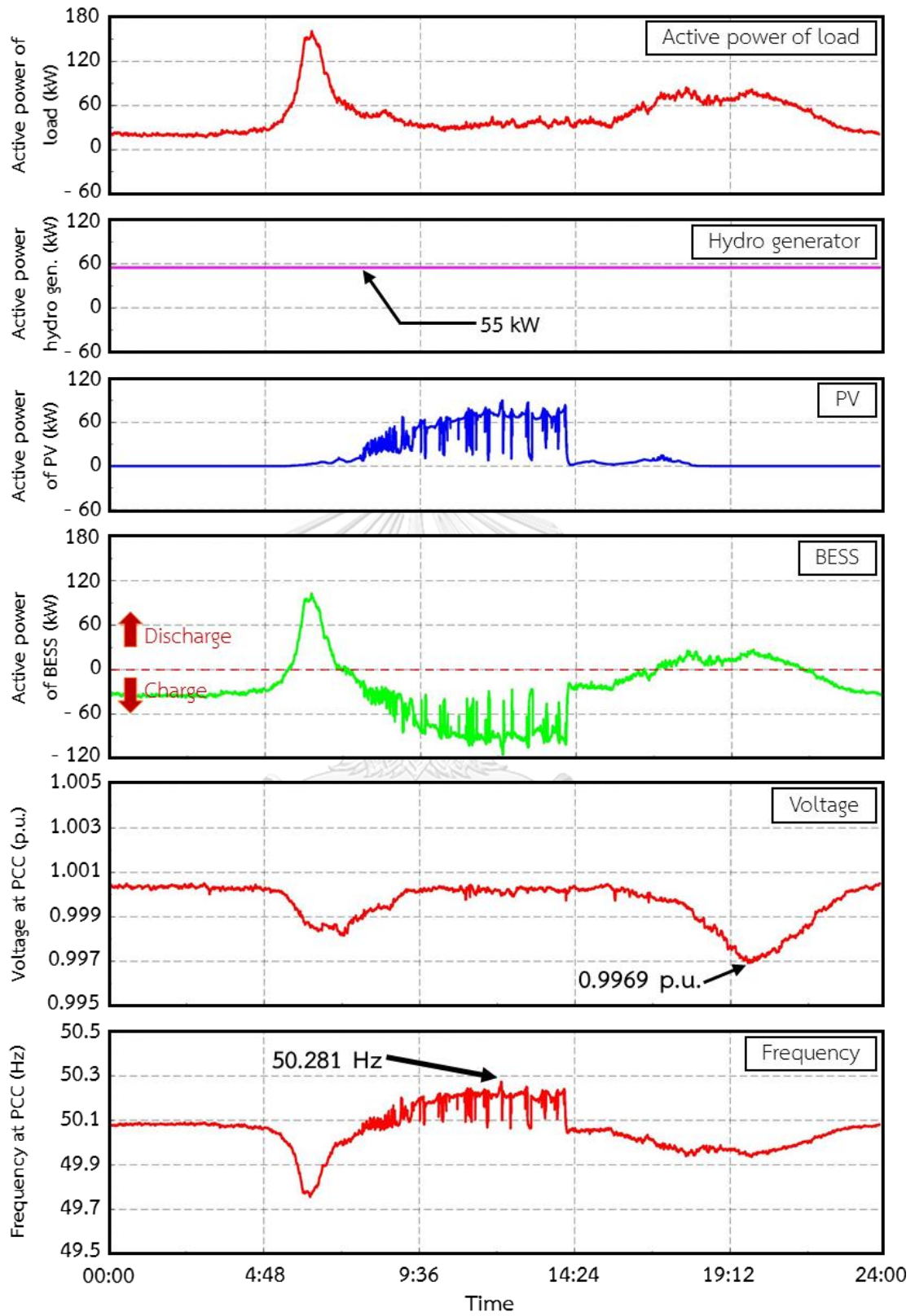
5.3.3 ผลการจำลองระบบ ในกรณีโรงไฟฟ้าพลังน้ำจ่ายกำลังผลิตไฟฟ้า 55 กิโลวัตต์เข้าสู่ระบบ (กรณีศึกษาที่ 3)

ผลการของระบบในด้านแรงดันไฟฟ้าพบว่า ที่จุดต่อร่วม (PCC) มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดอยู่ที่ 0.9969 p.u. คิดเป็นค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ +0.0031 p.u. ดังแสดงผลการจำลองระบบในรูปที่ 5.20 โดยแรงดันของกรณีศึกษาที่ 2 มีลักษณะเหมือนกับกรณีศึกษาที่ 1 แต่มีค่าต่ำลงเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการรับกำลังไฟฟ้านี้แอกทีฟ ในกรณีศึกษานี้ได้วัดค่าแรงดันที่จุด PCC เปรียบเทียบกับจุดที่ติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 – S4 เพื่อศึกษาค่าแรงดันในจุดต่างๆ ในระบบไมโครกริด เนื่องจากแรงดันจะแปรผันตามความต้านทานของสายส่งและค่ากำลังรีแอกทีฟ โดยผลการศึกษาพบว่า ที่จุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S4 ซึ่งอยู่ไกลจากจุด PCC มากที่สุดมีแรงดันตกมากที่สุด และแรงดันในจุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S3 ซึ่งอยู่ใกล้จุด PCC มากที่สุดมีแรงดันตกน้อยที่สุด แต่แรงดันทั้งสองจุดยังไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงสรุปได้ว่าแรงดันไฟฟ้าในจุดที่ยังไกลจากจุด PCC แรงดันจะตกลงมากที่สุด และแรงดันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ใกล้จุด PCC ดังแสดงผลการศึกษาเรื่องแรงดันในจุดต่างๆ ในรูปที่ 5.21 และผลการจำลองระบบในด้านความถี่ไฟฟ้าพบว่า ที่จุดต่อร่วม (PCC) ความถี่ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 50.281 Hz คิดเป็นค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ -0.281 Hz ดังแสดงผลการจำลองระบบในรูปที่ 5.20 ในส่วนความถี่ไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามการควบคุมแบบรูปกำลัง – ความถี่ โดยในช่วงเที่ยงคืนถึงเช้าระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะรับกำลังไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาตามการควบคุมแบบรูปส่งผลให้ความถี่สูงกว่าค่ามาตรฐานจนถึงช่วงเช้า (6:00 – 7:00 น.) โหลดมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงกว่าที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำผลิตได้ ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จึงเปลี่ยนมาเป็นจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลด ส่งผลให้ความถี่ระบบในช่วงนี้ต่ำลงตามการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เริ่มผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจนถึงช่วงเย็น ทำให้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้าไฟฟ้าเข้ามาชาร์จแบตเตอรี่เพื่อใช้ในช่วงเย็นต่อไป ซึ่งในช่วงเวลานี้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความผันผวนมาก ซึ่งเมื่อพิจารณาตามการควบคุมแบบรูปในช่วงเวลาดังกล่าว ความถี่ในช่วงนี้จะผันผวนตามการรับกำลังไฟฟ้ามาของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยช่วงที่รับกำลังไฟฟ้ามากความถี่จะสูง ในขณะที่ช่วงที่รับกำลังไฟฟ้าน้อยความถี่จะต่ำลงเมื่อถึงเวลาเย็นถึงเที่ยงคืนระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ก็ยังคงรับกำลังไฟฟ้าเข้ามาชาร์จแบตเตอรี่อยู่ ยกเว้นในช่วงเวลา 19:00 – 21:00 น. ความต้องการกำลังไฟฟ้าจะสูงกว่าที่โรงไฟฟ้า

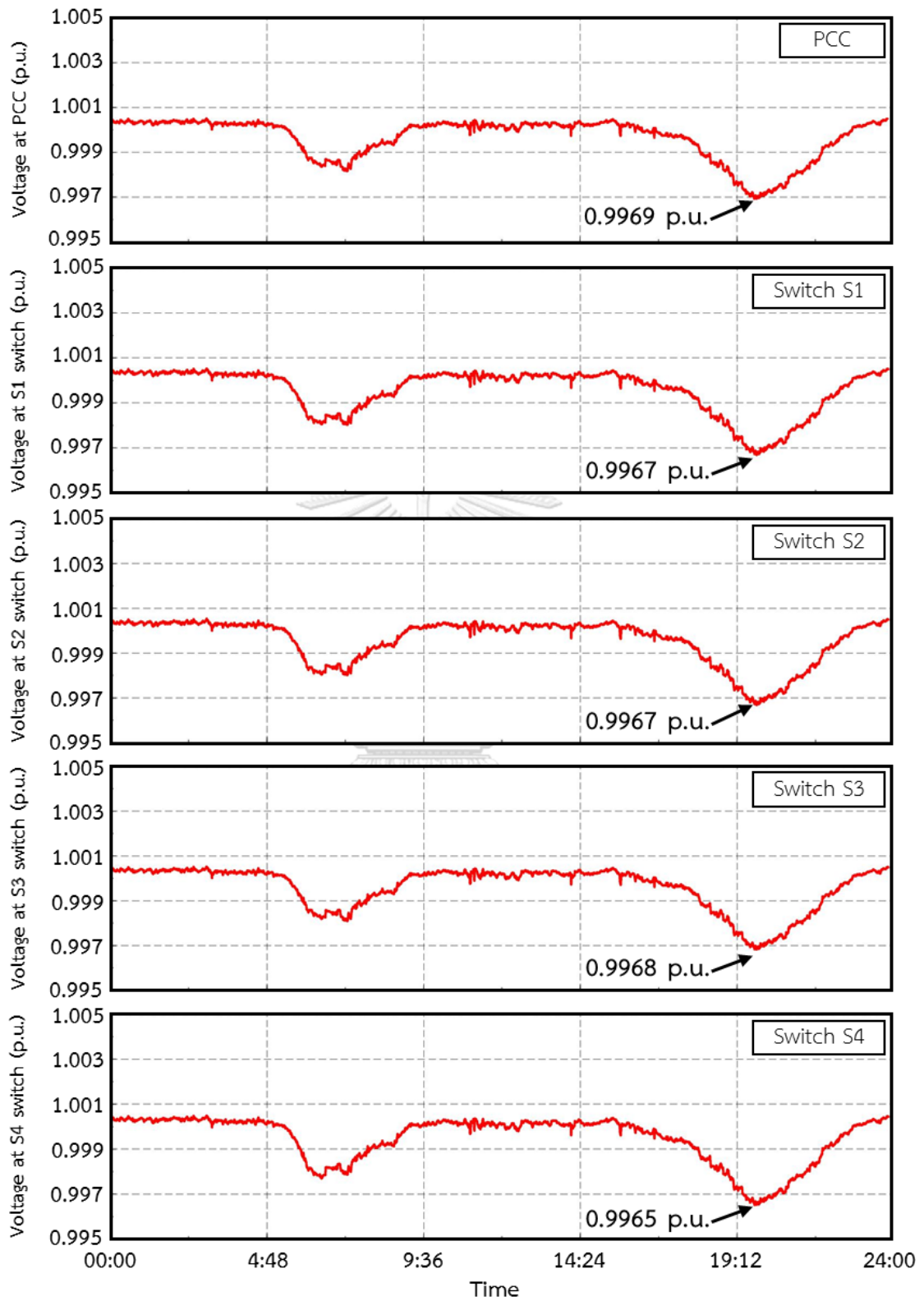
พลังน้ำผลิตได้เล็กน้อย ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะกลับมาจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบอีกครั้ง ซึ่งเมื่อพิจารณาตามการควบคุมแบบครูปส่งผลให้ความถี่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานเล็กน้อย

รูปที่ 5.22 แสดงการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในการช่วยชดเชยความผันผวนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยในช่วงเวลา 11:42:40 – 11:42:50 น. เป็นช่วงที่เกิดความผันผวนราย 10 วินาทีสูงที่สุดคือ 62.22 kW ซึ่งระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะทำงาน โดยรับกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เกินจากการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากักเก็บไว้ ซึ่งในกรณีศึกษาที่ 3 ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้ามากกว่ากำลังมากกว่ากรณีศึกษาที่ 3 เนื่องจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าระบบมากกว่าจากการควบคุมแบบครูปกำลัง – ความถี่ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะรับกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นส่งผลความถี่มีค่าสูงขึ้นจากกรณีศึกษาที่ 2 แต่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

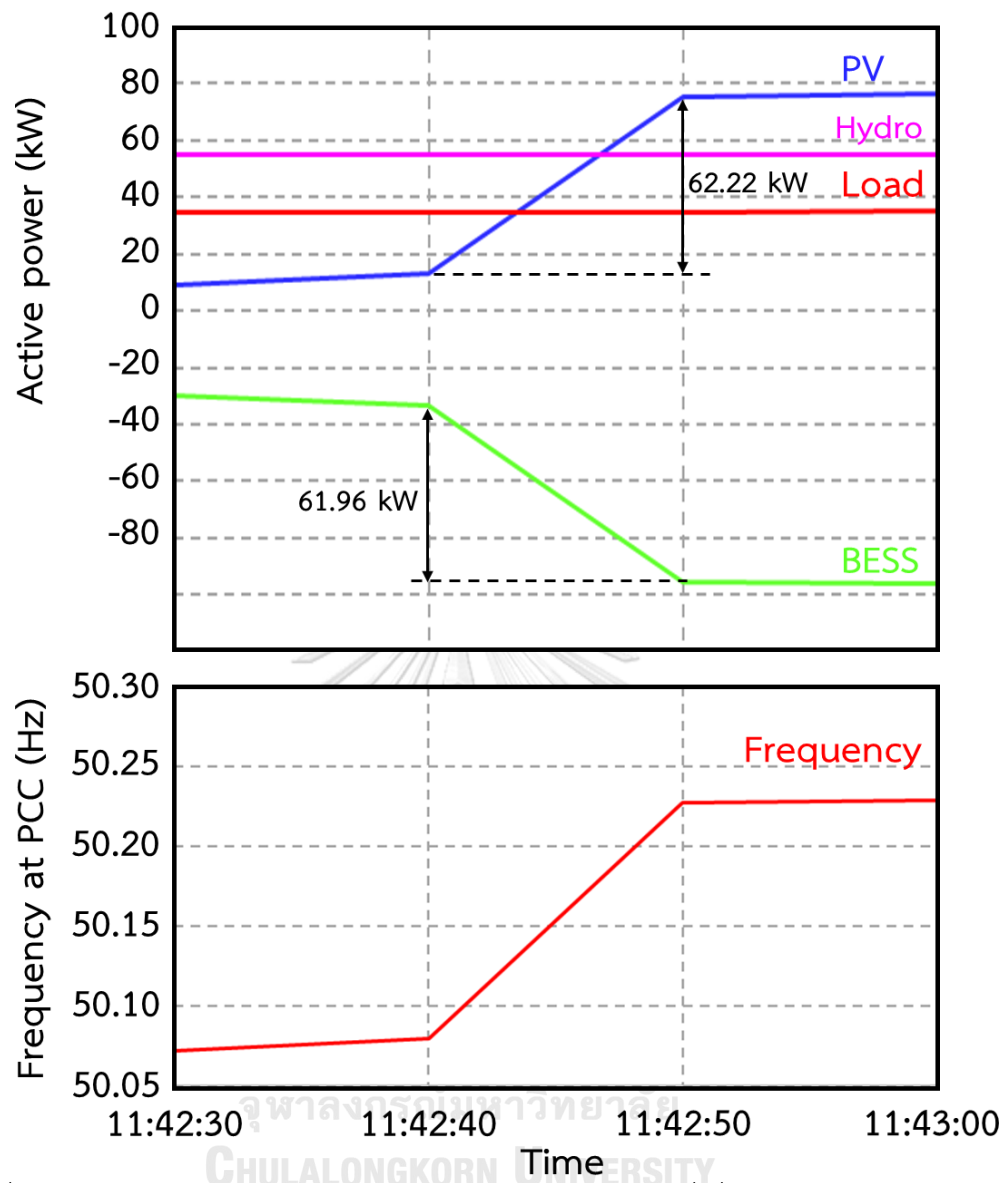
รูปที่ 5.23 แสดงจุดการทำงานของเวลาที่เกิดความเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดในกราฟคุณลักษณะสมบัติรูปกำลัง – ความถี่ที่ได้ตั้งไว้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองระบบในส่วนของกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และความถี่ของระบบที่ได้พบว่า มีความสอดคล้องกันซึ่งแสดงให้เห็นว่า การควบคุมระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้มีคุณลักษณะเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง และสามารถช่วยรักษาคุณภาพและความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้



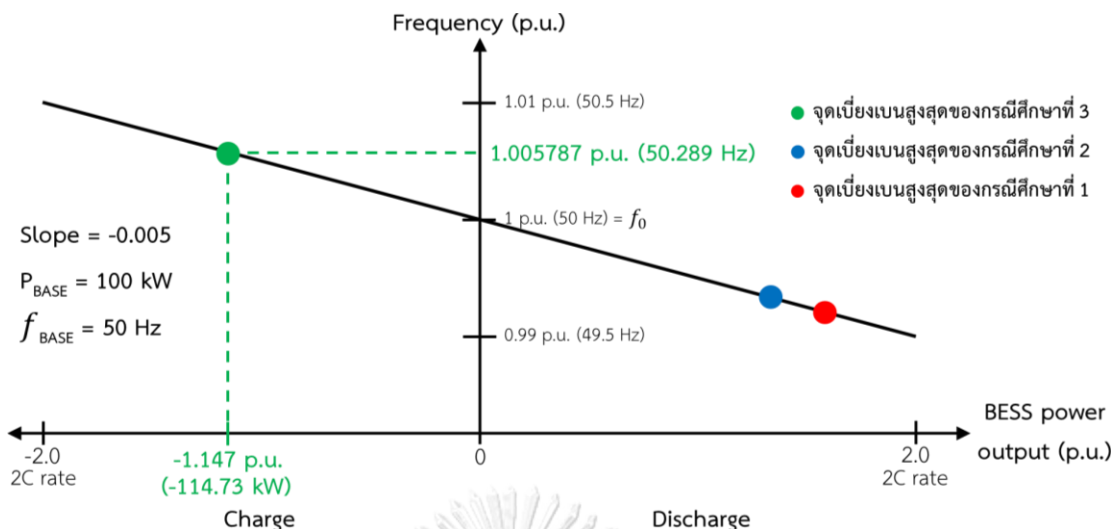
รูปที่ 5.20 ผลการจำลองระบบของกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 5.21 แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และจุดติดตั้งสวิตช์สำหรับตัดโหลด S1 - S4 ของกรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ 5.22 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อช่วยชดเชยความผันผวนของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 5.23 จุดทำงานที่เกิดความเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดในกราฟคุณลักษณะรูปของกรณีศึกษาที่ 3

5.4 สรุปผลการจำลองระบบ

ผลสรุปการทำงานของระบบไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดด มีค่าเบี่ยงเบนความถี่ และค่าเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่าเบี่ยงเบนความถี่ และค่าเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีศึกษา

กรณี	แรงดันเบี่ยงเบนสูงสุด (p.u.)	ความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด (Hz)
มาตรฐาน	± 0.05	± 0.5
1	+0.0025	+0.385
2	+0.0035	+0.320
3	+0.0031	-0.281

ระบบไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด อินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะทำหน้าที่จัดตั้งโครงข่าย กำหนดความถี่และ แรงดันไฟฟ้าของระบบจากการควบคุมแบบรูป และส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติตามลำดับ จากการจำลองระบบพบว่า ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงโหลดและช่วยชดเชยความผันผวนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความผันผวนหลายระดับได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นการตอบสนองตามตามการควบคุมแบบรูปที่ควบคุมความถี่ของระบบตามจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าตามที่เปลี่ยนแปลงตามความผันผวนต่างๆ โดยที่จุดต่อร่วม (PCC) ค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดของความถี่ และแรงดันไฟฟ้าของกรณีศึกษาทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการ

ควบคุมระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ให้มีคุณลักษณะเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ซิงโครนัส สามารถช่วยควบคุมความถี่ และแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุปงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการปรับปรุงระบบป้องกันของไมโครกริดบ้านขุนแปะ และปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของไมโครกริดเมื่อทำงานแบบแยกโดด โดยในส่วนของปรับปรุงระบบป้องกันของไมโครกริดบ้านขุนแปะเนื่องจากระบบไมโครกริดสามารถทำงานได้ 2 รูปแบบ คือ แบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก และแบบแยกโดด ซึ่งการทำงานทั้ง 2 รูปแบบ ระบบไฟฟ้าจะมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันส่งผลให้การออกแบบระบบป้องกันที่ต้องสามารถรองรับการทำงานได้ทั้ง 2 รูปแบบ โดยทำการแบ่งกลุ่มโหลดเป็นเขตการป้องกันทั้งเขตป้องกันปฐมภูมิ และเขตป้องกันสำรองเพื่อให้สามารถแยกเฉพาะส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบได้ และเลือกใช้รีโกลสเซอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกันในแต่ละเขตการป้องกัน เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนค่าการทำงานได้ตามรูปแบบการทำงานของไมโครกริด และสามารถลดปัญหาไฟดับจากความผิดปกติแบบชั่วคราวที่มีแนวโน้มจะเกิดขึ้นมากในระบบไมโครกริดบ้านขุนแปะ และนำเสนอกระบวนการหาค่าปรับตั้งรีโกลสเซอร์ โดยใช้โปรแกรม DigSILENT Powerfactory ในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในไมโครกริด และนำค่าที่ได้ผ่านกระบวนการหาค่าปรับตั้งของรีโกลสเซอร์ตามการทำงานแบบกลุ่ม ทำให้ระบบป้องกันของระบบไมโครกริดรองรับการทำงานทั้ง 2 รูปแบบของไมโครกริดได้

ในส่วนของปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดทำงานแบบแยกโดด ที่พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของโหลด มีความผันผวนจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และความผันผวนกำลังการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำที่แตกต่างกันในแต่ละฤดูกาล โดยประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้มีคุณลักษณะเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อช่วยควบคุมคุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่ และแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ จากผลการจำลองการทำงานพบว่า การควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้ทำงานเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสช่วยประสานการผลิตกำลังไฟฟาระหว่างแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวได้ และยังสามารถช่วยลดทอนผลกระทบจากความผันผวนของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและโหลด ซึ่งทำให้การทำงานของไมโครกริดแบบแยกโดดมีความถี่และแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบระบบป้องกันโดยให้ความสำคัญกับความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งการติดตั้งรีโคสเซอร์จำนวนมากอาจไม่คุ้มค่า สามารถออกแบบระบบป้องกันโดยเน้นการป้องกันเฉพาะเขตป้องกันที่โหลดในพื้นที่ที่มีความสำคัญ และยุบรวมเขตป้องกันที่โหลดในพื้นที่ที่มีความสำคัญน้อย หรือในเขตป้องกันที่โหลดในพื้นที่ที่มีความสำคัญน้อยอาจเปลี่ยนไปใช้อุปกรณ์ป้องกันที่มีราคาถูกลงกว่าได้ เช่น ฟิวส์ เป็นต้น



บรรณานุกรม

- [1] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, รายงานโครงการวิจัยและพัฒนาระบบบริหารจัดการแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสานขนาดเล็กมากและสายจำหน่ายไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกล. 2018, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [2] ศิริวัฒน์ เตชะพกาพงษ์, กรณีศึกษาการใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กเพื่อลดผลกระทบจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2017, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. p. 90.
- [3] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, *Provincial Electricity Authority's Regulation on the Power Network System Interconnection Code*. 2016.
- [4] Lasseter, H.N.a.R.H., *Microgrid Protection*, in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 2007: Tampa, FL. p. 1-6.
- [5] B. A. Pacheco, M.A.I.M., C. Q. Pica and N. Rodrigues, *A case study of adaptive microgrid protection during transitions and operations*, in *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*. 2017: Juiz de Fora. p. 1-5.
- [6] Z. C. Li, J.H., J. H. He and T. Yip, *A protection method for microgrids based on information sharing*, in *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)*. 2014: Copenhagen. p. 1-5.
- [7] S. Beheshtaein, R.C., M. Savaghebi and J. M. Guerrero, *Review on microgrids protection*. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019. 13, no. 6: p. 743-759.
- [8] รักชิมา ชณะฤกษ์, วิธีการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และการปรับตั้งระบบป้องกันสำหรับไมโครกริดกระแสสลับของจังหวัดแม่ฮ่องสอน, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2016, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] ชนกฤต กิตติวารัตน์, วิธีการรีซิงโครไนซ์ของระบบไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2018, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] จรรย์วัส รอดหลัก, ชนกฤต กิตติวารัตน์ และสุรพงศ์ สุวรรณกวิน, กรณีศึกษาการทางานของไมโครกริดในโหมดแยกโดดของอำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ที่พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความผันผวนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์, in *PEACON 2019*. 2019: กรุงเทพฯ. p. 189-195.
- [11] J. Liu, Y.M.a.T.I., *Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverterbased distributed generators*. IEEE Trans. Power Electronics, 2016. 31, no. 5: p. 3600-3611.

- [12] J. Rocabert, A.L., F. Blaabjerg, and P.Rodriguez, *Control of power converters in AC microgrids*. IEEE Trans. Power Electron, 2012. 27: p. 4734-4749.
- [13] Katiraei, D.T.a.F., *Fault contribution of grid-connected inverters*, in 2009 *IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*. 2009: Montreal, QC. p. 1-5.
- [14] กองวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, รายงานค่ากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าของ กฟภ. ปี 2561 (2018). 2018.
- [15] กองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, หลักเกณฑ์การปรับตั้งค่าการทำงานของรีเลย์. 2013.



ภาคผนวก ก

การประสานการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Protection coordination)

ระบบป้องกันประกอบด้วยอุปกรณ์ป้องกันหลายตัวทำงานร่วมกัน โดยอุปกรณ์ป้องกันแต่ละตัวจะติดตั้งอยู่ในตำแหน่งต่างๆ ตามการแบ่งเขตการป้องกันที่ได้กำหนดไว้ การพิจารณาระบบป้องกันจะต้องปรับตั้งค่าให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานประสานสอดคล้องกัน โดยต้องจัดลำดับการทำงานก่อนหรือหลังให้ถูกต้อง ซึ่งการประสานการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันอย่างถูกต้องจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือเนื่องจากเหตุผล ดังนี้

1) เมื่อเกิดความผิดปกติในเขตการป้องกันใด อุปกรณ์ป้องกันในเขตป้องกันนั้นจะทำงานก่อนอุปกรณ์ป้องกันในเขตอื่น ทำให้ไฟฟ้าดับเฉพาะเขตการป้องกันนั้น

2) ในกรณีเกิดความผิดปกติขึ้นจะสามารถค้นหาพื้นที่ๆ เกิดความผิดปกติได้รวดเร็วขึ้น เนื่องจากทราบว่าจะจุดที่เกิดความผิดปกติต้องอยู่ในพื้นที่เขตการป้องกันที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ

การประสานการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันมีหลักการ คือ เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าอุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันปฐมภูมิ (Primary protective device) ซึ่งจะทำงานก่อน ส่วนอุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ถัดออกมาจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง (Backup protective device) โดยอุปกรณ์ป้องกันสำรองจะทำงานในกรณีที่อุปกรณ์ตัวที่อยู่ใกล้ตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติไม่ทำงาน แต่เวลาการทำงานจะถูกกำหนดให้ช้ากว่าเพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ป้องกันสำรองทำงานพร้อมกันหรือทำงานก่อนอุปกรณ์ป้องกันปฐมภูมิ โดยการประสานการทำงานระหว่างรีเลย์กระแสเกินควรใช้รีเลย์ที่มีคุณลักษณะการทำงานแบบเดียวกันเพื่อความสะดวกในการประสานการทำงานระหว่างกัน ระยะเวลาการทำงานระหว่างอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานก่อนและหลังเพื่อให้ทำงานประสานสอดคล้องได้อย่างถูกต้องเรียกว่า ค่าเผื่อเวลาการทำงาน (Grading Margin) ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้คือ

1) Circuit Breaker Interrupting Time เป็นเวลาที่อุปกรณ์ตัดตอนทำงานมีค่าประมาณ 0.1 วินาที

2) Over Shoot Time of Relay เป็นเวลาที่รีเลย์ยังทำงานอยู่หลังจากถูกตัดพลังงานออกไปมีค่าไม่เกิน 0.05 วินาที

3) ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ในการทำงาน อาจมีผลเนื่องจากอุณหภูมิ ความถี่ มีค่าประมาณ 0.1 วินาที

4) Safety Margin กำหนดให้มีค่า 0.1 วินาที

ผลรวมของค่าเพื่อเวลาทั้งหมดมีค่า 0.35 วินาที แต่สวิตช์เกียร์ในปัจจุบันสามารถทำงานได้รวดเร็วกว่าเดิมและและถูกต้องแม่นยำกว่าเดิมมาก จึงสามารถตัดเวลา Overshoot ของรีเลย์และลดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เป็น 0.05 วินาที ดังนั้น ค่าที่เหมาะสมในการใช้งานคือ 0.25 – 0.4 วินาที



ภาคผนวก ข

รีโคลสเซอร์และหลักการทำงานเบื้องต้น

รีโคลสเซอร์ (Recloser) เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่มีลักษณะการทำงานเหมือนเซอร์กิตเบรกเกอร์ คือ ทำหน้าที่เปิดวงจรเพื่อตัดกระแสลัดวงจรไหลผ่านตัวรีโคลสเซอร์ อันเนื่องมาจากเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า แต่ความสามารถที่เพิ่มจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ คือ สามารถปิดกลับวงจรโดยอัตโนมัติเพื่อให้ระบบสามารถจ่ายไฟได้ปกติอีกครั้งในเวลาอันรวดเร็วหลังจากที่ความผิดปกติพ่วงถูกกำจัดให้หมดไปอันเนื่องมาจากความผิดปกติแบบชั่วคราว ที่โดยปกติแล้วจะเกิดขึ้นประมาณ 80% - 90% ของความผิดปกติที่เกิดขึ้นทั้งหมด แต่ถ้าความผิดปกติที่เกิดขึ้นเป็นแบบถาวรเมื่อรีโคลสเซอร์เปิดวงจรกลับจะยังมีกระแสลัดวงจรไหลผ่านอยู่ รีโคลสเซอร์จะเปิดวงจรอีกครั้ง โดยการเปิดและปิดกลับวงจรเป็นไปตามจำนวนครั้งที่ตั้งไว้ เมื่อเปิดและปิดวงจรจนครบจำนวนที่ตั้งไว้ก็จะเกิดสภาวะปิดค้าง (Lock out) นั่นคือ จะไม่ปิดวงจรได้อีกจนกว่าจะมีการรีเซต (Reset) โดยรีโคลสเซอร์จะทำงานตามคำสั่งของรีเลย์กระแสเกินที่อยู่ในชุดควบคุมรีโคลสเซอร์ ซึ่งรีเลย์นี้จะทำหน้าที่ในการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านรีโคลสเซอร์ เมื่อกระแสไหลผ่านเกินกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้ก็จะสั่งการให้รีโคลสเซอร์ทำการเปิดวงจร โดยเวลาการทำงานจะเป็นไปตามคุณลักษณะของกระแสผกผันกับเวลา (Inverse Time Overcurrent Characteristic) ที่ได้กำหนดไว้ โดยเวลาทำงานจะผกผันกับค่ากระแสลัดวงจร กล่าวคือ ถ้ากระแสลัดวงจรมีค่าน้อยรีเลย์จะทำงานช้า แต่ถ้ากระแสลัดวงจรมีค่ามากรีเลย์จะทำงานเร็ว การทำงานตามคุณลักษณะของกระแสผกผันกับเวลาทำให้การออกแบบระบบป้องกันมีความยืดหยุ่นในการปรับตั้งค่า เนื่องจากใช้ทั้งค่ากระแสลัดวงจรและเวลาในการกำหนดการทำงาน

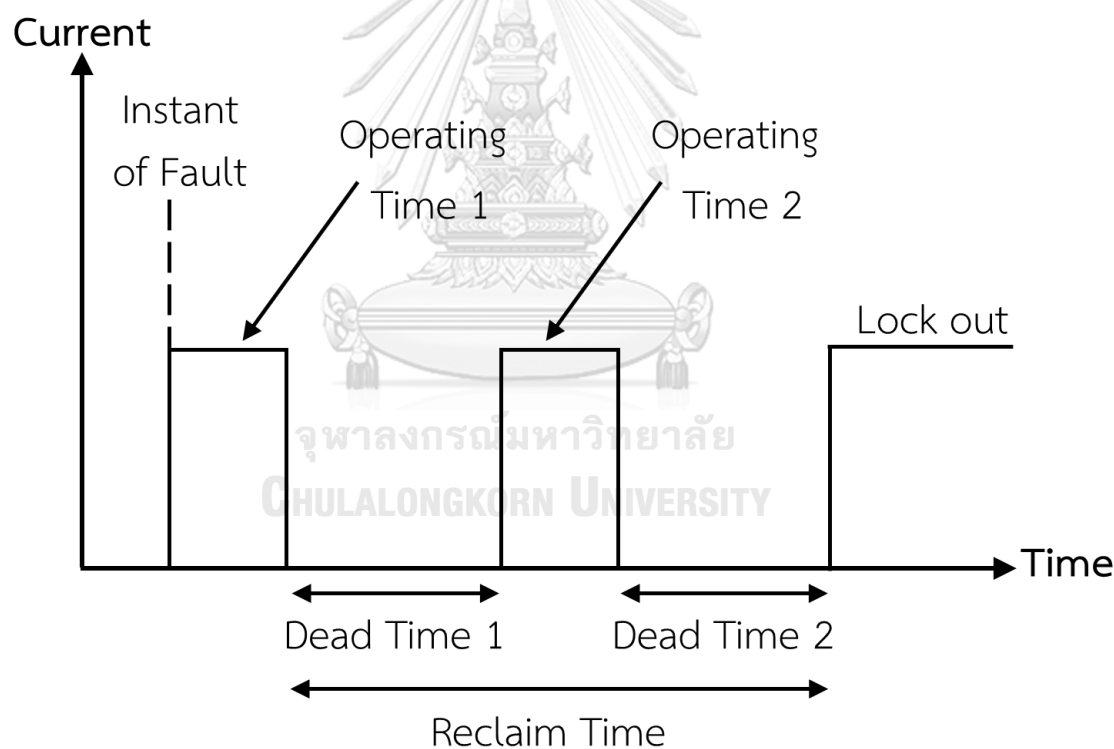
หลักการทำงานเบื้องต้นของรีโคลสเซอร์ คือ เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นรีโคลสเซอร์จะทำการเปิดวงจรตามค่าเวลาทำงาน (Operation Time) และเมื่อเปิดวงจรครบตามเวลาที่กำหนดไว้ตามค่าช่วงเวลาไม่มีไฟ (Dead Time) รีโคลสเซอร์จะทำการปิดวงจร ถ้าความผิดปกติที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั่วคราวระบบจะกลับคืนสู่ภาวะปกติ อย่างไรก็ตามถ้าความผิดปกตินั้นยังคงอยู่ รีโคลสเซอร์จะเปิดวงจรอีกครั้ง และเมื่อครบเวลาที่กำหนดไว้รีโคลสเซอร์จะปิดวงจรกลับอีกครั้ง ซึ่งการเปิดวงจรและปิดกลับจะเกิดขึ้นจนกว่าความผิดปกตินั้นได้ถูกกำจัดให้หมดไป หรือครบจำนวนครั้งที่กำหนดไว้ ในกรณีที่ครบจำนวนครั้งที่กำหนดไว้รีโคลสเซอร์จะเกิดสภาวะปิดค้าง (Lock out) จนกว่าจะมีการรีเซต โดยการทำงานของรีโคลสเซอร์จะแบ่งเป็นช่วงเวลาตามรูปที่ ข.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) เวลาทำงาน (Operating Time) คือ ช่วงเวลาตั้งแต่เกิดความผิดปกติจนถึงเวลาที่อาร์กจากการเปิดวงจรถูกกำจัดจนหมด ระยะเวลาทำงานช่วงนี้จะทำงานตามคุณลักษณะของกระแสเกิน ผกผันกับเวลา (Inverse Time Overcurrent Characteristic) ที่ได้กำหนดไว้

2) ช่วงเวลาไม่มีไฟ (Dead Time) คือ ช่วงเวลาตั้งแต่อาร์กจากการเปิดวงจรถูกกำจัดจนหมด จนถึงเวลาที่ปิดวงจรอีกครั้ง

3) เวลาคืนตัวสมบูรณ์ (Reclaim Time) คือ ช่วงเวลาหลังจากรีโคลสเซอร์สั่งปิดวงจรจนถึงสภาวะปิดค้าง โดยเวลาคืนตัวสมบูรณ์ต้องมากกว่าเวลาทำงาน เพราะเมื่อรีโคลสเซอร์ปิดวงจรขณะที่ความผิดปกติยังคงอยู่ รีโคลสเซอร์จะเปิดวงจรอีกครั้งภายในช่วงเวลาคืนตัวสมบูรณ์นี้ ซึ่งรีโคลสเซอร์จะทำการเปิดวงจรในครั้งต่อไปจนสิ้นสุดเวลาคืนตัวสมบูรณ์ซึ่งจะเกิดสภาวะการปิดค้าง

4) สภาวะการปิดค้าง (Lock out) คือ สภาวะที่รีโคลสเซอร์ทำงานเปิดและปิดกลับวงจรจนครบจำนวนครั้งที่ตั้งไว้ ซึ่งจะเกิดการปิดค้าง คือ การเปิดวงจรค้างไว้จนกว่าจะมีการรีเซต



รูปที่ ข.1 ช่วงเวลาการทำงานของรีโคลสเซอร์ที่ตั้งค่าการปิดกลับ 2 ครั้ง

ภาคผนวก ค

คุณลักษณะการทำงานของรีโกลสเซอร์

รีโกลสเซอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าที่มีหน้าที่เปิดวงจรขณะที่ระบบไฟฟ้าเกิดความผิดปกติพร่องขึ้น โดยรีโกลสเซอร์จะทำงานตามคำสั่งจากรีเลย์กระแสเกินที่อยู่ในชุดควบคุมรีโกลสเซอร์ รีเลย์กระแสเกินทำหน้าที่ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีโกลสเซอร์ ในกรณีที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเกินค่าที่กำหนดเนื่องมาจากความผิดปกติที่เพิ่มขึ้น รีเลย์กระแสเกินจะสั่งการให้รีโกลสเซอร์ทำการเปิดวงจรเพื่อกำจัดความผิดปกติพร่องนั้น

รีเลย์กระแสเกินที่ควบคุมการทำงานของรีโกลสเซอร์จะพิจารณาทั้งกระแสที่ไหลผ่านและเวลา โดยทำงานตามกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของกระแสผกผันกับเวลา (Inverse Time Overcurrent Characteristic) ซึ่งพิจารณาได้จากกราฟเวลาเทียบกระแส กล่าวคือ ถ้ากระแสลัดวงจรมีค่าสูงเวลาในการทำงานจะเร็ว ถ้ากระแสลัดวงจรมีค่าต่ำเวลาในการทำงานจะช้าลง ตามมาตรฐาน IEC 60255 กราฟคุณลักษณะของกระแสผกผันกับเวลาสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามความผกผันในการทำงาน ดังนี้

- 1) แบบผกผันมาตรฐาน (Standard Inverse, SI) กราฟแบบนี้มีความชันน้อยที่สุด
- 2) แบบผกผันมาก (Very Inverse, VI) กราฟแบบนี้มีความชันอยู่ระหว่างแบบผกผันมาตรฐานและแบบผกผันอย่างยิ่ง
- 3) แบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse, EI) กราฟแบบนี้มีความชันมากที่สุด

กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสแปรผกผันกับเวลาแต่ละประเภทจะส่งผลให้เวลาทำงานของรีเลย์แตกต่างกัน โดยเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสแปรผกผันกับเวลาเป็นดังสมการที่ ค.1 โดยค่าพารามิเตอร์ A และ B เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับประเภทเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสแปรผกผันกับเวลาที่ถูกเลือกใช้ ดังแสดงค่าคงที่ในตารางที่ ค.1 ซึ่งเมื่อวาดกราฟตามสมการที่ ค.1 จะได้กราฟ Standard Inverse (SI), Very Inverse (VI) และ Extremely Inverse (EI) ดังรูปที่ ค.1

$$t(I) = TMS \left[\frac{A}{\left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^B - 1} \right] \quad (\text{ค.1})$$

โดย $t(I)$ คือ ระยะเวลาการทำงาน (Operating Time) ของรีโกลสเซอร์ (s)
 I คือ กระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านรีโกลสเซอร์ (A_{rms})

TMS คือ ค่าเวลาปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน (Time Multiplier Setting)

I_{pickup} คือ ค่ากระแสที่รีโกลสเซอร์จะเริ่มทำงาน (A_{rms})

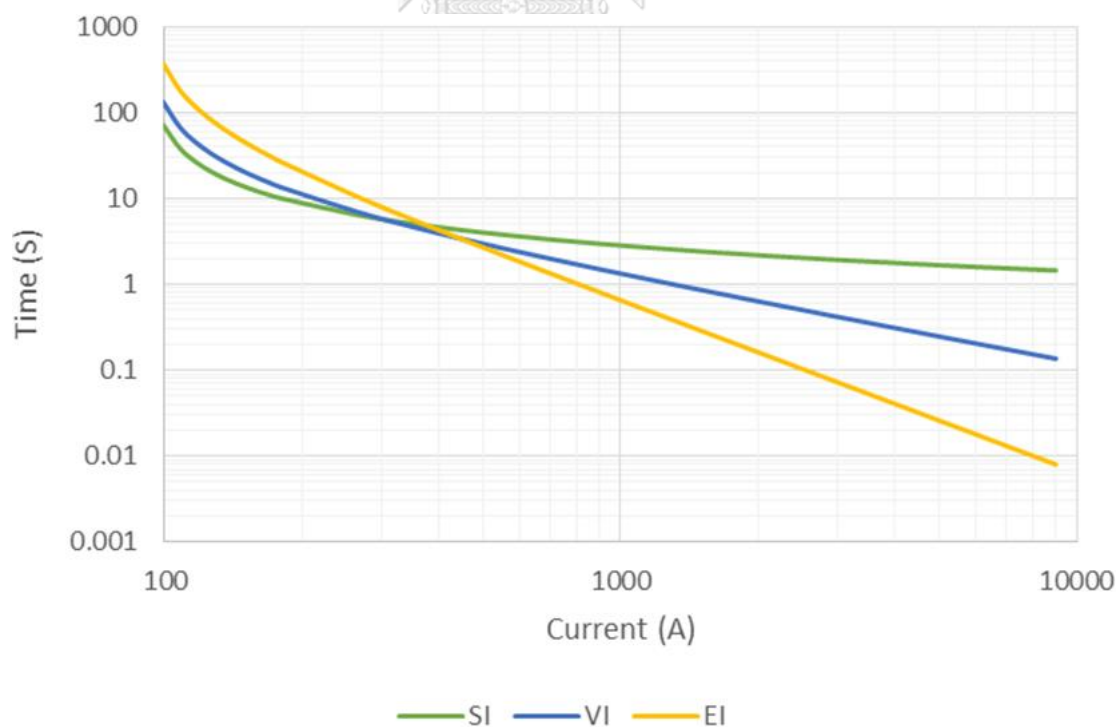
ตารางที่ ค.1 ค่าพารามิเตอร์เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาตามมาตรฐาน IEC 60255

Characteristic	A	B
Standard Inverse (SI)	0.14	0.02
Very Inverse (VI)	13.5	1
Extremely Inverse (EI)	80	2

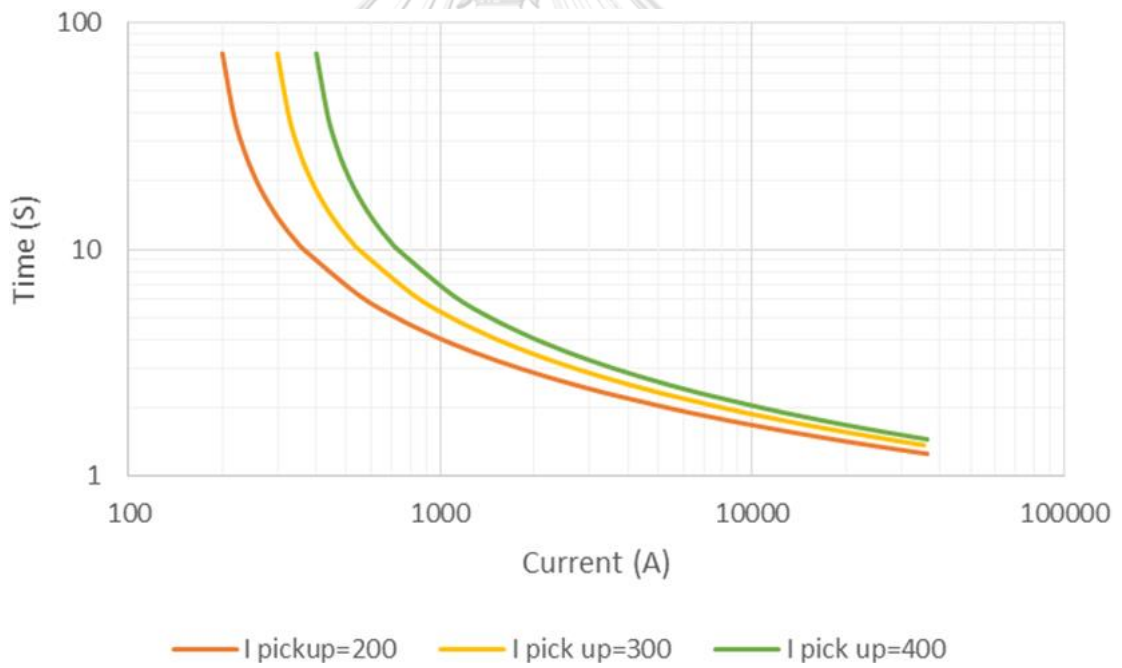
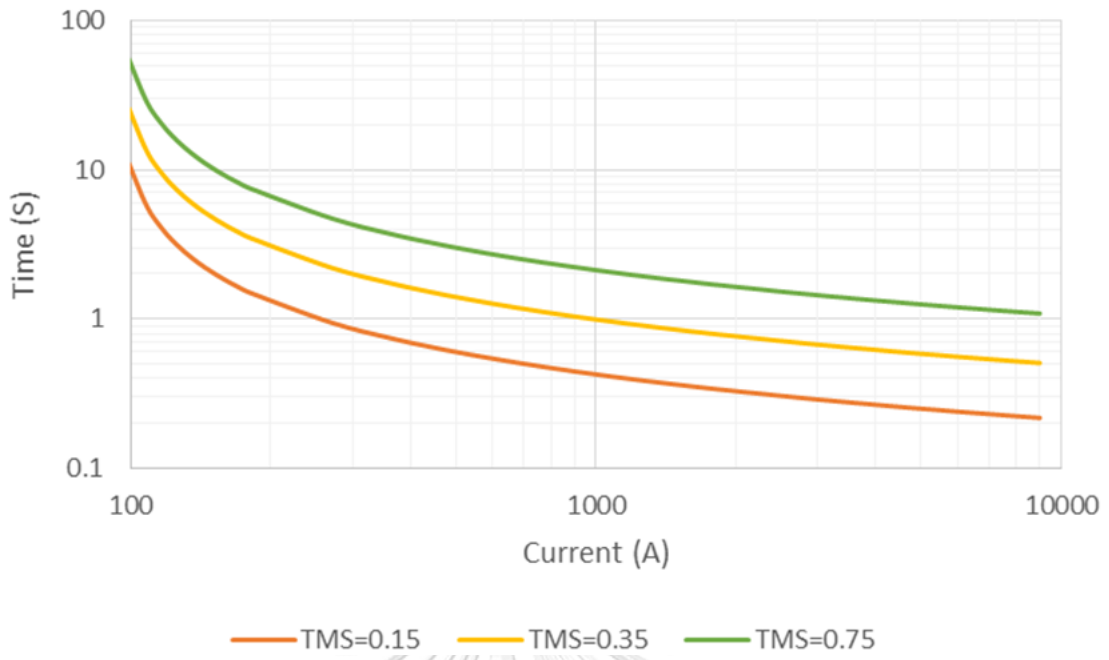
กราฟคุณลักษณะการทำงานจากสมการที่ ค.1 สามารถปรับตั้งค่าได้ดังนี้

1) การปรับตั้งความเร็วในการทำงาน สามารถปรับตั้งได้ด้วยการปรับค่า TMS โดยจะทำให้เส้นกราฟขยับขึ้น หรือลงจากเดิม ซึ่งส่งผลให้ที่ค่ากระแสลัดวงจรเท่าเดิมรีโกลสเซอร์จะทำงานเร็วขึ้นหรือ หรือช้าลงจากเดิม ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ค.2 โดยกำหนดให้เป็นกราฟความผกผันแบบ SI และ $I_{pickup} = 100 \text{ A}$

2) การปรับตั้งค่ากระแสเริ่มทำงาน สามารถปรับตั้งได้ด้วยการปรับค่า I_{pickup} เพื่อกำหนดให้รีโกลสเซอร์เริ่มทำงานที่ค่ากระแสลัดวงจรตามที่ต้องการ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ค.3 โดยกำหนดให้เป็นกราฟความผกผันแบบ SI และ $TMS = 1$



รูปที่ ค.1 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสผกผันกับเวลาตามมาตรฐาน IEC 60255



รูปที่ ค.2 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะที่ปรับค่า TMS ที่ค่าต่างกัน

รูปที่ ค.3 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะที่ปรับค่า I_{pickup} ที่ค่าต่างกัน

ภาคผนวก ง

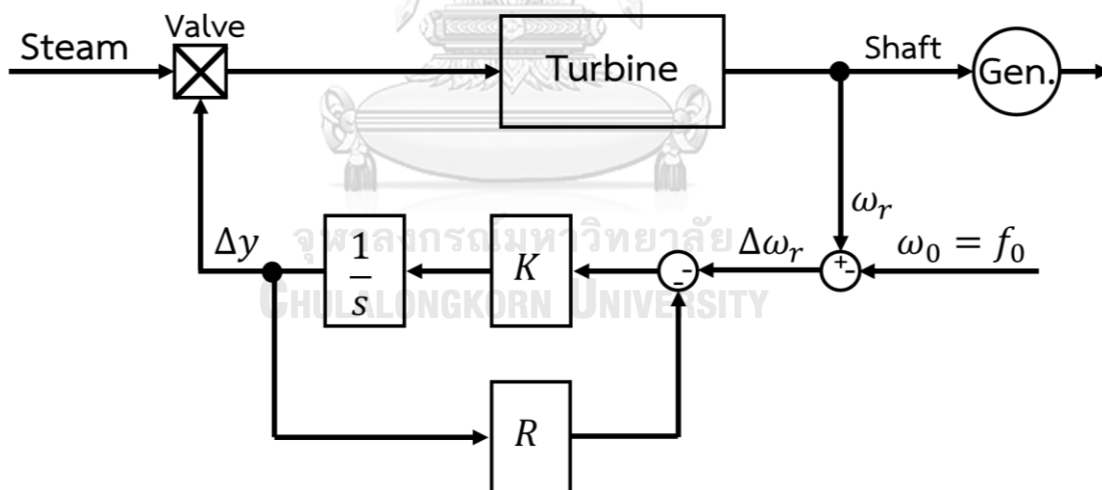
การควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจาแบตเตอรี่ให้มีคุณลักษณะ
เหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [8] [9] [10]

การควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจาแบตเตอรี่ให้มีคุณลักษณะเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

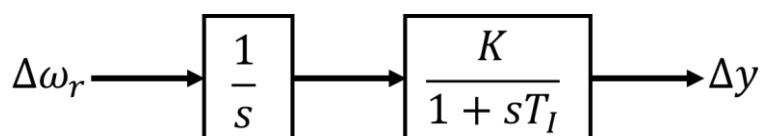
- 1) ส่วนควบคุมหลักประกอบด้วยชุดควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามคุณลักษณะดรู๊ป (Droop Characteristic) สำหรับควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า
- 2) ชุดควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (AVR) และตัวกระตุ้น (Exciter) สำหรับควบคุมแรงดันของระบบไฟฟ้า

1) ส่วนควบคุมความถี่ไฟฟ้า

ลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในการควบคุมความถี่ไฟฟ้าจะใช้การควบคุมดรู๊ปความถี่ - กำลังจริงซึ่งเป็นการสัมพันธ์ระหว่างความถี่ และกำลังจริง โดยหลักการคือยอมให้ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตกลงตามเรกูลेशनของความถี่ เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานร่วมกันได้โดยไม่เกิดการแข่งขันในการควบคุมความถี่



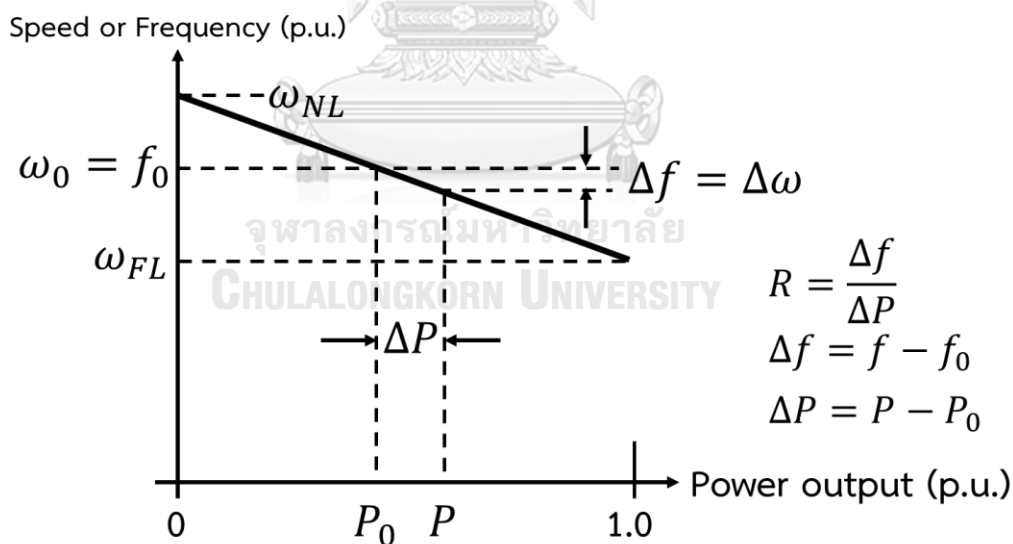
รูปที่ ง.1 ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีชุดควบคุมของตัวขับเคลื่อนและลักษณะดรู๊ปความถี่ - กำลังจริง



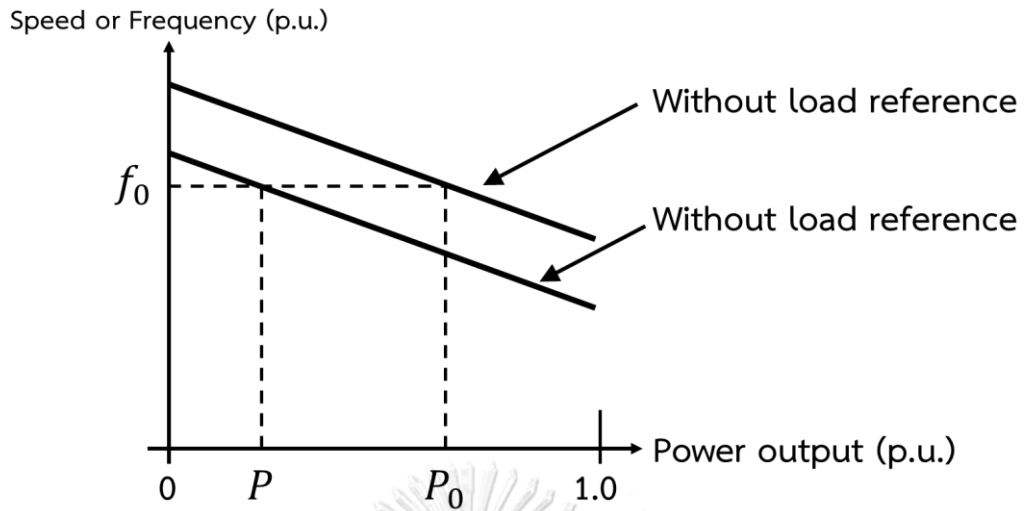
รูปที่ ง.2 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมลักษณะสมบัติดรู๊ปความถี่ - กำลังจริง

รูปที่ ง.1 และ ง.2 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมกำลังจริงที่มีลักษณะสมบัติรูป ความถี่ – กำลังจริง โดยลักษณะสมบัติของกังหัน และพลวัตความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส การทำงานของชุดควบคุมกำลังจริงที่เพิ่มลักษณะสมบัติรูป – กำลังจริง เข้าไปที่ชุด ควบคุมของตัวบังคับความเร็ว (Speed governor controller) การควบคุมความเร็ว (Speed regulation) จะถูกกำหนดโดยอัตราขยาย R ดังแสดงในรูปที่ ง.3 ที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างการ เปลี่ยนแปลงความเร็วหรือความถี่กับค่ากำลังจริง และการควบคุมลักษณะสมบัติรูป – กำลังจริง สามารถปรับค่าเริ่มต้นในการจ่ายกำลังจริงโดยการป้อนสัญญาณค่าโหลดอ้างอิง (Load reference) ซึ่งสามารถกำหนดความสำคัญในการจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขนานกัน หรือกำหนดให้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในรูปแบบพร้อมจ่าย (Spinning reserve) ได้

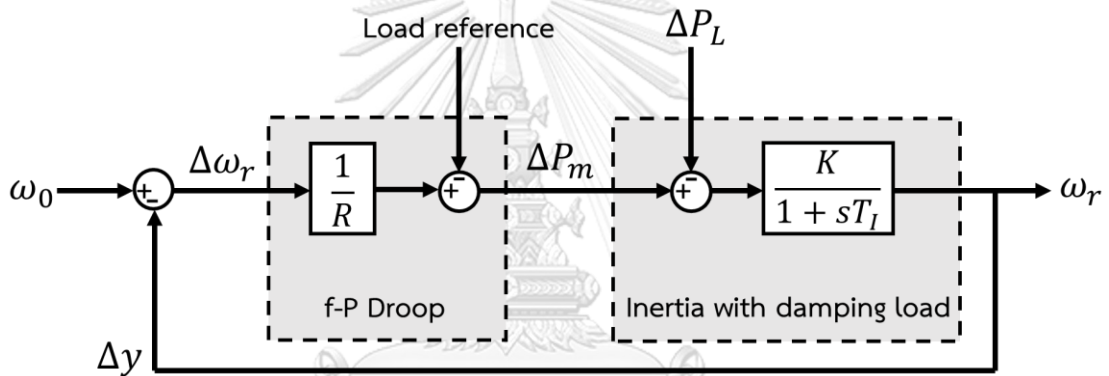
รูปที่ ง.4 แสดงตัวอย่างการตั้งค่าโหลดอ้างอิง เมื่อพิจารณาจุดทำงานที่ความถี่ปกติ f_0 โดยการจ่ายกำลังของกราฟที่มีการกำหนดโหลดอ้างอิง และไม่ได้กำหนดโหลดอ้างอิงจะมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นการกำหนดโหลดอ้างอิงจึงเป็นการให้ลำดับความสำคัญในการจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัสที่มีลักษณะรูปความถี่ – กำลังจริง และสามารถปรับตั้งให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ทำงานแบบพร้อมจ่าย (Spinning reserve) ได้อีกด้วย ชุดควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ ง.4



รูปที่ ง.3 ลักษณะสมบัติรูปความถี่ – กำลังจริงในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ ๓.3 ลักษณะสมบัติรูปความถี่ - กำลังจริงในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ ๓.4 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

2) ส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้า

2.1) แบบจำลองทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในการควบคุมแรงดัน

การควบคุมแรงดันอ้างอิงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะพิจารณาจากการเหนี่ยวนำของแรงดันที่เกิดขึ้นที่ขดลวดอาร์เมเจอร์สามเฟสจากพลวัตของขดลวดสนามที่ถูกกระตุ้น ดังสมการที่ (๓.1)

$$\frac{V_f}{e_f} = \frac{K_D}{\tau_D s + 1}$$

(๓.1)

โดยค่า τ_D จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด และค่าความต้านทานของขดลวดสนาม ทั้งนี้ค่าความเหนี่ยวนำในกรณีนี้คือ ผลรวมของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสนามและค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสนามและขดลวดสเตเตอร์ สำหรับค่าอัตราขยาย K_D จะขึ้นกับลักษณะสมบัติการกระตุ้น (Magnetization characteristic)

2.2) การควบคุมแรงดันด้วยตัวควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (AVR) และตัวกระตุ้น

(Exciter)

โดยทั่วไปการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีองค์ประกอบหลักคือ ตัวกระตุ้น (Exciter) และตัวควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (AVR) โดยตัวกระตุ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวขยายกำลังขดลวดสนามและมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (ง.2) ซึ่งแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันกระตุ้นทางด้านโรเตอร์ e_f และแรงดันเฟสที่ปลายขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า V_R

$$\frac{e_f}{V_R} = \frac{K_E}{\tau_{ES}+1}$$

(ง.2)

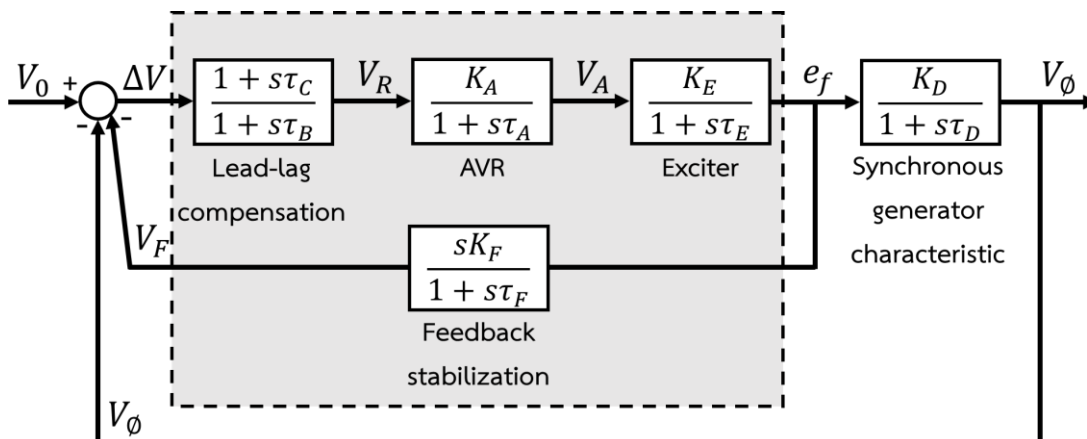
โดยค่า K_E คือ อัตราขยายกำลังจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้เป็นตัวกระตุ้น และลักษณะสมบัติการกระตุ้น สำหรับค่าคงตัวเวลา τ_E จะขึ้นกับค่าความต้านทานของตัวกระตุ้น ค่าความเหนี่ยวนำของตัวกระตุ้น และลักษณะสมบัติการกระตุ้น

ตัวควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (AVR) โดยส่วนมากจะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่ง หรือเป็นแบบล่าหลัง - นำหน้า ดังแสดงในสมการที่ (ง.3)

$$\frac{V_R}{\Delta V} = \left(\frac{\tau_{CS}+1}{\tau_{BS}+1} \right) \left(\frac{K_A}{\tau_{CS}+1} \right)$$

(ง.3)

ค่าคงตัวเวลา τ_A และอัตราการขยาย K_A คือค่าเวลาคงตัวของตัวปรับค่าแรงดันและอัตราการขยายของตัวปรับค่าแรงดันตามลำดับ จากลักษณะของตัวควบคุมทำให้เกิดค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวหรือเรกูละชันของแรงดัน โดยค่าผิดพลาดดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับอัตราการขยาย K_A ถ้าต้องการให้มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวน้อยก็จะใช้อัตราขยาย K_A สูงมากซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบต่อเสถียรภาพที่สถานะชั่วครู่ ซึ่งต้องมีการชดเชยป้อนกลับเพิ่มเติม จะเห็นได้ว่าการกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมแรงดันอัตโนมัติดังกล่าวมีวัตถุประสงค์คล้ายคลึงกับวิธีรูปความถี่ - กำลังจริงที่จะทำให้เกิดการแข่งขันกันควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ เมื่อโครงข่ายที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งตัว รูปที่ ง.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส จะเห็นได้ว่ามีส่วนป้อนกลับผ่านตัวอนุพันธ์ที่มีอัตราการขยาย K_F และค่าคงตัวเวลา τ_F ที่จะช่วยปรับปรุงเสถียรภาพในสถานะชั่วครู่ได้



รูปที่ ง.5 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วันนพ คณานุสรณ์
วัน เดือน ปี เกิด	26 สิงหาคม 2533
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยมหิดล
ที่อยู่ปัจจุบัน	9/1 ซอยเพชรเกษม68แยก19 ถนนเพชรเกษม แขวงบางแคเหนือ เขตบางแค จังหวัดกรุงเทพฯ 10160
ผลงานตีพิมพ์	วันนพ คณานุสรณ์, ชาญณรงค์ บาลมงคล, และสุรพงศ์ สุวรรณภิน, “แนวทางการปรับปรุงระบบป้องกันทางไฟฟ้าให้เหมาะสมสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ณ บ้านขุนแปะ จังหวัดเชียงใหม่”, PEACON 2019, 2019